

# Ispitivanje zavarenog spoja JR.03-DI.22

---

**Rajter, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:135508>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ISPITIVANJE ZAVARENOG SPOJA JR.03-DI.22**

Rijeka, rujan 2023.

Josip Rajter

0069069497

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ISPITIVANJE ZAVARENOG SPOJA JR.03-DI.22**

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

Rijeka, rujan 2023.

Josip Rajter

0069069497

Rijeka, 10. ožujka 2022.

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

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Josip Rajter (0069069497)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**  
Modul: **Tehnološko informatičko inženjerstvo**

Zadatak: **Ispitivanje zavarenog spoja JR.03-DI.22 / Testing of welded joint JR.03-DI.22**

Opis zadatka:

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

U eksperimentalnom dijelu rada, metodom ispitivanja bez razaranja ispitati zavareni spoj oznake JR.03-DI.22. Opisati postupak ispitivanja, korištenu opremu i pribor te prikazati rezultate ispitivanja.

Dati odgovarajuće zaključke.

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



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Sunčana Smokvina Hanza

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam diplomski rad pod nazivom "Ispitivanje zavarenog spoja JR.03-DI.22" izradio samostalno primjenjujući stečeno znanje tijekom studija te literaturu i izvore navedene na kraju rada, pod stručnim vodstvom mentorice izv. prof. dr. sc. Sunčane Smokvina Hanza.

Josip Rajter

Mat.br. 0069069497

---

(potpis)

## **ZAHVALA**

Srdačno se zahvaljujem svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Sunčani Smokvina Hanza na njenom strpljenju, vremenu i ukazanom znanju tijekom izrade ovog diplomskog rada. Nadalje, izrazio bi veliku zahvalu poduzeću „Dalekovod proizvodnja d.o.o.“ na ukazanoj prilici za odradu eksperimentalnog dijela i stečenom iskustvu u ispitivanju nerazornim metodama. Također, završno zahvalio bi se svojoj obitelji, ponajviše ocu i sestri koji su mi bili velika podrška i uzor tijekom trajanja ovog studija.

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. VIZUALNA METODA ISPITIVANJA .....	2
2.1. Oprema i način provođenja ispitivanja .....	2
2.2. Područja primjene vizualne metode.....	4
2.3. Prednosti i nedostaci vizualne metode .....	5
3. ISPITIVANJE TEKUĆIM PENETRANTIMA .....	7
3.1. Oprema i način provođenja ispitivanja .....	7
3.2. Područje primjene ispitivanja tekućim penetrantima.....	11
3.3. Prednosti i nedostaci ispitivanje tekućim penetrantima .....	12
4. ISPITIVANJE MAGNETSKIM ČESTICAMA .....	14
4.1. Osnovni principi magnetizma i ispitivanja magnetskim česticama.....	14
4.2. Načini magnetiziranja feromagnetnih materijala .....	16
4.3. Čestice za magnetsko ispitivanje .....	20
4.4. Demagnetizacija materijala .....	22
4.5. Koraci prilikom izvođenja ispitivanja magnetskim česticama .....	23
4.6. Područja primjene ispitivanja magnetskim česticama .....	24
4.7. Prednosti i nedostaci ispitivanja magnetskim česticama .....	25
5. ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE.....	27
5.1. Princip rada ultrazvučnog ispitivanja.....	27
5.2. Metode ultrazvučnog ispitivanja.....	28
5.3. Teorijska osnova ultrazvučnog ispitivanja i Snellov zakon .....	32
5.4. Oprema za ispitivanje i kalibracija opreme.....	34
5.5. Prikaz nepravilnosti .....	36
5.6. Područja primjene ultrazvučnog ispitivanja.....	38

5.7. Prednosti i nedostaci ultrazvučnog ispitivanja .....	39
6. RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE .....	40
6.1. Principi rada radiografskog ispitivanja .....	40
6.2. Priroda prodiranja zračenja X-zrakama i Gama zrakama .....	41
6.3. Metode radiografskog ispitivanja .....	42
6.4. Područja primjene radiografskog ispitivanja.....	43
6.5. Prednosti i nedostaci radiografskog ispitivanja .....	44
7. TRENDOVI RAZVOJA METODA ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA.....	45
7.1. Digitalizacija metoda ispitivanja bez razaranja .....	45
7.2. Tehnike računalnog NDT pregleda .....	45
7.3. Definicija okvira automatiziranog sustava za NDT ispitivanje .....	46
7.4. Automatizacija radiografskog ispitivanja diskontinuiteta u zavarenim spojevima.....	48
7.5. Bežični ultrazvučni senzori.....	49
7.6. Prediktivno upravljanje korozijom.....	49
7.7. Budućnost NDT-a u smanjenju ekološkog utjecaja .....	50
8. KARAKTERISTIČNE GREŠKE U ZAVARENIM SPOJEVIMA.....	52
8.1. Pukotine u zavarenim spojevima .....	52
8.1.1. Tople pukotine .....	52
8.1.2. Hladne pukotine .....	53
8.2. Poroznost u zavarenim spojevima.....	54
8.3. Čvrsti uključci.....	55
8.4. Naljepljivanje i nedovoljno provarivanje .....	55
9. EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	57
9.1. Postupak MAG zavarivanja .....	58
9.1.1. Priprema elemenata za zavarivanje .....	58
9.1.2. Točkasto zavarivanje spojnih površina .....	59



9.1.3. Zavarivanje MAG postupkom .....	60
9.2. Vizualno ispitivanje.....	61
9.3. Ispitivanje fluorescentim magnetskim česticama.....	62
9.4. Ultrazvučno ispitivanje.....	64
10. ZAKLJUČAK.....	68
Literatura.....	69
Popis slika .....	73
Sažetak.....	75
Summary.....	76

## 1. UVOD

NDT (eng. Non destructive testing) igra ključnu ulogu u modernim industrijama omogućujući preciznu analizu materijala i komponenti bez potrebe za njihovim razaranjem. Pet najučestalijih metoda NDT-a koje se koriste su vizualna, magnetska, ultrazvučna, radiografska kao i ispitivanje tekućim penetrantima. Svaka od ovih tehnika ima svoje zasebne karakteristike i područja primjene koja omogućavaju inženjerima i stručnjacima otkrivanje nedostataka, nepravilnosti kao i potencijalnih problema u materijalima i strukturama.

Vizualna inspekcija prvi je i najjednostavniji način za detekciju površinskih nedostataka i oštećenja. Nadalje, ispitivanje tekućim penetrantima je metoda koja se koristi za otkrivanje površinskih nedostataka na materijalima poput pukotina. Ispitivanje tekućim penetrantima dosta je brz i jednostavan način ispitivanja površinskih grešaka pa zbog toga ima široku primjenu u avijaciji, proizvodnji i održavanju materijala te automobilske industriji. Magnetsko ispitivanje s druge strane koristi magnetsko polje za otkrivanje površinskih i blizu površinskih grešaka kao što su pukotine i nehomogenosti u feromagnetnim materijalima. Ultrazvučno ispitivanje se oslanja na emisiju i prijam ultrazvučnih valova za analizu unutarnje strukture materijala, otkrivajući defekte poput pukotina, pora ili inkluzija. Slično tome, radiografija koristi rendgensko zračenje za detaljnije snimanje unutarnjih defekata materijala, pružajući jasnije rezultate ispitivanja za procjenu kvalitete i integriteta. Također, svaka od ovih metoda nastoji pratiti trendove razvoja i novonastale inovacije kako bi se konstantno unaprjeđivale i prilagođavale novim tehnologijama. Njihova evolucija iz dana u dan omogućava pouzdanu detekciju nedostataka i poboljšava sigurnost u raznim industrijama.

Primjena NDT-a igra ključnu ulogu u otkrivanju karakterističnih grešaka u zavarenim spojevima, omogućujući preciznu procjenu integriteta spoja. NDT se koristi za otkrivanje različitih grešaka kao što su pukotine, poroznost, prisutnost čvrstih uključaka te problem naljepljivanja i nedovoljnog provarivanja. [1]

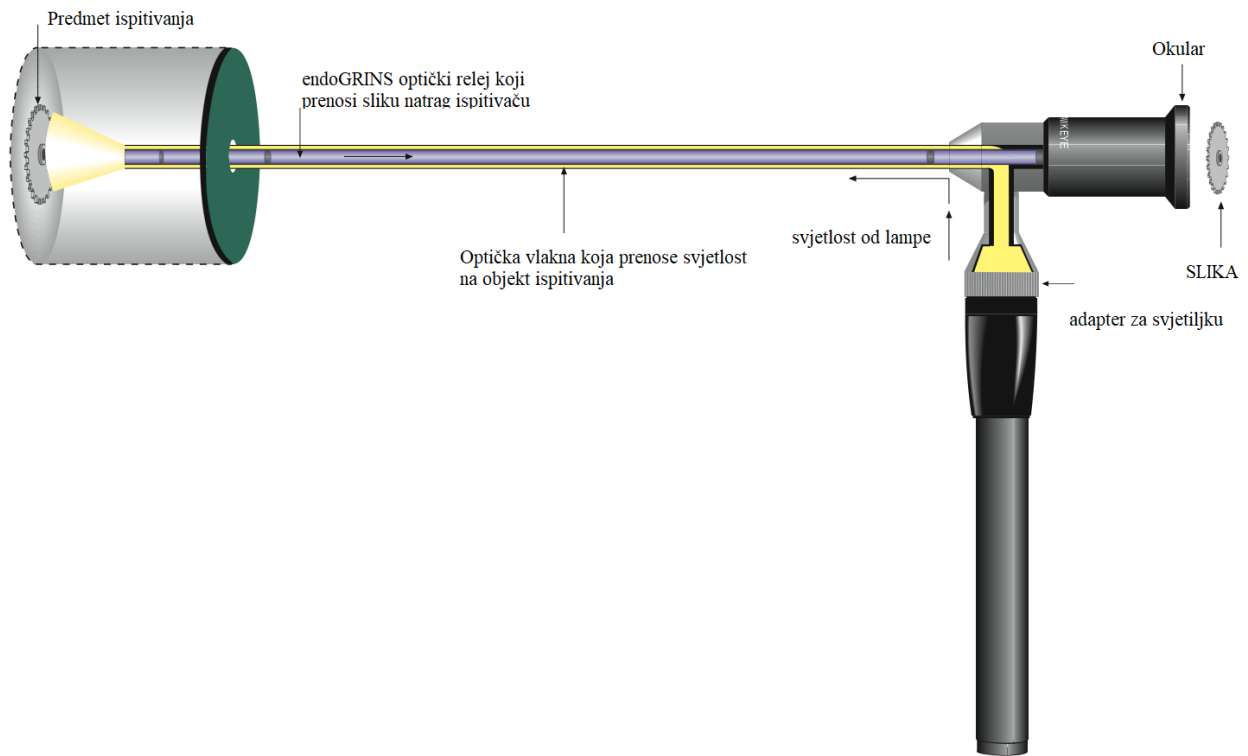
## **2. VIZUALNA METODA ISPITIVANJA**

Vizualna metoda ispitivanja bez razaranja smatra se jednom od najjednostavnijih i najosnovnijih metoda koja se koristi za ispitivanje površine materijala bez zahtjeva za posebnom opremom. Ova metoda se bazira na vizualnom promatranju površine predmeta ispitivanja kako bi se otkrili mogući nedostaci, oštećenja ili nepravilnosti. NDT ispitivači koji vrše vizualnu inspekciju predmeta ispitivanja oslanjaju se na svoje oko i iskustvo kako bi pravilno prepoznali bilo kakve znakove nepravilnosti.

### **2.1. Oprema i način provođenja ispitivanja**

Pri izvođenju vizualnog ispitivanja, ispitivač pažljivo pregledava i ispituje površinu predmeta kao i strukturu materijala izbliza. Prilikom ispitivanja koristi se razna oprema kao što su svjetiljke, ogledala, povećala ili drugi alati kao npr. boroskop ili videoskop koji značajno pomažu u pronalaženju i procjeni nedostataka. Najčešće greške koje je moguće detektirati uključuju pukotine, ogrebotine, površinske deformacije materijala, koroziju, nedostaci u zavarivanju ili bilo kakve druge greške koje mogu utjecati na sigurnost i funkcionalnost predmeta ispitivanja.

Nadalje, kao što je navedeno postoji više osnovnih tipova opreme koji se koriste za vizualnu kontrolu ispitnih površina bez da se površina oštećuje. Jedan od zastupljenijih je boroskop. Boroskop se može primjenjivati za vizualnu provjeru zavara kao NDT metoda. Boroskop je fleksibilni optički instrument koji omogućuje pregled teško dostupnih područja ispitivanja kao što su unutarnji dijelovi cijevi. Ispitivanje boroskopom omogućuje otkrivanje nepravilnosti kao što su pore, nehomogenost u zavaru, nepravilne nakupine taloga i drugih koje mogu utjecati na integritet zavara. Korištenje boroskopa za ispitivanje točnosti i pouzdanosti zavara može poboljšati kvalitetu ispitivanja posebno na mjestima kojima je pristup ispitivaču otežan ili nemoguć.



Slika 2.1. Princip rada Boroskopa prilikom vizualnog ispitivanja

Također jedan od primjenjivijih uređaja za vizualno ispitivanje je videoskop koji koristi puno moderniji pristup i digitalnu sliku. Videoskop se sastoji od savitljive cijevi kroz koju prolazi signal svjetla povezan s kamerom na kraju ispitne cijevi. Zahvaljujući svjetlosnoj vezi i kameri, ispitivač dobiva digitalnu sliku koja se prenosi s ispitnog komada na vanjski zaslon ili monitor. Na temelju te slike ispitivač može odmah pregledati sliku i otkriti ispitne nedostatke ili nepravilnosti. Prednost videoscopa naspram boroskopa je mogućnost zumiranja, rotacije kamere, promjene kuteva ispitivanja čime se omogućuje precizan i temeljit pregled.

Korištenjem videoscopa, ispitivač može efikasno pregledati i analizirati teško dostupna mjesta bez potrebe za demontažom sklopa što ovu metodu ispitivanja čini važnom u kontroli kvalitete kao i sigurnosti ispitivanja. [2,3]



*Slika 2.2 Prikaz jednog od modela videoskopa za vizualno ispitivanje*

## **2.2. Područja primjene vizualne metode**

Vizualna metoda ispitivanja u NDT-u ima širok raspon primjene u različitim sektorima i industrijama. Ova metoda se najčešće koristi za brzu identifikaciju površinskih grešaka i nepravilnosti komada koje je potrebno ispitati. Nadalje, navode se glavne grane primjene vizualne metode za ispitivanje :

- Vizualna metoda ispitivanja igra bitnu ulogu u procjeni kvalitete zavara. Ispitivač ima mogućnost procijeniti kvalitetu zavara na osnovu njegovog izgleda, ispunjenja samog zavara i bilo kakvih vidljivih površinskih nedostataka.
- Korištenje vizualne metode ispitivanja od strane inženjera građevine u svrhu ispitivanja stanja mostova, zgrada, cjevovoda ili stupova kako bi se otkrila oštećenja, pukotine, pojava korozije i ostale nepravilnosti.
- Vizualna metoda primjenjuje se za kontrolu spremnika i cjevovoda u svrhu sprječavanja curenja.
- U zrakoplovnoj industriji vizualna metoda je od velike važnosti posebice kod otkrivanja korozije i zamora materijala.

- Vizualna metoda primjenjiva je u automobilske industriji kako bi se osigurala sigurnost i kvaliteta vozila. Vizualna metoda služi prvobitno za provjeru unutarnjih komponenti vozila, karoserije kao i svih sastavnih komponenti koje su izložene trošenju.

Vizualna metoda faza je od koje se kreće prilikom svakog ispitivanja. Najčešće je moguća identifikacija nepravilnosti putem vizualne metode ali kako bi se osigurala cjelovita procjena ispitivanja, pristupa se kombiniranju različitih metoda NDT-a u svrhu što cjelovitijih i točnijih rezultata ispitivanja. [4]

### 2.3. Prednosti i nedostaci vizualne metode

Vizualna metoda ispitivanja kao i svaka ostala metoda ispitivanja sadrži svoje prednosti i nedostatke na koje je potrebno obratiti pažnju prilikom odabira odgovarajuće metode NDT-a.

Prednosti vizualne metode:

- Vizualna metoda jednostavna je za primjenu tj. ne zahtijeva skupu i zahtjevnu opremu za ispitivanje. Također ispitivač može lako i brzo ispitati površinu objekta.
- Niski troškovi ispitivanja, tj. vizualna metoda neraznog ispitivanja ne zahtijeva skupu i sofisticiranu opremu za ispitivanje.
- Jako brzi rezultati ispitivanja. Ispitivanje vizualnom metodom dobivaju se jako brzi rezultati ispitivanja tj. jako brzo se uočavaju površinski nedostaci kao što su pukotine ili bilo kakvi površinski vidljive nepravilnosti.
- Vizualna metoda ispitivanja smatra se prvim korakom pristupanja ispitnoj površini. Uočavanjem nepravilnosti vizualnom metodom moguće je skratiti vrijeme ispitivanja i cijenu jer se pravovremenim uočavanjem nepravilnosti izbjegava daljnje ispitivanje sofisticiranijim metodama.

Nedostaci vizualne metode:

- Nemogućnost otkrivanja dubinskih nedostataka na ispitnom komadu jedan je od glavnih nedostataka ispitivanja vizualnom metodom bez razaranja. Ispitivanjem vizualnom metodom moguće je otkrivanje površinskih nedostataka, točnije ako komad zahtjeva dubinsko ispitivanje potrebno je odlučiti se za sofisticiranije metode kao što su ultrazvučno ili radiografsko ispitivanje.

- Potrebno je radno iskustvo ispitivača odnosno ispravno prepoznavanje vrste nepravilnosti koja se uočava na ispitnom komadu. Neiskustvo ispitivača može rezultirati pogrešnom procjenom nepravilnosti što kao rezultat može imati produljeno vrijeme ispitivanja kao i čekanje u daljnjim koracima bilo distribucije ili daljnje obrade.
- Kao što je već navedeno ranije kod vizualne metode raspolažemo raznim opremama za ispitivanje, koje uvelike mogu olakšati ispitivanje na teško dostupnim mjestima. U većini slučajeva ispitivanje je otežano na zahtjevnim geometrijama, čime se smanjuje učinkovitost ispitivanja.
- Prilikom vizualnog ispitivanja, ispitivač se oslanja na površinu koja mu je dana na ispitivanje, točnije površina mora biti sasvim čista kako bi se kvalitetno izvršilo ispitivanje. Najčešće ispitni komadi mogu sadržavati površinske nečistoće kao što su prašina, boja ili bilo kakav oblik prljavštine, što uvelike smanjuje kvalitetnu detekciju površinskih nepravilnosti.

Zaključno, vizualna metoda nerazornog ispitivanja vrlo je brz i jednostavan način uočavanja nepravilnosti na ispitnom komadu, te može uvelike ubrzati vrijeme i smanjenje cijene ispitivanja. Korištenjem iste može se izbjeći korištenje sofisticiranijih metoda kao što su magnetsko, ultrazvučno te radiografsko ispitivanje ako se radi o nedostatku koji ne predstavlja veliku opasnost za funkcionalnost komponente.

### 3. ISPITIVANJE TEKUĆIM PENETRANTIMA

Ispitivanje tekućim penetrantima ili kako se u stručno naziva kapilarna metoda ispitivanja, jedna je od najzastupljenijih metoda ispitivanja zavarenih spojeva. Ova metoda omogućava ispitivaču otkrivanje svih površinskih nedostataka na zavarenim spojevima tj. indikaciju širokog spektra veličine pukotine. Ispitivanje kapilarnom metodom omogućava otkrivanje pukotina bez obzira na konfiguraciju ispitivanog komada kao i bez obzira na orijentaciju pukotine. Kapilarna metoda koristi odgovarajuće fluide koji imaju mogućnost prodiranja u najmanje šupljine koje se ispunjuju penetrantom. Fluid koji prodire kroz najuže šupljine naziva se penetrant i bazira se na lakim uljima. Kapilarno ispitivanje može se smatrati metodom koja nadopunjava vizualno ispitivanje jer omogućava bolje i kvalitetnije ispitivanje površine. Kapilarna metoda je metoda koja se bazira na ubrizgavanju obojenog fluida koji kapilarno ulazi u kapilare zavarenog spoja te jasno ukazuje na diskontinuitet. Ispitivanje kapilarnom metodom moguće je vršiti gotovo na svim materijalima u slučaju da površina ispitivanja nije porozna ili hrapava. Ispitivanje kapilarnom metodom koristi se za inspekciju materijala kao što su željezo, aluminij, titanijem, bakar, staklo, plastika i razne vrste keramike. [5,6]

#### 3.1. Oprema i način provođenja ispitivanja

Penetranti su sastavni dio kapilarne metode ispitivanja te se kao takvi mogu raspodijeliti u dvije osnovne skupine, penetrante s obzirom na način na koji ih se nanosi i uklanja s površine te s obzirom na način pregleda ispitnog komada.

S obzirom na način na koji ih se nanosi i uklanja s površine ispitivanja dijeli ih se na:

- Vodoisperive penetrante koje se uklanja ispiranjem ili vodom natopljenom spužvom
- Penetrante s naknadnim emulgiranjem gdje se za emulgiranje i uklanjanje koriste posebne tekućine
- Penetrante koje je moguće otkloniti isključivo posebnim otapalom



S obzirom na način na koji se pregledava zavar, penetranti se dijele na:

- Obojene penetrante koji se koriste po dnevnom svjetlu i najčešće su crvene boje.
- Fluorescentne penetrante koji se koriste za pregled UV-lampom te ukazuju na najtanje kapilare koje pod kontrastom možda nisu vidljive na dnevnom svjetlu. [7]

Nadalje, kao što im i samo ime nalaže vidljivi penetranti primjenjuju se za terenska ispitivanja odnosno ispitivanja na kojima je osigurano dnevno svjetlo. Ispitivanje vidljivim penetrantima u boji primjenjuje se kada je potrebno ispitivanje grubih površina. Prilikom ispitivanja vidljivim penetrantima u boji ispitivač raspolaže s više komponenti koje su potrebne kako bi se ispitivanje izvršilo pravilno u više koraka, a set za ispitivanje u pravilu se sastoji od:

- 4 spreja za odstranjivanje viška fluida tj. za čišćenje površine
- 2 tekuća penetranta u spreju
- 2 ne vodena razvijaača u spreju
- Krpe za otklanjanje fluida tj. brisanje



*Slika 3.1. Set za ispitivanje penetrantima u boji [8]*

Penetrante možemo podijeliti u više klasa ovisno o jačini indikacije tj. načinu na koji se oni pojavljuju na ispitnoj površini. Tako vidljive penetrante u boji možemo razvrstati na ultra nisko osjetljive, nisko osjetljive, srednje osjetljive, visoko osjetljive te ultra visoko osjetljive. Nadalje, kod ispitivanje fluorescentnim penetrantima ispitivanje se primjenjuje kod ispitivanja koja zahtijevaju visoku točnost

kako i kvalitetno brzo uočavanje kapilarnih nepravilnosti. Kako se ispitivanje fluorescentnim penetrantima ne vrši na dnevnom svjetlu prilikom ispitivanja potrebno je korištenje UV lampe koja osiguravaju maksimalnu vidljivost fluorescentnog penetranta. Prilikom ispitivanja fluorescentnim penetrantima ispitivač raspolaže s više komponenti koje su potrebne kako bi se ispitivanje izvršilo pravilno u više koraka ,a set za ispitivanje u pravilu se sastoji od:

- 1 UV lampe
- 4 odstranjivača viška fluida u spreju koja se koriste za čišćenje površine
- 2 fluorescentna penetranta
- 2 ne vodena razvijača u spreju
- 1 suhi razvijač u spreju
- Krpa za otklanjanje fluida tj. brisanje



*Slika 3.2. Set za ispitivanje fluorescentnim penetrantima [8]*

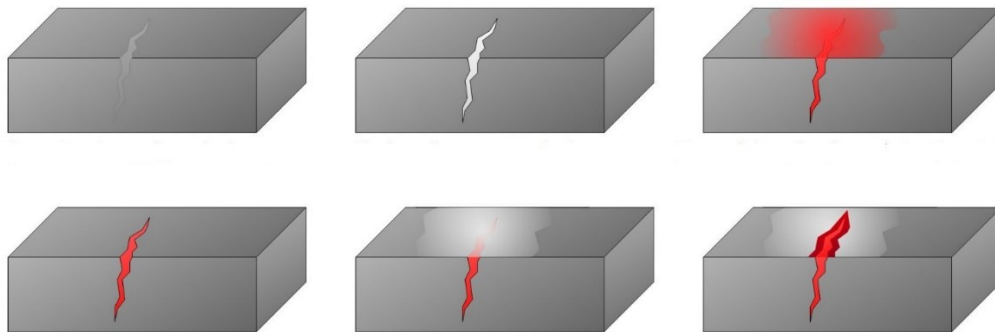
Kao što je već navedeno, primjena UV lampe prilikom ispitivanja fluorescentnim penetrantima od velike je važnosti zato što osigurava osvjetljenje fluorescentnih penetranta odgovarajućom valnom duljinom zbog koje su penetranti fluorescentne boje lako uočljivi. Kako bi fluorescentne čestice bile uočljive, UV lampa mora proizvoditi snop svjetlosti od 125 kandela na udaljenosti od jedne stope. Također lampu je potrebno ugrijati na radnu temperaturu kako bi se ispitivanje izvršilo na očekivanoj kvaliteti. [8]

Nakon što je osigurana sva potrebna oprema za ispitivanje tekućim penetrantima može se pristupiti ispitivanju. Kako bi se ispitivanje izvršilo na očekivanoj razini kvalitete potrebno je pridržavati se određenih koraka ispitivanja.

Postupak inspekcije tekućim penetrantima sastoji se od:

- Pripreme površine. Priprema površine jedan je od najkritičnijih i najbitnijih koraka inspekcije tekućim penetrantima. Površina ne smije sadržavati nikakve tragove ulja, masti, vode ili bilo kakvih drugih kontaminiranih sredstava koji mogu spriječiti penetrant da uđe kapilarno u kapilarne pukotine. Također, ispitni komad može zahtijevati prethodno jetkanje ako su prethodno izvođeni mehanički postupci poput strojne obrade, brušenja ili pjeskarenja. Takve i ostale mehaničke obrade na komadu mogu razmazati metal po otvoru pukotine te tako spriječiti prodiranje penetranta u kapilarne pukotine. Površina se detaljno čisti i priprema za daljnje korake ispitivanja.
- Primjena penetranta. Nakon što je površina temeljito očišćena i osušena, penetrant u spreju nanosi se prskanjem na ispitnu površinu. Također penetrant je moguće nanositi i ostalim tehnikama kao što su četka ili uranjanje ispitnog komada u kupku ispunjenju penetrantom.
- Zadržavanje penetranta. Penetrant se ostavlja na površini dovoljno vremena kako bi se omogućilo što je moguće dublje prodiranje penetranta u kapilarne pukotine tj. širenje penetranta po ispitnoj površini. Vrijeme zadržavanja penetranta je ukupno vrijeme koje je penetrant u kontaktu s površinom ispitivanja. Vrijeme koje je potrebno da penetrant provede na ispitnoj površini preporučuju proizvođači penetranta. Vremena se razlikuju ovisno o načinu primjene, korištenju različitih čestica za penetraciju, ispitnom materijalu, obliku materijala koji se pregledava i karakterističnoj greški koja se ispituje. Minimalno vrijeme zadržavanja penetranta obično se kreće od pet do šezdeset minuta. Vrijeme zadržavanja penetranta ne utječe na kvalitetu ispitivanja odnosno penetrant se ostavlja na ispitnoj površini sve dok se ne osuši.
- Uklanjanje viška penetranta. Uklanjanje viška penetranta s ispitne površine smatra se jako bitnim i utjecajnim korakom ispitivanja. Potrebno je ukloniti višak penetranta s ispitne površine tako da se pritom s kapilarnih pukotina ukloni što je manje moguće penetranta kako bi kasnija analiza pukotina bila što detaljnija i kvalitetnija. Ovisno o korištenoj opremi i načinu nanošenja penetranta ovaj korak može uključivati čišćenje otapalom, vodom ili prvobitno tretiranje ispitnog komada emulgatorom a zatim ispiranje vodom.

- Primjena razvijaača. Nakon ispravnog odrađivanja prethodnih koraka ispitivanja na ispitni komad nanosi se tanak sloj razvijaača kako bi se penetrant zarobljen u kapilarnim pukotinama vratio na površinu gdje će biti jasno vidljiv i jasno indiciran. Razvijaači dolaze u različitim oblicima te se mogu nanositi rasprašivanjem tj. kao suhi prah, uranjanjem ili prskanjem tj. kao mokri razvijaači.
- Razvoj indikacije greške. Razvijaač se smije zadržavati na površini ispitivanja dovoljno dugo da omogući ekstrakciju zarobljenog penetranta iz svih kapilarnih pukotina. Navedeno vrijeme razvijanja obično ne traje duže od deset minuta, dok za duže kapilarne pukotine vrijeme razvijanja može biti i znatno dulje.
- Inspekcija. Inspekcija tj. analiza kapilarnih pukotina tada se izvodi pod adekvatnim osvjetljenjem kako bi se otkrile indikacije bilo kakvih nedostataka koji bi mogli biti prisutni.
- Čišćenje površine. Posljednji korak u procesu ispitivanja je temeljito čišćenje ispitne površine kako bi se uklonio razvijaač s kapilarnih pukotina za koje je utvrđeno da nisu prihvatljive. [8,9]



*Slika 3.3. Ilustrativni prikaz zasebnih koraka ispitivanja tekućim penetrantima*

### **3.2. Područje primjene ispitivanja tekućim penetrantima**

Ispitivanje tekućim penetrantima jedna je od najzastupljenijih metoda ispitivanja u današnjoj industriji, prvobitno zbog brzine provođenja ispitivanja. Ispitivanje tekućim penetrantima koristi se

za ispitivanje površinskih kapilarnih pukotina odnosno svim diskontinuitetima koji su otvoreni prema površini.

Glavna područja primjene ispitivanja tekućim penetrantima su:

- Metalurgija tj. proizvodnja metala
- Avijacija i zrakoplovstvo
- Automobilska industrija
- Naftna i plinska industrija
- Brodogradnja i pomorstvo

Svaka od ovih industrija koristi ispitivanje tekućim penetrantima za otkrivanje površinskih kapilarnih nepravilnosti. Neke od karakterističnih grešaka koje se otkrivaju primjenom ispitivanja penetrantima u različitim industrijama su: pukotine od zamora, pukotine nastale širenjem volumena tijekom hlađenja npr. čelika (eng. quench cracks), pukotine od brušenja materijala, prijelomi od preopterećenja ili udarca, poroznost, diskontinuiteti nastali zavarivanjem na zavarenom šavu (eng. welded seams).

[10]

### **3.3. Prednosti i nedostaci ispitivanje tekućim penetrantima**

Ispitivanje tekućim penetrantima metoda je ispitivanja koja sadrži svoje prednosti i nedostatke na koje je jako bitno obratiti pažnju prilikom odabira metode kojom će se vršiti ispitivanje na ispitnom uzorku.

Prednosti ispitivanja tekućim penetrantima:

- Ispitivanje tekućim penetrantima relativno je laka, brza i ponajviše isplativa metoda ispitivanja površine uzorka
- Tehnika ispitivanja tekućim penetrantima nedestruktivna je metoda tako da se ispitni uzorci ne oštećuju tijekom ispitivanja
- Može se provoditi na različitim vrstama opreme bez obzira na njihov oblik ili veličinu, međutim prilikom testiranja treba obratiti pažnju na volumen opreme koja se koristi za testiranje koja može zahtijevati određena ograničenja za testiranje
- Ispitivanje tekućim penetrantima može se koristiti na širokom rasponu materijala, od metalnih do nemetalnih, magnetskih do nemagnetskih te vodljivih do nevodljivih materijala

- Rezultat, odnosno vizualni prikaz diskontinuiteta prikazan je izravno na površini ispitnog uzorka
- Proces ispitivanja tekućim penetrantima je prikladan, razuman i prenosiv način ispitivanja zbog upotrebe aerosolnih sprejeva
- Indikacije ispitivanja mogu razotkriti relativnu veličinu, dubinu i oblik diskontinuiteta.
- Zaključno, ispitivanje tekućim penetrantima jednostavna je tehnika i uključuje najmanje iskustva ispitivača

Nedostaci ispitivanja tekućim penetrantima:

- Glavni nedostatak ispitivanja tekućim penetrantima je potreba da diskontinuitet mora biti otvoren prema površini, odnosno otkrivanje unutarnjih diskontinuiteta nije moguće navedenim ispitivanjem
- Ispitna površina također utječe na kvalitetu ispitivanja tj. materijali s poroznom površinom ne mogu se ispitivati primjenom tekućih penetranta
- Površina ispitivanja mora biti čista i glatka. Sve nečistoće poput prljavštine, boje, ulja, hrđe ili masti potrebno je ukloniti prije ispitivanja, stoga se može zaključiti da je čišćenje površine od iznimne važnosti kod navedenog ispitivanja
- Ispitivač koji provodi ispitivanje tekućim penetrantima mora imati izravan pristup s površinom koju ispituje
- Metalne mrlje nastale pjeskarenjem ili žičanom četkom potrebno je očistiti prije ispitivanja tekućim penetrantima
- Za provođenje i analizu izvršenog ispitivanja potrebno je pravilno pridržavanje propisanih koraka ispitivanja, stoga je potrebno pravilno rukovanje opremom za ispitivanje
- Pare nastale od prskanja sprejom tijekom ispitivanja mogu biti otrovne i zapaljive, stoga je potrebno osigurati odgovarajuću ventilaciju na ispitnoj jedinici

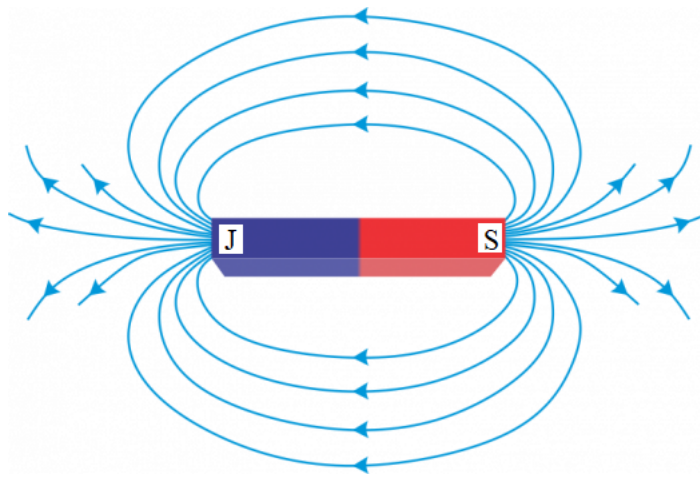
Zaključno, ispitivanje tekućim penetrantima jedna je od najlakših i najpouzdanijih metoda nerazornog ispitivanja koja je primjenjiva na širokom spektru materijala. Ova tehnika ima svoje prednosti i nedostatke, međutim ispitivanje tekućim penetrantima je fleksibilno te ponajviše jeftino ispitivanje i smatra se jednom od najboljih tehnika ispitivanja bez razaranja. [8]

## 4. ISPITIVANJE MAGNETSKIM ČESTICAMA

Ispitivanje magnetskim česticama nerazorna je metoda ispitivanja koja se koristi za prepoznavanje diskontinuiteta na površini feromagnetskih materijala propuštanjem magnetske struje kroz njih. Također se može koristiti za otkrivanje diskontinuiteta neposredno ispod površine materijala. Vrste pukotina koje se mogu otkriti ispitivanjem magnetskim česticama uključuju pukotine, pore, hladne preklope (eng. cold lap), i nedovoljno naljepljivanje. Ispitivanje magnetskim česticama vrši se tako da se kroz materijal koji se pregledava pušta magnetska struja. Kada se struja koja prolazi kroz ispitni komad prekine neželjenim diskontinuitetom, magnetizam se širi od te točke ukazujući na prisutnost diskontinuiteta. Magnetsko ispitivanje jedna je od najčešće korištenih metoda ispitivanja bez razaranja pretežno zbog svoje brzine i jednostavnosti ispitivanja. Međutim, ispitivanje magnetskim česticama može se vršiti samo na materijalima koji se mogu magnetizirati. Takve materijale naziva se feromagnetnim materijalima, pa je ispitivanje magnetskim česticama dosta ograničeno. Neki primjeri feromagnetskih materijala uključuju čelik, kobalt, željezo, i nikal. [11]

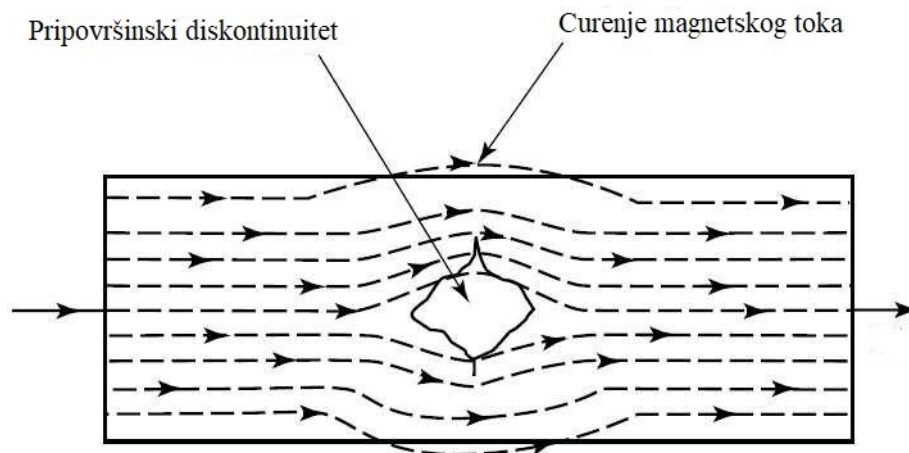
### 4.1. Osnovni principi magnetizma i ispitivanja magnetskim česticama

U teoriji ispitivanje magnetskim česticama smatra se relativno jednostavnim konceptom ispitivanja. Može se smatrati kombinacijom dvije metode nedestruktivnog ispitivanja, tj. ispitivanje curenja magnetskog toka i vizualne metode. Kada se promatra slučaj ravnog kvadratnog magneta, magnetsko polje nalazi se unutar i oko magneta. Točke u kojima magnetske silnice izlaze ili ulaze u magnet nazivamo polovima. Pol na kojem magnetske silnice izlaze iz magneta nazivamo sjevernim polom, dok pol na kojem magnetske silnice ulaze u magnet nazivamo južnim polom.



Slika 4.1. Prikaz orijentacije magnetskog polja

Kada se ravni kvadratni magnet prelomi u središtu svoje duljine, dobit će se dva ravna kvadratna magneta s magnetskim polovima na svakom kraju svog dijela. Ako je magnet samo napuknut ali nije u potpunosti prelomljen na dva dijela, na svakom rubu pukotine formirat će se sjeverni i južni pol. Iz toga se može zaključiti da ako u materijalu postoji pukotina, linije magnetskog toka moraju zaobići pukotinu zbog pucanja silnica magnetskog toka. Magnetsko polje se širi kada naiđe na mali zračni raspor stvoren pukotinom jer zrak ne može podnijeti toliko magnetskog polja po jedinici volumena kao što magnet može. Kada se navedeno polje proširi zbog prisustva pukotine dobiva se dojam curenja magnetskog toka, a takvo polje se naziva poljem curenja magnetskog toka.

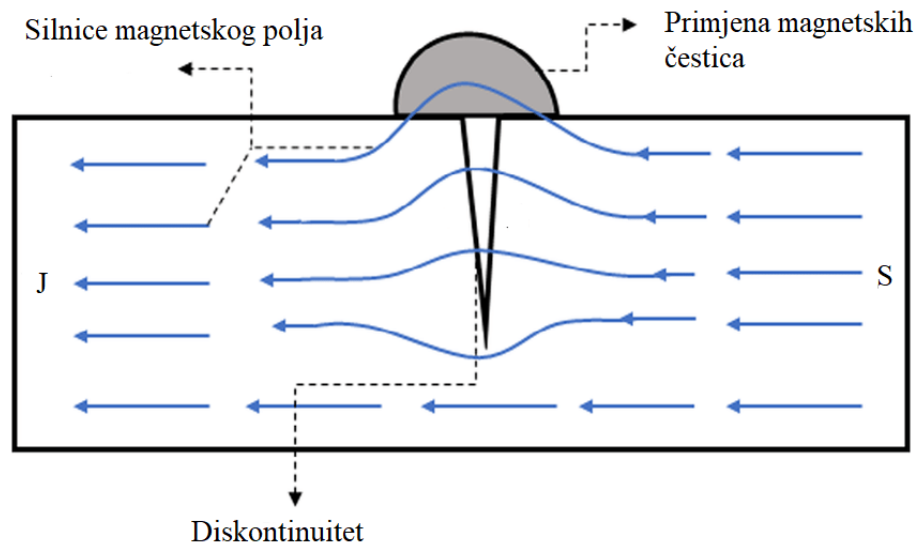


Slika 4.2. Prikaz utjecaja diskontinuiteta na curenje magnetskog toka



Ako se čestice željeza posipaju po napuknutom magnetu, čestice će se privući i grupirati ne samo na polovima ispitnog komada već i na polovima rubova pukotine. Glavni razlog korištenja magnetskih čestica prilikom ispitivanja je mogućnost puno lakšeg identificiranja magnetskih čestica za razliku od stvarnih diskontinuiteta.

Prvi korak u ispitivanju magnetskim česticama je magnetiziranje ispitnog komada. Ako su na ispitnom komadu prisutni bilo kakvi diskontinuiteti na samoj površini ili u neposrednoj blizini površine, oni će stvoriti curenje magnetskog polja. Nakon što je ispitni komad magnetiziran, čestice željeza, bilo u suhom ili u mokrom obliku nanose se na površinu magnetiziranog dijela. Željezne čestice će se međusobno privući i grupirati na poljima propuštanja magnetskog toka, stvarajući tako vidljivu indikaciju diskontinuiteta koju ispitivač može jasno uočiti. [8,12]

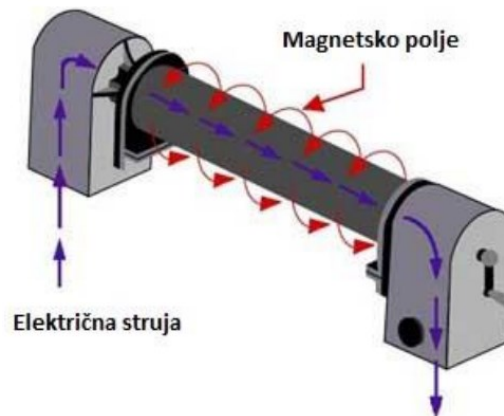


Slika 4.3. Primjena magnetskih čestica na magnetizirani ispitni komad

#### 4.2. Načini magnetiziranja feromagnetnih materijala

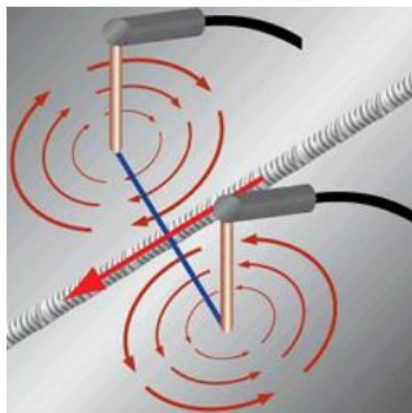
Postoje razne metode magnetiziranja koje se može koristiti kako bi se uspostavilo magnetsko polje u ispitnim uzorcima. Procesi magnetizacije ispitnih uzoraka dijele se na direktne i indirektno načine magnetiziranja uzoraka. Kod direktne magnetizacije struja se provodi direktno kroz ispitni uzorak. Tok struje uzrokuje stvaranje kružnog magnetskog polja unutar i izvan vodiča struje. Kada se koristi direktna metoda magnetizacije, potrebno je osigurati i održati pravilan električni kontakt između

opreme za ispitivanje i ispitnog komada kako bi se spriječilo uništavanje istog. To se dešava zbog pregrijavanja u točkama visokog otpora. Postoji nekoliko različitih načina na koje se direktno može magnetizirati ispitni uzorak. Jedan od načina uključuje metodu (eng. „head shot“) tj. stezanje ispitnog uzorka između dva električna kontakta. Nakon što je komad pravilno montiran između dva električna kontakta kroz ispitni uzorak se pušta struja i stvara se kružno magnetsko polje u i oko ispitnog komada. Nakon gašenja izvora magnetske struje, u ispitnom komadu se javlja zaostalo magnetsko polje. Jačina magnetskog polja proporcionalna je količini struje koja se pušta kroz komad.



Slika 4.4. „Head shot“ metoda direktnog magnetiziranja ispitnog uzorka [8]

Sljedeća najzastupljenija metoda direktne magnetizacije je primjena stezaljki ili ručnih elektroda. Na mjestu kontakta elektroda i ispitnog uzorka formira se kružno magnetsko polje gdje svako mjesto kontakta elektrode i ispitnog uzorka čini jedan pol. Tako se formira magnetsko polje koje okružuje ispitno mjesto zavara.

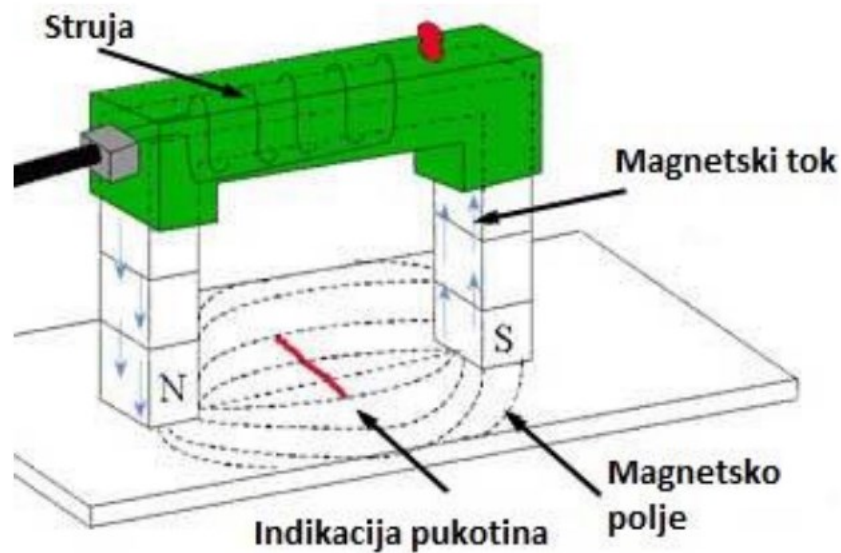


Slika 4.5. Uspostavljanje magnetskog polja pomoću ručnih elektroda

Za razliku od direktne magnetizacije gdje se direktno dovodi struja na ispitni uzorak i time stvara magnetsko polje, kod indirektna magnetizacije kako bi se ostvarilo magnetsko polje unutar ispitnog komada koristi se jako vanjsko magnetsko polje. Neki od tipičnih načina za indirektnu magnetizaciju su: upotreba trajnih magneta, upotreba elektromagnetskog jarma, upotreba središnjeg vodiča i upotreba zavojnice.

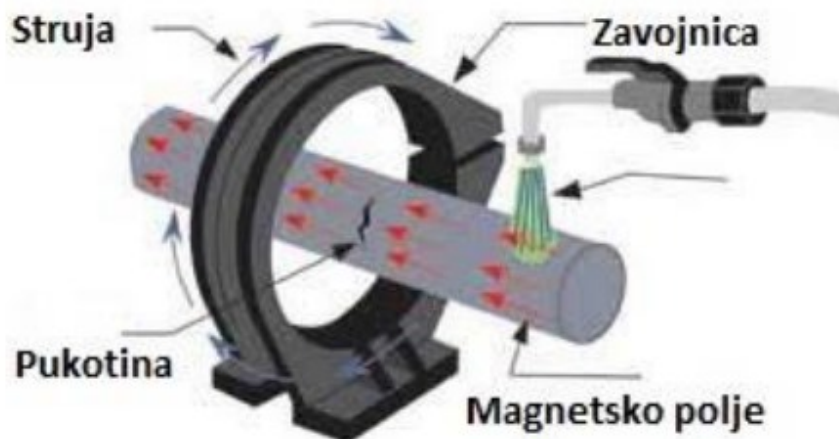
Korištenje trajnih magneta jako je jednostavna i jeftina metoda indirektnog uspostavljanja magnetskog polja ali zbog svoje nemogućnosti da se kontrolira jačina magnetskog polja jako se rijetko koristi. Također jedan od problema javlja se zbog jako teškog odvajanja trajnih magneta s ispitnih uzoraka.

Nadalje, mogu se koristiti i elektromagnetski jarmovi koji su istog oblika kao i jarmovi s trajnim magnetom o kojima je rečeno nešto u poglavlju ispred. Elektromagnetski jarmovi su magneti u obliku slova U od mekog željeza sa zavojnicom omotanom oko baze u slovo U. Pokretanjem električne struje kroz zavojnicu stvaraju se sjeverni i južni pol na krajevima svake strane magneta. Zbog toga se elektromagnetski jarmovi u modernom žargonu uspoređuje s potkovom. Elektromagnetski jarmovi za direktnu magnetizaciju imaju neke prednosti u odnosu na jarmove s trajnim magnetima. Moguće je mijenjati jakost polja korištenjem različitih intenziteta struje. Također uporabom elektromagnetskog jarma olakšana je montaža na ispitni komad kao i demontaža budući da polje ne postoji dok je jaram ugašen. Za razliku od trajnih magneta, kod magnetizacije jarmom ili zavojnicom može se podešavati jakost struje. Kvaliteta testiranja ne ovisi samo o količini struje, već i o omjeru površine poprečnog presjeka ispitnog dijela i površine zavojnice u koju se ispitni komad umeće. Omjer se naziva faktorom popunjenja i preporučuje se da ne prelazi 10 %. Također kod primjene ispitivanja zavojnicom važno je obratiti pažnju na duljinu zavojnice u odnosu na duljinu dijela. Prilikom testiranja ispitnog komada može se očekivati samo jedno usmjerenje diskontinuiteta, no može se očekivati i druga usmjerenja. Učinkovitost ispitivanja magnetskim česticama obično uključuje testiranje u više od jednog smjera. Ispitivanje zavara uz pomoć elektromagnetskog jarma obično se izvodi korištenjem „X“ ukrštenog smjera prolaza jarmom odnosno u dva smjera pod pravim kutem jedan prema drugom.



Slika 4.6. Magnetizacija uporabom elektromagnetskog jarma [8]

Drugom najzastupljenijom metodom indirektna magnetizacije smatra se primjena zavojnice o kojoj je nešto osnovno rečeno u prethodnom poglavlju. Magnetsko ispitivanje zavojnicom vrši se na komadima kojima je dijametar manji od ukupne duljine ispitnog komada odnosno omogućeno je stvaranje uzdužnog magnetskog polja provlačenjem ispitnog komada kroz zavojnicu. Ispitni komad provlači se uzdužno kroz zavojnicu kroz koju je prethodno puštena električna struja što rezultira stvaranjem magnetskog polja. [8,13]



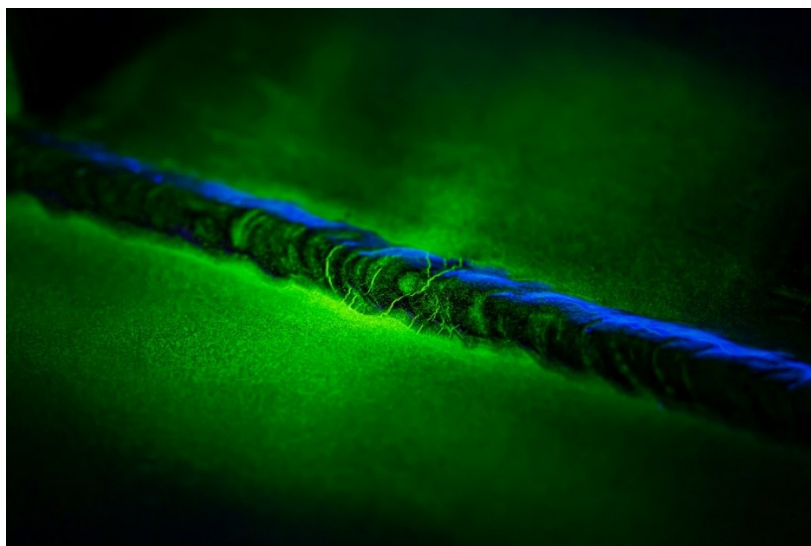
Slika 4.7. Magnetizacija ispitnog komada primjenom zavojnice [8]

### 4.3. Čestice za magnetsko ispitivanje

Odabir i vrsta magnetskih čestica kod nerazornog magnetskog ispitivanja od velike su važnosti ponajviše jer formiraju indikaciju diskontinuiteta. Magnetske čestice nanose se na ispitnu površinu u obliku sitnih čestica željeza ili željeznog oksida. Odabir boje čestica ponajviše je vezan za ispitnu površinu na kojoj je potrebno postići kontrast između čestica i površine. Metal koji se koristi za izradu čestica ima visoku magnetsku propusnost i nisku sposobnost zadržavanja. Visoka magnetska propusnost od velike je važnosti zato što omogućava magnetskim česticama da se lako skupljaju i oko najmanjih polja curenja magnetskog toka a samim time ukazuju i na najmanje greške kao što su pukotine. Niska sposobnost zadržavanja magnetskih čestica bitna je zato što same čestice nikad ne postaju jako magnetizirane pa se ne lijepe jedna za drugu ili za ispitnu površinu. Magnetske čestice se u osnovi dijele na mokre i suhe čestice o čemu će se nešto više reći u narednim poglavljima.

Suhe magnetske čestice dolaze u raznim prepoznatljivim bojama. Neke od najčešće korištenih boja za suhe magnetske česticu su crvena, žuta, siva, crna ili bilo koja boja koja dobro zadovoljava kontrast s ispitivanom površinom. Osim odabira boje suhih magnetskih čestica za ispitivanje od velike je važnosti i odabir veličine. Suhe magnetske čestice dolaze u raznim veličinama. Red veličine finih suhih magnetskih čestica seže od promjera oko 50  $\mu\text{m}$ , dok za grube suhe čestice promjer seže do 150  $\mu\text{m}$ . Fine suhe čestice više od dvadeset puta su svjetlije od grubih suhih čestica. Zbog svojeg manjeg promjera fine suhe čestice puno su osjetljivije na curenja magnetskog polja kod jako malih diskontinuiteta. Iako fine suhe bolje zadovoljavaju kvalitetu ispitivanja, u nekim slučajevima koristit će se grube čestice kako bi se bolje ispitalo grublje diskontinuitete i smanjilo utjecaj praha na kvalitetu ispitivanja. Fine suhe čestice lako prijanjaju na površine koje sadrže nečistoće poput zaostala prljavština ili vlaga, odnosno moguće je postizanje određene kvalitete ispitivanja sukladno navedenim nečistoćama. Također, ponovna uporaba suhih magnetskih čestica nije preporučljiva jer se navedenim smanjuje osjetljivost pregleda površine. Na kvalitetu ispitivanja magnetskim česticama može se utjecati i oblikom suhih magnetskih čestica. Istraživanja su pokazala da ako se suhi prah sastoji samo od dugih vitkih čestica, postupak nanošenja magnetskih čestica nije zadovoljavajuć. Duge vitke čestice nemaju sposobnost slobodnog protoka i formiranja željeznog oblaka čestica koje plutaju po ispitnoj površini. Stoga se u smjesu magnetskih čestica dodaju kuglaste čestice koje su puno kraće od vitkih čestica. Rezultat miješanja dugih vitkih čestica i kugličastih čestica je idealni suhi prah koji dobro teče po površini i održava dobro kvalitetu ispitivanja.

Mokre magnetske čestice za razliku od suhих dolaze u mokroj suspenziji. Mokra suspenzija može sadržavati vodu ili ulje. Za razliku od ispitivanja suhim magnetskim česticama, ispitivanje mokrim česticama puno je osjetljivije od suhog jer navedena suspenzija daje magnetskim česticama puno veću pokretljivost po ispitnoj površini. Također ispitivanje mokrim česticama omogućuje upotrebu promjerom manjih čestica jer se eliminira prašina koja se javlja kod ispitivanja suhim česticama. Ispitivanjem mokrim česticama ispitivač je u mogućnosti nanijeti magnetske čestice na relativno veće područje površine ispitivanja nego kod suhog. Mokre magnetske čestice dolaze u raznim prepoznatljivim bojama. Najčešće primjenjiva boja mokrih magnetskih čestica je fluorescentna dok nefluorescentne čestice dolaze u smeđoj ili crnoj boji i izrađene su od feromagnetskih željeznih oksida. Fluorescentne čestice obložene su pigmentima koji fluoresciraju kada ih se izlaže ultraljubičastom svjetlu. Mokre magnetske čestice sitnije su od suhих magnetskih čestica i u teoriji ne prelaze promjerom 10  $\mu\text{m}$ . Korištenje ovako malih čestica nije poželjno jer su čestice pre sitne da bi se istaložile iz suspenzije ali zbog zaostalog magnetizma u česticama, čestice oksida se talože i odvajaju iz suspenzije puno brže od magnetskih čestica te tako magnetske čestice prijanjaju dobro uz ispitnu površinu. Kao što je navedeno mokre magnetske čestice dolaze u vodenoj ili uljnoj suspenziji. Magnetske čestice na bazi vode stvaraju brže indikacije, općenito su jeftinije, predstavljaju malu ili nikakvu opasnost od požara, ne ispuštaju petrokemijske pare i lako se čiste. Magnetske čestice u vodenoj suspenziji sadrže u sebi vodeni inhibitor čime pružaju zaštitu od korozije. Ipak magnetske čestice u uljnoj suspenziji nude najbolju zaštitu od korozije. [14]



*Slika 4.8. Ispitivanje mokrim magnetskim česticama osvjetljavanjem UV lampom, prikaz pukotina*

#### 4.4. Demagnetizacija materijala

Demagnetizacija materijala vrši se kada je u ispitnom materijalu zastupljen zaostali magnetizam. Demagnetizacija materijala bitan je korak u NDT-u primjenom magnetskih čestica ponajviše kako bi se osiguralo da ispitni uzorci nemaju zaostali magnetizam po završetku proces ispitivanja. Nakon što se izvrši proces magnetizacije ispitnog uzorka i pregled površine, provodi se demagnetizacija kako bi se spriječila prisutnost zaostalih magnetizama koja bi mogla negativno utjecati na buduće ispitivanje tj. otkrivanje neželjenih diskontinuiteta. Glavni razlog zašto se ispitni uzorci izlažu demagnetizaciji jest smanjenje tj. potpuna eliminacija zaostalih magnetizama. Taj proces vrši se kako bi se izbjegla privlačenja neželjenih magnetskih čestica ili magnetskih polja prilikom ispitivanja materijala. Postoje razni načini na koje se može demagnetizirati ispitni materijal, a neke od najzastupljenijih metoda demagnetizacije su procesi potpune demagnetizacije, demagnetizacija uzorka uz pomoć rotacije i primjena visokofrekventnog polja. Potpuna demagnetizacija uzorka uključuje potpuno smanjenje magnetskog polja varijacijom struje koja prolazi kroz ispitni uzorak tj. postupnog smanjenja izvora struje dok se magnetsko polje u potpunosti ne neutralizira. Rotacija uzorka uključuje rotiranje uzorka unutar magnetskog polja čime se smanjuje magnetska indukcija. Ova metoda demagnetizacije koristi se za demagnetizaciju uzoraka s nepravilnim oblikom ili složenim geometrijama. Prilikom visokofrekventne demagnetizacije koristi se visokofrekventno magnetsko polje koje se postavlja oko uzorka kako bi se neutraliziralo zaostali magnetizam. Pravilno rukovanje navedenim metodama demagnetizacije ključno je kako bi se osiguralo da magnetske čestice ne ometaju buduća ispitivanja. Nepravilno provedena demagnetizacija može rezultirati nepouzdanim rezultatima ispitivanja. [15]

Demagnetizacija se obično provodi kada:

- zaostala magnetska polja mogu utjecati na naredne zahvate na ispitnom komadu kao što je zavarivanje. Jako magnetsko polje na ispitnom komadu može otpuhati naneseni materijal za zavarivanje te tako oštetiti strojnu opremu prilikom obrade.
- talog koji nastaje nakupljanjem magnetskih čestica može uzorkovati trošenje.
- zaostali magnetizmi mogu utjecati na proces čišćenja površine ispitnog uzorka i smanjiti kvalitetu ispitivanja.
- ispitni uzorak biva izložen manjoj magnetskoj sili nego što je bio izložen u prethodnom ispitivanju.
- postoje propisani valjani standardi

Demagnetizacija se ne provodi kada:

- je materijal od koje je napravljen ispitni uzorak željezo ili meki čelik kod kojeg je pojava zaostalih magnetizama mala unatoč slabijoj magnetizaciji materijala.
- je potrebna toplinska obrada ispitnog uzorka nakon ispitivanja magnetskim česticama
- se radi o zavarima, odljevcima ili željezu kod kojeg je pojava zaostalih magnetizama rijetka.
- se ispitni uzorak izlaže ponovnoj magnetizaciji u suprotnom smjeru na istoj ili izvorno jačoj struji.

#### 4.5. Koraci prilikom izvođenja ispitivanja magnetskim česticama

Koraci u izvođenju ispitivanja suhim magnetskim česticama:

- Priprema površine dijela. Površina bi trebala biti relativno čista ali za razliku od ispitivanja tekućim penetrantima nije potrebno toliko detaljno čišćenje površine. Površinu je potrebno očistiti od masnoća, ulja ili ostalih fluida koji mogu spriječiti magnetske čestice da se slobodno kreću. Ostavljanjem tankog sloja bolje, hrđe ili kamenca smanjit će se osjetljivost testa ali u dozvoljenim količinama neće utjecati na kvalitetu ispitivanja. Najčešće se dopušta do 0,0076 mm nevodljivog premaza kao što je boja te maksimalno 0,025 mm feromagnetskog premaza kao što je nikal. Ostale površinske nečistoće kao prljavština, boja, hrđa ili kamenac moraju biti uklonjene.
- Primjenjivanje sile magnetiziranja korištenjem trajnih magneta kao što su elektromagnetski jaram, ručne elektrode ili zavojnica za uspostavljanje potrebnog magnetskog toka.
- Primjena praha s magnetskim česticama na ispitnu površinu.
- Nježno otpuhivanje viška praha. Uz primjenjivanje sile magnetiziranja, uklanjanje viška praška s ispitne površine pomoću pažljivog zračnog ispuhivanja. Jačina zračnog ispuhivanja mora biti dovoljno jaka da ukloni višak magnetskih čestica ali ne dovoljno jaka da otpuše magnetske čestice koje ukazuju na curenje magnetskog toka.
- Prekidanje sile magnetiziranja. Ako se magnetski tok uspostavlja pomoću elektromagneta ili elektromagnetskog polja, silu magnetiziranja potrebno je prekinuti. Ako se prilikom magnetizacije koriste trajni magneti može ih se ostaviti na mjestu ispitivanja.
- Pregled i analiza. Pregledavanje ispitne površine i uočavanje mogućih diskontinuiteta na mjestima curenja magnetskog toka.



Koraci u izvođenju ispitivanja mokrim magnetskim česticama:

- Priprema površine dijela. Kao i kod ispitivanja suhim magnetskim česticama, potrebno je da površina ispitne površine bude relativno čista. Površinu je potrebno očistiti od masnoća, ulja ili drugih fluida koji mogu spriječiti suspenziju da natopi površinu i onemogući magnetskim česticama slobodno kretanje. Kako i prije navedeno kod suhih čestica, dozvoljava se određena količina zadržavanja nevodljivog premaza ili feromagnetskih premaza. Također potrebno je uklanjanje svih oblika prljavštine, boje, korozije ili kamenca.
- Nanošenje suspenzije. Suspenzija se pažljivo raspršuje ili natapa po ispitnoj površini. U pravilu tok suspenzije po ispitnoj površini se proširi neposredno prije primjene polja magnetiziranja.
- Primjena sile magnetiziranja. Silu magnetiziranja potrebno je primijeniti neposredno poslije nanošenja suspenzije magnetskih čestica. Pri korištenju mokre horizontalne inspeksijske jedinice, tok struje se primjenjuje u dva ili tri kratka perioda ( po pola sekunde) čime se pomaže u poboljšanju pokretljivosti magnetskih čestica.
- Pregled i analiza. Pregledom ispitnog uzorka, pretražuje se područja grupiranih magnetskih čestica. Površinski diskontinuiteti proizvesti će oštre indikacije kao što je vidljivo na slici 4.8. Indikacije iz podzemnih pukotina bit će slabije definirane i gubit će definiciju kako se dubina pukotine povećava. [8,15]

#### 4.6. Područja primjene ispitivanja magnetskim česticama

NDT magnetskim česticama metoda je ispitivanja koja se pretežno koristi za otkrivanje pukotina na površini feromagnetskih materijala izlaganjem magnetskom polju tj. magnetizaciji i nanošenjem magnetskih čestica na ispitnu površinu. Tako magnetsko ispitivanje ima široku primjenu u različitim industrijama. Glavni razlog primjene ispitivanja magnetskih čestica je otkrivanje i najmanjih površinskih nepravilnosti. Neka od najvažnijih područja primjene magnetskih čestica za otkrivanje površinskih nedostataka su:

- Primjena ispitivanja magnetskim česticama u industriji nafte i plina za otkrivanje površinskih pukotina ili korozije i ostalih površinskih nedostataka. Karakteristične komponente u plinskoj i naftnoj industriji na kojima se koristi ispitivanje magnetskim česticama su spremnici ili

cjevovodi. Pravovremena i kvalitetna otkrivanja površinskih diskontinuiteta ključna su za osiguranje sigurnosti i integriteta infrastrukture naftne i plinske industrije.

- Kao i kod naftne i plinske industrije ispitivanje magnetskim česticama u automobilskoj industriji koristi se pretežno za otkrivanje pukotina. Osnovne komponente na kojima je navedena metoda ispitivanja primjenjiva su osovine, kočnice, kotači ili karoserija automobila.
- U području metalne industrije i proizvodnje najčešće dolazi do otkrivanja pukotina ili nepravilnosti na zavarenim spojevima. Primjena ispitivanja magnetskim česticama ključna je za osiguranje kvalitete ispitivanja i integriteta zavarenih spojeva u raznim industrijama koje uključuju proizvodnju, konstrukcije ili transport.

Neke od ostalih industrija u kojima je primjenjiva metoda ispitivanja magnetskim česticama su: avijacija, proizvodnja energije, brodogradnja i rafinerija. Navedene industrije su osnovne grane u kojima se primjenjuje metoda ispitivanja magnetskim česticama a ponajviše kako bi se osigurala sigurnost, kvaliteta te funkcionalnost materijala i komponenti. Glavni razlog primjene ispitivanja magnetskim česticama u većini industrija je pouzdanost u otkrivanju diskontinuiteta kao i ispitivanje bez oštećivanja ispitnih objekata. [16]

#### **4.7. Prednosti i nedostaci ispitivanja magnetskim česticama**

Osnovne prednosti ispitivanja magnetskim česticama u uspoređi sa ostalim metodama su:

- Mogućnost otkrivanja i najmanjih diskontinuiteta
- Nisko ograničenje vrsti materijala koji se mogu podvrgnuti ispitivanju. Moguće ispitivanje metala i nemetala, magnetskih i nemagnetskih kao i vodljivih i nevodljivih materijala.
- Brza inspekcija velikih površina i volumena
- Prikladnija za ispitivanje dijelova složenijeg oblika.
- Indikacije diskontinuiteta stvaraju se izravno na ispitnoj površini i predstavljaju direktan vizuelni prikaz greške.
- Prijenosna metoda ispitivanja. Magnetske čestice dolaze u obliku aerosolnog spreja te su primjenjive za ispitivanje van kontrolnih jedinica.
- Niska cijena. Materijali i oprema za ispitivanje magnetskim česticama relativno su jeftini.

Osnovni nedostaci ispitivanja magnetskim česticama u uspoređbi sa ostalim metodama su:

- Moguće otkrivanje samo površinskih diskontinuiteta
- Moguće ispitivanje samo materijala s relativno neporoznom površinom
- Čišćenje površine ispitivanja od velike je važnosti jer površinske nečistoće mogu prikriti površinske nedostatke. Metalne mrlje nastale strojnom obradom, brušenjem ili pjeskarenjem potrebno je ukloniti.
- Ispitivač mora imati izravan kontakt sa ispitnom površinom.
- Površinska obrada i hrapavost površine mogu imati utjecaj na osjetljivost pregleda.
- Potreba je kontrola i izvođenje višestrukih ispitnih operacija.
- Potrebno je naknadno čišćenje ispitnih površina i ispitne opreme.
- Potrebno je odgovorno rukovanje ispitnim kemikalijama, aerosolima kao i pravilno zbrinjavanje ispitne površine. [17]

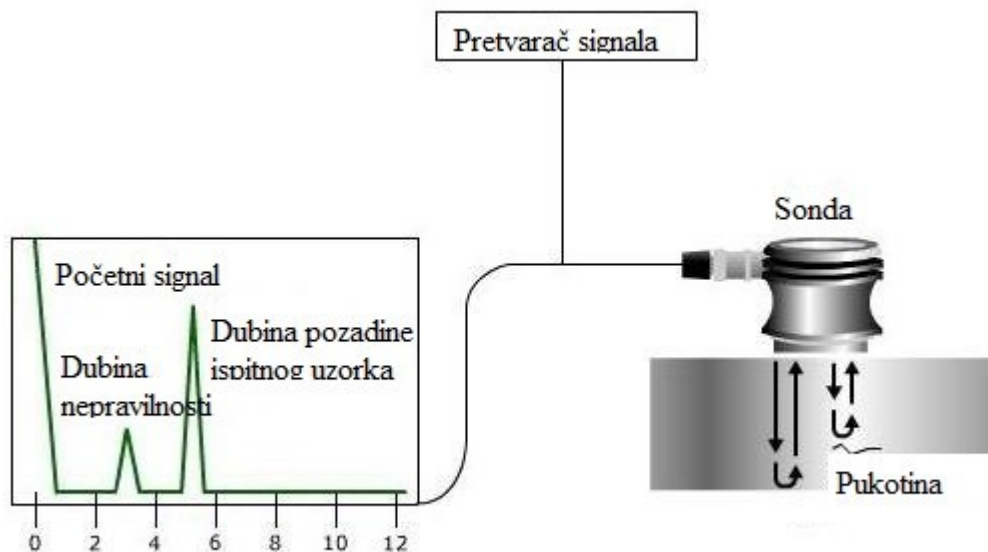
## 5. ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE

Princip ultrazvučnog ispitivanja služi kao postupak nerazornog ispitivanja koji se intenzivno koristi u suvremenoj industriji. Postoje mnoge prednosti ultrazvučnog ispitivanja koje se koriste za detaljno otkrivanje diskontinuiteta materijala. Da bi se ispitalo materijal i identificirale greške, visokofrekventni šumovi poznatiji kao ultrazvučni valovi šalju se kroz predmet ili materijal. U karakterističnim ultrazvučnim ispitivanjima, kratki ultrazvučni pulsni valovi sa središnjom frekvencijom u rasponu od 0,1 do 15 MHz, povremeno do 50 MHz, isporučuju se u materijale za karakterizaciju i identifikaciju unutarnjih grešaka. Ultrazvučno ispitivanje koristi se za dubinsku procjenu unutarnjih grešaka u ispitnom materijalu bez oštećivanja ispitnog uzroka zbog čega se smatra jednom od najvažnijih metoda nerazornog ispitivanja. Kratki ultrazvučni valovi sa navedenom frekvencijom reflektiraju se od dubinskih nepravilnosti te se kao takvi analiziraju preko ispitnih instrumenata, čime se dobivaju detaljni i dubinski detalji o stanju zavara. Karakteristične greške koje se otkrivaju ultrazvučnim ispitivanjem su: pukotine, razne nepravilnosti u zavarenom spoju poput poroznosti ili inkluzija, nepotpuno prodiranje, zavareni spojevi s udubljenjem ili oksidacija i korozija. [8]

### 5.1. Princip rada ultrazvučnog ispitivanja

Ultrazvučno ispitivanje polazi od nekoliko sastavnih elemenata kako bi se ispitivanje izvršilo kvalitetno. Kod ultrazvučno nerazornog ispitivanja sonda kao dio opreme spaja se prijenosom žicom na ultrazvučni uređaj. Sonda se u pravilu odvaja od ispitne površine kontaktnim medijom koji predstavlja spojnu tvar. Na prethodno pripremljenu površinu ispitivanja kontaktnim medijom, prislanja se sonda i šalju se valovi zvuka velike frekvencije kroz sondu na ispitni uzorak. Visoko frekventni valovi zvuka putovat će kroz ispitni uzorak toliko dugo dok ne naiđu na medij tj. materijal koji se razlikuje od početnog. Tada se valovi kao takvi reflektiraju nazad na površinu ispitnog uzorka tj. do ispitne sonde. Refleksija valova očitava se kao slika valova na ultrazvučnom uređaju spojenom na ispitnu sondu i kao takva se analiza i određuje se debljina ispitnog uzorka, otkrivaju se pukotine ili bilo kakvi skriveni dubinski nedostaci. Nerazorno ultrazvučno ispitivanje razlikuje dvije osnovne skupine prihvaćanja visoko frekventnog vala, putem prigušenja i refleksije. Kod prihvaćanja visoko frekventnog vala refleksijom tj. odjekom pulsa, sonda šalje zvučni val te ga ujedno i prima od

dubinske nepravilnosti. Refleksija zvučnog vala dolazi od kraja poslanog signala te je potrebno iskustvo ispitivača pa procijeni radi li se o dubinskoj nepravilnosti ili stražnjoj strani ispitnog objekta. Ponašanje visoko frekventnih valova kroz ispitni uzorak prikazuje se na prethodno navedenom ultrazvučnom uređaju u obliku amplitude koja se sastoji od intenziteta refleksije i udaljenosti odnosno vremena potrebnom za refleksiju. Prihvatanje visoko frekventnog vala putem prigušenja tj. prijenosa valova zasniva se na principu slanja ultrazvučnih valova od odašiljača kroz jednu površinu. Val koji prolazi samo kroz jednu površinu detektira se na zasebnom prijemu u obliku količine valova koja je dosegnuta na drugoj površini nakon putovanja kroz ispitni uzorak. Bilo kakve nesavršenosti u prostoru između odašiljača i prijavnika smanjuju količinu emitiranog zvuka, otkrivajući tako njihovu prisutnost. [18]



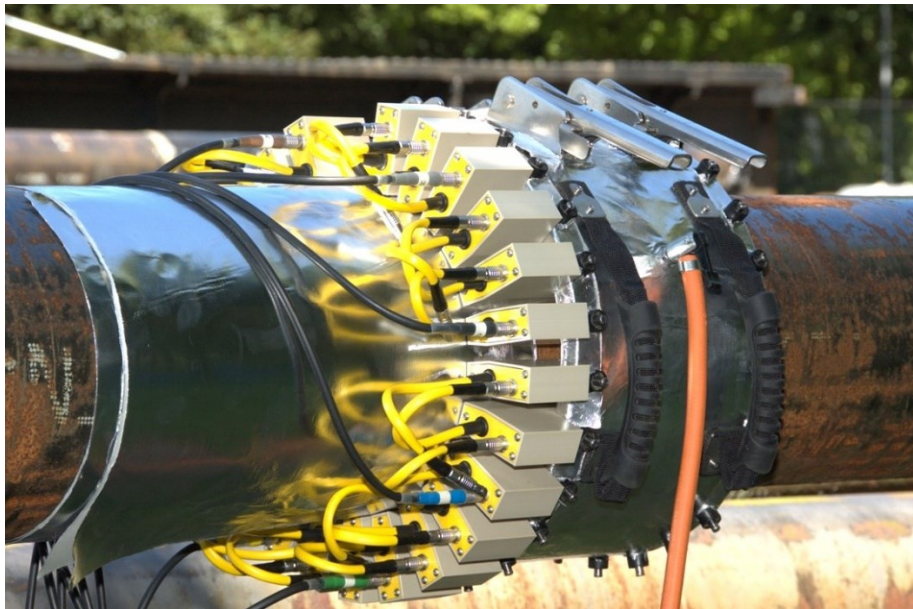
Slika 5.1. Princip rada ultrazvučnog sustava (sonda i ultrazvuk)

## 5.2. Metode ultrazvučnog ispitivanja

Konvencionalno ultrazvučno ispitivanje UT. Konvencionalno ultrazvučno ispitivanje ili kraticom UT koristi jedan kontaktni visokofrekventni val koji se šalje na ispitivanu površinu ili sustav od dva elementa tj. sonda i ultrazvučni uređaj koji prikazuje amplitudni signal koji prolazi kroz ispitivanu površinu. Konvencionalne UT metode uključuju više osnovnih programa, manju obuku ispitivača kao i manje zahtjeve za iskustvom od naprednijih UT metoda.

Ultrazvučno ispitivanje s faznim nizom PAUT, poznato i kao UT s faznim nizom, napredna je tehnika pregleda bez razaranja koja koristi skup sonde za ultrazvučno ispitivanje sastavljenih od brojnih manjih elemenata. Svaka od navedenih sonde pulsira pojedinačno s računalno izračunatim vremenom kako bi se stvorio fazni aspekt procesa, dok se niz odnosi na višestruke elemente koji čine PAUT sustav. Zraka sonde s faznim nizom može se fokusirati na mjesto koje je potrebno ispitati i elektronički pomicati po ispitnom komadu bez pomicanja same sonde. Ovaj način ispitivanja sondama razlikuje ovu metodu od ispitivanja jednoelementnim sondama također poznate kao monolitne sonde. Konvencionalne sonde potrebno je fizički pomicati ili okretati kako bi pokrile veća područja ispitivanja, što iz prethodno objašnjenog kod PAUT metode nije potrebno. Sposobnost ponovnog testiranja te usporedbe s prethodno dobivenim rezultatima čini ovu metodu pouzdanom tj. osigurava točnost pregleda i visoku kvalitetu.

Ultrazvučno ispitivanje velikih dometa LRUT je napredna metoda ispitivanja bez razaranja koja je razvijena za ispitivanje velikih količina materijala s jedne ispitne točke. Ono po čemu se ova metoda razlikuje od tradicionalnih metoda ultrazvučnog ispitivanja je mogućnost ispitivanja bez tekućeg kondenzata između ispitne sonde i površine ispitivanja. Iz tog razloga LRUT je jedna od najbržih inspekcijskih metoda za provođenje ispitivanja cjevovoda na kojima postoji mogućnost javljanja korozije i drugih mehanizama oštećenja. LRUT se izvodi pomoću sustava od nisko frekventnih detektora grešaka, jedinice prijemnika signala, prstenova sonde i prijenosnih računala koja sadrže softver za upravljanje sustavom. Za početak, prstenovi pretvarača fiksirani su oko cijevi kroz koju će se puštati niz nisko frekventnih valova. Ravnomjerni razmak ultrazvučnih sonde po obodu cijevi omogućuje simetrično širenje vođenih valova duž osi cijevi pružajući pravilnu potporu te sto postotnu pokrivenost stijenke cijevi koja se ispituje. Nakon propuštanja nisko frekventnih valova kroz cijev, valovi se reflektiraju natrag do sonde kad god naiđu na bilo kakvu promjenu debljine stijenke. Tako se pravovremeno otkrivaju neželjena stanja kao što su korozija, gubitak metala ili bilo kakvi diskontinuiteti. [19]



*Slika 5.2. Prikaz montaže sastavnih komponenti LRUT-a na ispitnoj cijevi*

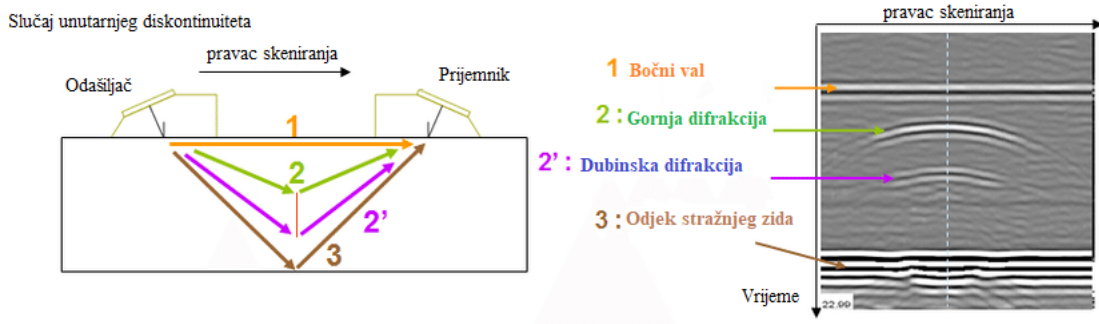
Interni rotirajući sustav inspekcije IRIS. Budući da je IRIS ultrazvučna tehnika nerazornog ispitivanja, kao takva u pravilu zahtjeva kontaktno sredstvo između ispitivane površine i opreme za ispitivanje. U ovom slučaju je to voda. Epruvete koje se ispituju moraju stoga prvo biti poplavljene da bi se tehnika ispitivanja mogla pravilo primijeniti. IRIS se oslanja na sondu za generiranje ultrazvučnog pulsa paralelnog s osi cijevi koja se ispituje. Također oslanja se na rotirajuće zrcalo koje umjerava ultrazvučni val u stijenci cijevi. Zrcalo pokreće mala turbina koju pokreće pritisak vode upumpane u cijev. Propuštanjem ultrazvučnog vala sondom kroz cijev, dio vala reflektira stijenka određenog promjera, dok se ostatak reflektira na vanjskoj stijenci određenog vanjskog promjera. Budući da je ultrazvučna brzina materijala cijevi poznata, moguće je procijeniti debljinu stijenke izračunavanjem razlike u vremenu prolaska vala između unutarnjeg i vanjskog promjera cijevi. Provlačenje sonde, okretno gibanje zrcala rezultira spiralnom putanjom skeniranja ispitne cijevi. Sustav IRIS osigurava da je zrcalo u središtu cijevi. Ultrazvučni puls izvan središta davao bi iskrivljenu sliku skeniranja zbog razlike u unutarnjem i vanjskom promjeru cijevi. IRIS se obično koristi za ispitivanje kotlova, cijevi s izmjenjivačima topline, cijevi s rebrima i ventilatorima. [20]



*Slika 5.3. Prikaz pristupa ispitivača internim rotirajućim sustavom inspekcije IRIS*

Ispitivanje vremena difrakcije leta TOFD. U sustavima difrakcije leta TOFD, koristi se par ultrazvučnih sondi koje se nalaze na suprotnim stranama zavarenog spoja. Sonda odašiljača emitira ultrazvučni puls koji se prenosi na sondu prijemnika na suprotnoj strani. U neoštećenom dijelu, signal koji hvata sonda prijemnika potječe od dva vala. Prvi koji putuje duž površine ( bočni val) i drugi koji se odbija od udaljene stijenke (refleksija stražnje stijenke). Kada je prisutan diskontinuitet kao što je pukotina, dolazi do difrakcije ultrazvučnog zvučnog vala od gornjeg i donjeg vrha pukotine. Koristeći izmjereno vrijeme leta pulsa , dubina vrhova pukotina može se automatski izračunati primjenom trigonometrije. TOFD nudi veliku točnost mjerenja kritičnih veličina defekata nalik pukotinama kroz stijenku. Moguće je postizanje točnosti ispitivanja u rasponu od  $\pm 1$  mm različitih debljina materijala. TOFD je prvobitno razvijen kao metoda točnog praćenja i dimenzioniranja visine diskontinuiteta u stijenci. Sada je potvrđena kao jedna od najučinkovitijih tehnika za lociranje i dimenzioniranje diskontinuiteta u feritnim zavarima. [21]

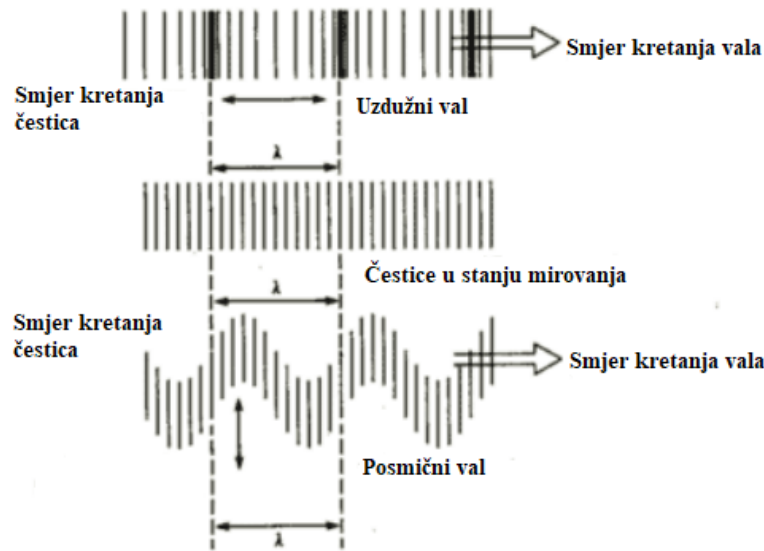




Slika 5.4. Ispitivanje vremena difrakcije leta TOFD pomoću dva ultrazvučna pretvornika

### 5.3. Teorijska osnova ultrazvučnog ispitivanja i Snellov zakon

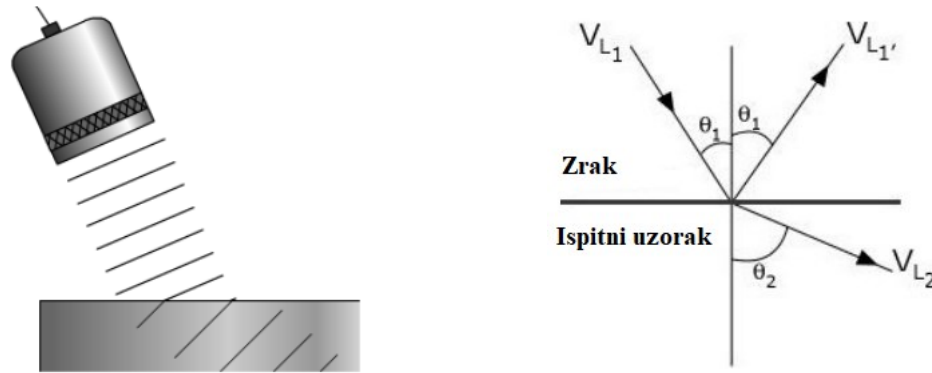
Ultrazvučno ispitivanje temelji se na vibracija u materijalima što se općenito naziva akustikom. Sve materijalne tvari sastoje se od atoma, koji mogu biti prisiljeni na vibracijsko gibanje oko svojih ravnotežnih položaja. Na atomskoj razini postoji mnogo različitih oblika vibracijskog gibanja, međutim većina je irelevantna za akustiku i ultrazvučno ispitivanje. Akustika je usredotočena na čestice koje sadrže mnogo atoma koji se kreću stvarajući mehanički val. Kada materijal nije rastegnut ili komprimiran izvan svoje granice elastičnosti, njegove pojedinačne čestice ponašaju se u obliku elastičnih oscilacija. Kada se čestice medija pomaknu iz svojih ravnotežnih položaja, javljaju se unutarnje povratne sile. Ove elastične povratne sile između čestica, u kombinaciji s inercijom čestica, dovode do oscilatornog gibanja medija. U čvrstim tijelima, zvučni valovi mogu se širiti na četiri osnovna načina koji se temelje na načinu na koji čestice osciliraju. Zvuk se može širiti u obliku uzdužnih valova, posmičnih valova, površinskih valova i kod jako tankih materijala u obliku pločastih valova. Uzdužno i posmični valovi dva su načina širenja valova koji se najčešće koriste u ultrazvučnom ispitivanju.



Slika 5.5. Prikaz ponašanja čestica ovisno o načinu širenja vala kroz materijal

Kod longitudinalnih ili uzdužnih valova oscilacije se događaju u uzdužnom smjeru tj. smjeru širenja valova. Budući da u uzdužnim valovima djeluju sile kompresije i ekspanzije, često se nazivaju i valovima pritiska ili kompresije. Također može ih se tumačiti i kao valove gustoće jer gustoća materijala varira kako se val kreće. Kod transverzalnih ili posmičnih valova čestice osciliraju pod pravim kutem ili poprečno na smjer širenja valova. Posmični valovi zahtijevaju akustični čvrsti materijal za učinkovito širenje valova te se stoga ne šire jednolično kroz fluide ili plinove. Posmični valovi relativno su slabiji od uzdužnih te se zapravo posmični valovi u pravilu generiraju u materijalima koristeći dio energije uzdužnih valova.

Kada ultrazvučni val prolazi kroz sučelje između dva materijala pod kosim kutem, a medij i materijal imaju različite indekse refleksije, proizvode se reflektirani i lomljeni valovi. To se također događa i sa svjetlom zbog čega se čini da su objekti koji se vide preko sučelja pomaknuti u odnosu na mjesto gdje se oni stvarno nalaze. Na primjer, ako se promatra čaša puna vode od gore, voda u čaši izgleda bliže nego što ona stvarno jest. Refrakcija se odvija na sučelju dva materijala zbog razlike u akustičnim brzinama između dva materijala. Slika 2.19. prikazuje slučaj kada ravni zvučni valovi koji putuju kroz zrak ulaze u ispitni materijal koji ima veću akustičnu brzinu. Kada val naiđe na prijelaz između zraka i ispitnog materijala, dio vala u ispitnom materijalu kreće se brže od vala koji ulazi u materijal. Kao rezultat toga val se lomi i mijenja smjer. Takva pojava naziva se refrakcija.



Slika 5.6. Refrakcija zvučnog vala kao posljedica razlike akustičnih brzina i dijagram prikaza Snellovom zakona

Snellov zakon opisuje korelaciju između kutova i brzina ulaznih i izlaznih valova. Snellov zakon izjednačava brzine materijala ili medija s omjerom sinusa upadnog i lomenog kuta u ispitnom materijalu kao što je prikazano u jednađbi. [22]

$$\frac{\sin\theta_1}{V_{L1}} = \frac{\sin\theta_2}{V_{L2}} \quad (5.1)$$

gdje je:

- $V_L$  brzina zvuka
- $\theta$  ulazni kut zvuka

#### 5.4. Oprema za ispitivanje i kalibracija opreme

Piezoelektrične sonde jedna su od par najbitnijih komponenti potrebnih za kvalitetno i adekvatno ultrazvučno ispitivanje bez razaranja. Glavni zadatak piezoelektričnih sondi je pretvorba električne energije u mehaničke impulse i obrnuto. Sonde kako ispitivačka oprema dijele se u dvije osnovne skupine, kontakte i bez kontakte sonde.

Kontaktne sonde dolaze u izravni fizički kontakt s ispitivačkom jedinicom. U kontaktne sonde može se ubrojiti dvostruke pretvarače tj. sonde, sonde koje iniciraju konstantne smične valove i sonde koje

valovima prodiru u ispitnu površinu pod kutem. Beskontaktna sonda koristi se za ispitivanje podvodnih ispitnih površina te zbog toga poprimaju naziv uranjajućih ispitnih sonda.

Profil snopa valova sonde bitno je promatrati prilikom provođenja ispitivanja. Profil snopa valova na izlazu iz sonde sadrži izlaznu energiju, kut snopa, i raspon širenja navedenog snopa. Profil snopa valova može se mijenjati promjenom frekvencije valova, promjera ili prigušenja propuštanja valova iz sonde. Ako sonda odašilje niskofrekventne impulse ultrazvučnih valova, valna duljina i širenje snopa valova bit će veće. Isto tako ako se promjer sonde povećava, širenje snopa valova će se smanjivati. Također bitno je uzeti u obzir i vanjske čimbenike koji utječu na kvalitetu ispitivanja kao što su mehanička i električna opterećenja.

Prilikom upotrebe piezoelektričnih sonda, sonda se kombinira sa piezoelektričnim elementom u svrhu pretvorbe električnih signala u mehaničke impulse i obrnuto. Sonda ima bitne čimbenike koji utječu na njihovu funkcionalnost, a ti čimbenici variraju. Čimbenici koji utječu na funkcionalnost sonde su vrsta materijala, električne i mehaničke karakteristike kao i parametri mehaničkog i električnog opterećenja. Međutim, glavne karakteristike piezoelektričnih pretvarača nisu navedena ograničenja nego mogućnost visoke izlazne snage kako bi se osigurala učinkovitost, stalna stabilnost, prilagodljivost i sposobnost podnošenja visokih temperatura i vlage. [23]

Kontaktno sredstvo je ispitni fluid koji olakšava prijenos ultrazvučne energije iz sonde na ispitni uzorak. Kontaktno sredstvo se u pravilu koristi jer je prisutna neusklađenost akustične impedancije između zraka i krutih tvari. Iz toga razloga sva se energija reflektira, a vrlo mala količina energije se prenosi u ispitni uzorak. Kontaktno sredstvo istiskuje zrak i omogućuje dovođenje više zvučne energije u ispitni uzorak čime se upotrebljivost ultrazvučnog signala dovodi na prihvatljivu razinu. Kontaktno sredstvo između ispitne sonde i ispitnog uzorka dolazi u obliku sloja ulja, glicerina ili vode.

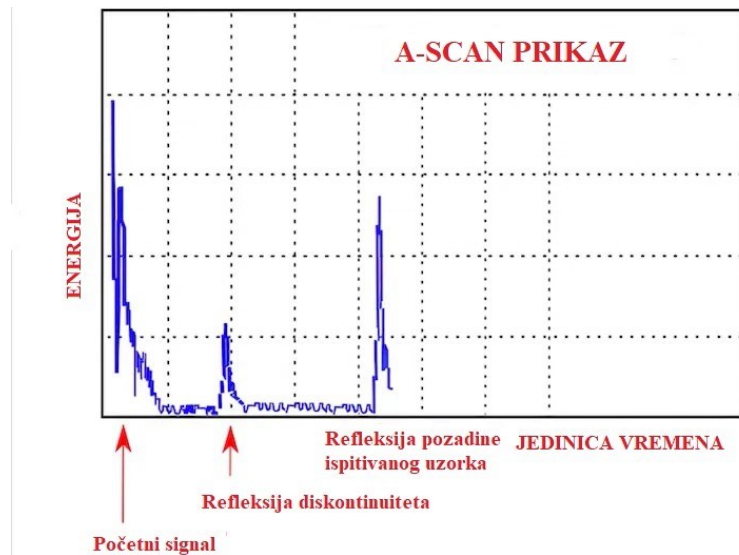
Ultrazvučni pulser prijemnici su alternativne jedinice koje se koriste kao dio ultrazvučnog sklopa elemenata. Ultrazvučni pulser prijemnici sa odgovarajućom sondom i ultrazvučnom jedinicom mogu se koristiti za otkrivanje dubinskih grešaka i mjerenje debljine u širokom spektru metala, plastika, keramika i kompozita. Pulsirajući dio instrumenta generira kratke električne impulse valova zvuka velike amplitude kontrolirane energije koji se pretvaraju u kratke ultrazvučne impulse. Većina ultrazvučnih pulsera ima vrlo nisku izlaznu impedanciju za bolji pogon sonda. Pulser prijemnici također se koriste za karakterizaciju materijala što uključuje mjerenje brzine zvuka ili prigušenja, što se može povezati sa svojstvima materijala kao što je modul elastičnosti.

Završno, kalibracija opreme ključan je korak u ultrazvučnom ispitivanju kako bi se osigurala preciznost i povoljno mjerenje. Dva su ključna čimbenika koje je potrebno uzeti u obzir prije vršenja kalibraciju opreme, a to su vrsta očekivane greške i vrsta ispitivanog materijala. Prilikom kalibracije ultrazvučne opreme koristi se kalibracijski blok. Primjena kalibracijskog bloka služi kako bi referentni materijal bio isti kao i onaj koji se pregledava kao što i greška prisutna na kalibracijskom bloku mora biti što sličnija onoj koja će se ispitivati. Kalibracijski blok koji se koristi za kalibraciju opreme ne razlikuje se previše od ispitnog uzorka te sadrži nekoliko umjetnih diskontinuiteta kao što su nedovoljno provarivanje, uključci ili pukotine. Način provođenja kalibracije korištenjem kalibracijskog bloka i količina blokova koji će se koristiti ponajviše ovisi o zahtjevima ultrazvučnog ispitivanja. [24]

## 5.5. Prikaz nepravilnosti

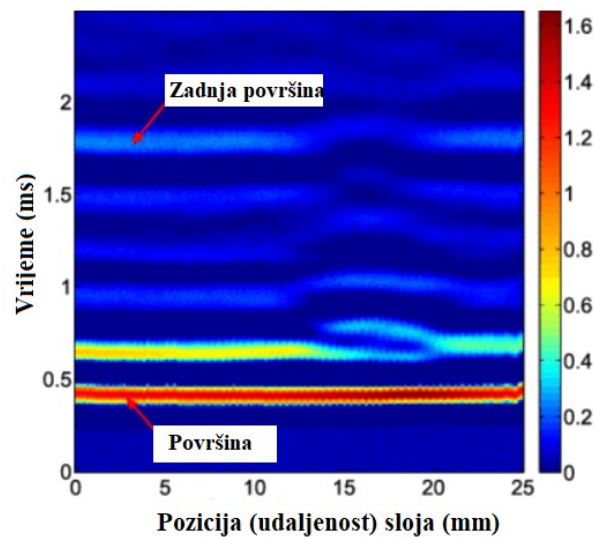
Ultrazvučni podaci mogu se prikupiti i prikazati u više različitih formata. Tri najčešća formata poznata u NDT-u su A-scan, B-scan i C-scan. Svaki način prikaza rezultata ispitivanja pruža drugačiji način gledanja i ocjenjivanja promatranih područja ispitnog materijala. Suvremeni ultrazvučni sustavi skeniranja ispitnih površina mogu prikazati dobivene podatke o ispitnom materijalu u sva tri formata istovremeno.

A-scan format prikazuje količinu primljene ultrazvučne energije kao funkciju vremena. Relativna količina primljene energije iscrtana je duž okomite osi, a proteklo vrijeme prikazano je duž vodoravne osi. Većina instrumenata s A-scan zaslonom dopušta da se signal prikazuje u obliku prirodne radio frekvencije, kao potpuno ispravljeni radio frekventni signal ili kao pozitivna tj. negativna polovica radio frekventnog signala. U prikazu A-scana, relativna veličina diskontinuiteta može se procijeniti usporedbom amplitude signala dobivenog od nepoznate površine koja reflektira signal s onom površinom koja je poznata.



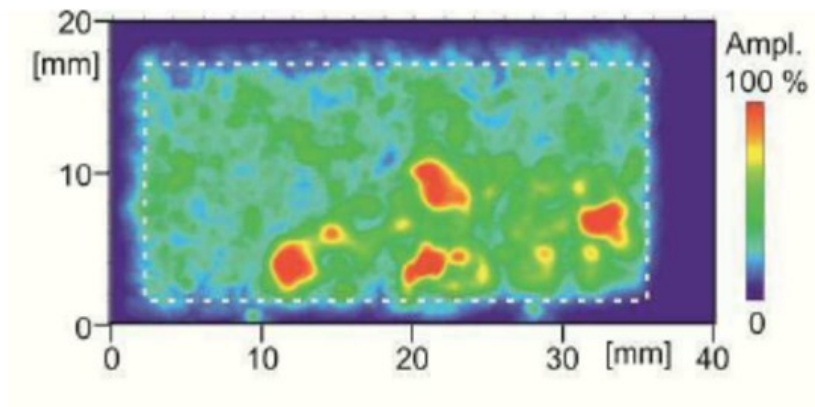
Slika 5.7. Prikaz A-Scana

B-scan prikazuje profil ispitnog uzorka tj. poprečni presjek. Kod B-scan prikaza vrijeme putovanja zvučne energije prikazano je duž ordinate, dok je linearni položaj sonde prikazan duž apscise. Iz B-scana može se odrediti dubina diskontinuiteta kao i njegove približne linearne dimenzije u smjeru skeniranja. Karakteristična primjena B-scana u NDT-u je za otkrivanje područja pogodnih na utjecaj korozije.



Slika 5.8. Prikaz B-scana

C-scan pruža tlocrtni prikaz položaja i veličine značajki unutar ispitnog uzorka. Ravnina slike paralelna je s uzorkom dobivenim skeniranjem sondom. C-scan dobiva se automatiziranim sustavom za prikupljanje podataka. Tipično prikupljanje podataka vrši se na A-scanu, a amplituda ili vrijeme prolaska signala bilježi se u konstantnim intervalima dok sonda prelazi preko ispitnog uzorka. C-scan pruža tlocrtnu sliku značajki koje se reflektiraju na samoj površini ispitnog uzorka kao i u dubini. [25]



*Slika 5.9. Prikaz C-scana*

## 5.6. Područja primjene ultrazvučnog ispitivanja

Primjena ultrazvučnog ispitivanja raznolika je u raznim industrijama. Ultrazvučno ispitivanje često se koristi u industriji na ispitivanju metala, polimera, kompozita i keramika. Korištenjem odgovarajuće opreme za ultrazvučno ispitivanje provodi se ocjena zavarenog spoja analizom složene ravnine. Nekolicina industrija u kojima je UT najzastupljeniji za otkrivanje dubinskih diskontinuiteta su: proizvodnja metala, kontrola zavarenih spojeva uključujući rad na platformama, nuklearnu industriju i željeznice. U proizvodnji metala UT prati kvalitetu materijala tijekom kovanja, lijevanja i zavarivanja. Naftna i plinska industrija koriste ga za otkrivanje korozije i pukotina na cjevovodima i spremnicima. U avijaciji se koristi za otkrivanje grešaka u vitalnim komponentama. Ova tehnika ispitivanja ključna je i za kontrolu zavarenih spojeva, osiguravajući pouzdanost u različitim industrijama. Ultrazvuk je esencijalan alat za očuvanje integriteta, sigurnosti i kvalitete materijala. [26]

## 5.7. Prednosti i nedostaci ultrazvučnog ispitivanja

Osnovne prednosti ultrazvučnog ispitivanja u uspoređi s ostalim metodama su:

- Veća probojna moć omogućuje otkrivanje grešaka duboko u ispitnom uzorku
- Veća osjetljivost omogućuje otkrivanje čak i iznimno malih nedostataka.
- Veća preciznost od drugih tehnika nerazornog ispitivanja omogućuje određivanje dubine unutarnjih grešaka.
- Ima sposobnost procjene vrste, orijentacije, veličine kao i oblika dubinskih nedostataka.
- Ima sposobnost procjene strukture različitih legura komponenata s različitim akustičnim svojstvima.
- Nije opasna metoda za rad ili osoblje te nema utjecaj na okolinu materijala i opreme.
- Dobiveni rezultati su trenutni i omogućuju kvalitetno donošenje odluka o budućim koracima.

Osnovni nedostaci ultrazvučnog ispitivanja u uspoređbi s ostalim metodama su:

- Ispitivanje većinom zahtjeva kvalitetnu obuku i rukovanje ispitivača.
- Potrebno je široko tehničko znanje za razvoj postupaka inspekcije.
- Nehomogene dijelove, dijelove nepravilnog oblika, grubih površina te male debljine u većini slučajeva jako je teško ispitati primjenom ultrazvučne metode.
- Potrebno temeljito čišćenje površine ispitivanja od boje ili ulja tj. bilo kakvih neželjenih nečistoća.
- Kako bi se omogućio kvalitetan prijenos energije ultrazvučnih valova sa sonde na ispitnu površinu potrebna je upotreba kondenzata osim ako se ne primjenjuje ispitivanje bez kontaktnim sondama. [27,28]



## 6. RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE

Radiografija je široko primjenjiva tehnika ispitivanja bez razaranja koja koristi X-zrake za otkrivanje bilo kakvih oblika dubinskih diskontinuiteta u proizvodima ili komponentama. Kako bi se radiografsko ispitivanje vršilo na prihvatljivoj razini kvalitete, potrebna je specijalizirana NDT obuka za radiografske ispitivače kako bi se precizno identificirali bilo kakvi neželjeni diskontinuiteti ili stanja kao što su korozija ili skrivene pukotine. Prolaskom X-zraka ili gama zraka kroz ispitni uzorak, radijacija se različito apsorbira u ispitnom uzorku zbog razlike u gustoći i debljini ispitnog uzorka kao i zbog prisutnosti dubinskih nedostataka. Glavni razlog primjene radiografskog ispitivanja je sposobnost prodiranja kroz puno vrsta materijala kao i proizvođenje kvalitetne slike snimanja. Primjenom radiografskog ispitivanja nije potrebno obraćanje velike pažnje na pripremu površine ispitivanja te se zbog toga radiografsko ispitivanje primjenjuje za otkrivanje površinskih i dubinskih nedostataka usprkos prisustvu premaza i izolacija. Također, radiografsko ispitivanje koristi se za otkrivanje promjena gustoće kao i debljine ispitnog materijala koja nastaju uslijed pojave korozije. [29]

### 6.1. Principi rada radiografskog ispitivanja

U postupku radiografskog ispitivanja, ispitni uzorak koji se pregledava postavlja se između izvora zračenja i komada osjetljivog na zračenje. Izvor zračenja može biti rendgenski uređaj ili radioaktivni izvor poput Ir-192, Co-60 ili rijetko Cs-137. Ispitivani uzorak će zaustaviti dio zračenja tj. apsorbirati, pri čemu će deblji i gušći dijelovi apsorbirati više zračenja. Zračenje koje prođe kroz ispitni uzorak stvorit će film na kojem će se predmet ispitivanja analizirati u obliku sjene objekta. Gustoća razvijenog filma varirat će prema količini zračenja koja prolazi kroz ispitni uzorak na film. Tamniji dijelovi na filmu označavat će veću izloženost zračenju, dok će svjetliji dijelovi ukazivati na manju izloženost zračenju. Kontrastni prikazi na dobivenom filmu iz snimanja mogu se koristiti za zaključivanje debljine ili sastava materijala kao i za otkrivanje prisutnosti nepravilnosti tj. diskontinuiteta unutar ispitnog materijala. Tipične greške koje se očekuju radiografskim ispitivanjem su praznine te metalni i nemetalni uključci. [30]

## 6.2. Priroda prodiranja zračenja X-zrakama i Gama zrakama

Rendgenske zrake i Gama zrake pripadaju kategoriji elektromagnetskih valova i smješteni su unutar frekvencijskih raspona na elektromagnetskom spektru koji prelaze onaj od ultraljubičastog zračenja. Gama zrake obično pokazuju veće frekvencije od rendgenskih zraka. Osnovna razlika između rendgenskih zraka i gama zraka proizlazi iz njihovog izvora. Rendgenske zrake obično se umjetno generiraju pomoću rendgenskih generatora, dok gama zračenje potječe od radioaktivnih materijala. Rendgenske zrake i gama zrake pokazuju svojstva valova slična kao zrake svjetlosti, mikrovalovi i radijski valovi. Rendgenske i gama zrake nije moguće opaziti vidom, dodiranjem ili sluhom. Nemaju električnog naboja kao ni masu, što rezultira njihovom otpornosti na utjecanje električnog i magnetskog polja te se stoga šire duž ravnih putanja. Ipak, rendgenske i gama zrake mogu se saviti analogno ponašanju svjetla. Elektromagnetsko zračenje može se tumačiti kao djelovanje čestica, odnosno kao pojavljivanje nakupina energije zvanim „fotonima“. Svaki foton sadrži određenu količinu energije, dok se sva elektromagnetska zračenja sastoje od fotona. Jedina razlika između različitih tipova elektromagnetskog zračenja je količina energije sadržana u fotonima. Zbog svoje kratke valne duljine, rendgenske i gama zrake imaju više energije za prolazak kroz ispitnu tvar nego druge vrste energije na elektromagnetskom spektru. Dok prolaze kroz ispitnu tvar, raspršuju se i apsorbiraju, a stupanj prodiranja ovisi o vrsti ispitne tvari i energije zraka. [8]

Glave osobine rendgenskih i gama zraka su:

- Ne mogućnost detektiranja ljudskim osjetilima
- Putuju u ravnim linijama brzinom svjetlosti
- Njihove putanje se ne mogu promijeniti električnim ili magnetskim poljima
- Mogućnost difrakcije valova i u ograničenoj mjeri refrakcije svjetlosti na granicama između različitih materijala
- Prolaze kroz tvar dok ne naiđu na atomsku česticu
- Stupanj prodiranja ovisi o njihovoj energiji kao i tvari kroz koju prolaze
- Posjeduju dovoljno energije da ioniziraju tvar te također mogu oštetiti ili uništiti žive stanice.

### 6.3. Metode radiografskog ispitivanja

Postoji nekoliko različitih metoda radiografskog ispitivanja, uključujući filmsku radiografiju češće nazivanu konvencionalnom radiografijom, digitalnu radiografiju, radiografiju u stvarnom vremenu, računalnu radiografiju i računalnu tomografiju. Svaka od metoda ispitivanja djeluje s neznatnim razlikama te posjeduje svoje prednosti i ograničenja. Prilikom odabira najprikladnije tehnike za ispitivanje uzimaju se u obzir faktori vremenskih ograničenja, veličine objekta, geometrije, dostupnog prostora za pregled i zahtjeva za osjetljivosti.

Konvencionalna radiografija ili filmska radiografija, koristi rendgensko ili gama zračenje generirano iz cijevi. U ostalim slučajevima zračenje se generira iz izotopa Ir-192 ili Co-60. Filmska radiografija ima mogućnost prodiranja kroz širok raspon materijala različitih gustoća kako bi se otkrili dubinski nedostaci u kvaliteti zavarenih spojeva. Također koristi se za analizu sistema u radu kako bi se utvrdilo prisustvo korozije ili erozije te procjenu grešaka pri lijevanju te u otkrivanju oštećenja u kompozitnim materijalima. [31]

Digitalna radiografija napredni je oblik rendgenskog ispitivanja koji u stvarnom trenutku na računalu stvara digitalnu rendgensku sliku. Ova tehnika neraznog ispitivanja koristi rendgenski osjetljive ploče za prikupljanje podataka tijekom pregleda ispitnog uzorka, koji se pritom odmah prenose na računalo. Princip rada digitalne radiografije je pretvaranje rendgenskog zračenja u odgovarajući električni napon, a potom u digitalnu sliku putem senzora. Također digitalna radiografija zahtjeva manje vremenske periode zračenja te se pritom dobiva kvalitetnija završna slika. [32]

Radiografija u stvarnom vremenu ili fluoroskopija, metoda je neraznog ispitivanja u kojoj se nevidljive rendgenske zrake koriste za stvaranje digitalnih slika. Korištenjem navedene metode, rendgenske zrake se ispuštaju s jedne strane objekta, a zatim prodiru kroz objekt i apsorbiraju se od senzora na suprotnoj strani ispitnog uzorka. Apsorbirane zrake od strane senzora pretvaraju se u vidljive valne duljine svjetla i koriste se za stvaranje slika u stvarnom vremenu. Radiografija u stvarnom vremenu često se koristi za otkrivanje korozije u ispitnim cjevovodima. Prodorna priroda rendgenskih zraka čini ovu tehniku često primjenjivom za otkrivanje korozije ispod izolacije. Glavna razlika između radiografije u stvarnom vremenu i konvencionalnih metoda rendgenskog snimanja je krajnji ispitni snimak. Za razliku od tradicionalnih rendgenskih sustava koji koriste film, fluoroskopija prikazuje slike ispitivanja digitalno. Fluoroskopija je značajno brža metoda ispitivanja od

konvencionalnih metoda ispitivanja i smatra se sigurnijom za ispitivača jer koristi do 80 % manje zračenja. [33]

Računalna radiografija kao osnovnu opremu za ispitivanje koristi slikovne ploče koje izložene rendgenskim ili gama zraka kao rezultat daju energiju zračenja pohranjenu u posebnom sloju fosfora unutar slikovnih ploča. Specijalni uređaj poznat kao skener pritom se koristi za očitavanje latentne slike s ploče vrlo preciznom usmjerenom laserskom zrakom. Kada se zračenje potakne unutar ploče, ploča emitira plavu svjetlost čiji je intenzitet proporcionalan količini primljenog zračenja. Svjetlo se zatim detektira visoko osjetljivim analognim uređajem poznatim kao fotomultiplikator koji pretvara digitalni signal pomoću analogno digitalnog pretvarača. Generirana digitalna rendgenska slika potom se može pregledavati na računalnom monitoru i detaljnije analizirati. Nakon što se slikovna ploča očita, briše se pomoću izvora svjetlosti visokog intenziteta i odmah se pritom opet može koristiti za daljnja ispitivanja. [34]

Računalna tomografija razlikuje se od ostalih metoda radiografskog ispitivanja ponajviše zbog visoke potrebe za sigurnosti. Bitno je napomenuti da je računalna tomografija temeljena na rendgenu koji se provodi tek nakon što su obrađene sve standardne sigurnosne mjere. Kod računalne tomografije, rendgenske zrake okrenute su ravno prema ispitnom objektu te pritom prolaze kroz isti s različitim razinama apsorpcije i na kraju se dobivaju kao rezultat snimanja na filmu, slikovitoj ploči ili digitalnom detektoru. Rezultat snimanja je dvodimenzionalna slika ispitnog objekta. Na temelju te slike ispitivač tumači dobivene rezultate ispitivanja i donosi odluku jesi li oni prihvatljivi i postoje li neprihvatljiva stanja. [35]

#### **6.4. Područja primjene radiografskog ispitivanja**

Industrijska radiografija koristi se za inspekciju novih proizvoda i zavarenih spojeva kako bi se osiguralo zadovoljavanje relativnog standarda. Novi cjevovodi, uključujući krivine i spojeve, spremnici pa čak i izolirani materijali rutinski se pregledavaju primjenom radiografskog ispitivanja. Još jedna česta uporaba industrijske radiografije je otkrivanje i mjerenje unutarnjih nedostataka u postojećim postrojenjima. Rano otkrivanje unutarnjih nedostataka u cjevovodima i postrojenjima u sektoru nafte i plina, ključno je za održavanje protoka proizvodnje i sprječavanje potencijalno katastrofalnih izljeva ugljikovodika. Otkrivanje korozije ispod izolacije još je jedna česta primjena radiografskog ispitivanja. Radiografski ispitivači mogu precizno locirati bilo kakve nedostatke bez

skupog i vremenski zahtjevnog postupka uklanjanja i zamjene izolacije. Osim industrijskih primjena radiografsko ispitivanje primjenjuje se u medicini i sigurnosnim svrhama. [36]

## 6.5. Prednosti i nedostaci radiografskog ispitivanja

Osnovne prednosti radiografskog ispitivanja u uspoređi s ostalim metodama su:

- Primjenjivo na ispitivanje sklopova komponenti
- Potrebna je minimalna priprema površine
- Radiografsko ispitivanje stvara kvalitetnu sliku ispitivanja prilikom otkrivanja površinskih i dubinskih diskontinuiteta
- Radiografsko ispitivanje potvrđuje dubinske diskontinuitete čak i kod složenih struktura
- Izolira i pregledava unutarnje komponente uzorka materijala
- Pomaže u izračunavanju kutova i dimenzija unutar ispitnog uzorka bez razdvajanja na različite dijelove
- Jako precizno snimanje promjena poput korozije te promjena gustoće i debljine materijala

Osnovni nedostaci radiografskog ispitivanja u uspoređbi s ostalim metodama su:

- Opasno ionizirajuće zračenje, zahtjeva visoke sigurnosne standarde
- Oprema za ispitivanje relativno skupa
- Proces ispitivanja relativno spor
- Nemogućnost otkrivanja orijentacije diskontinuiteta
- Nemogućnost otkrivanja dubine diskontinuiteta
- Potreban pristup ispitnom komadu s oba dvije strane [8]

## **7. TRENDOWI RAZVOJA METODA ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA**

### **7.1. Digitalizacija metoda ispitivanja bez razaranja**

Tradicionalni alati za NDT uvelike ovise o stručnosti i posvećenosti ispitivača. U posljednjim godinama, digitalni pristup NDT-a postao je popularniji od tradicionalnih alata za nerazorno ispitivanje jer dovodi do bržih rezultata ispitivanja kao i nižih troškova. Digitalna i računalna radiografija te ostale digitalne forme rendgenskih snimaka zamijenile su filmske rendgenske snimke u mnogim sektorima tijekom proteklog desetljeća. Prijelaz s filma na digitalni format potaknut je prednostima digitalnih skupova podataka, kao i smanjenjem troškova, ekonomskih prednostima eliminiranja filma, kemijske obrade i odlaganja. Osim digitalne i računalne radiografije postoje još dvije metode nerazornog ispitivanja koje unaprjeđuju NDT digitalizacijom, a to su računalna tomografija i ultrazvučno ispitivanje s faznim nizom o kojima je nešto više rečeno u poglavlju 2.2. [37]

### **7.2. Tehnike računalnog NDT pregleda**

Danas se NDT primjenjuje u kvalifikaciji novih komponenata i inspekciji zavarenih spojeva u proizvodnji. NDT inspekcija uključuje veliku zastupljenost vizualne kontrole, na primjer za identifikaciju zavarenih spojeva i dimenzija. U većini slučajeva ispitivanja se vrše od strane specijaliziranih ispitivača korak po korak. Kao rezultat toga, cijeli NDT proces zahtjeva puno vremena i stručnosti, što nije svaki put moguće te se onda pristupa novim rješenjima kako bi se proces ubrzao i smanjila odgovornost ispitivača. Kako bi proces ispitivanja bio što efikasniji, u početku su razvijeni sustavi za polu automatsko NDT ispitivanje. Polu automatizirano NDT ispitivanje zasnivalo se na korištenju algoritama za obradu ispitnih površina kako bi se detektirali nedostaci u zavarenim spojevima. Međutim, vrlo malo polu automatiziranih sustava za ispitivanje je uspjelo postići istodobnu preciznost te standardiziranu kvalitetu ispitivanja. Posljednjih godina konstantnim razvojem metoda došlo je primjene metoda dubokog učenja u tehnikama računalnog pregleda, a metode su primjenjene na: segmentaciji slika, klasifikaciji grešaka, detekciji objekata i pretraživanju slika. Automatizacija metodama dubokog učenja zasniva se razvoju algoritama strojnog učenja kojima

se stroju pružaju velike količine podataka za prepoznavanje s kojima algoritam uzima u obzir prepoznate podatke i donosi zaključke na temelju umjetne inteligencije.

Najuspješnije tehnike računalnog NDT pregleda temelje se na konvolucijskim neuronskim mrežama CNN, koje nastoje pronaći korelaciju između čovjeka i stroja u svrhu kvalitetne detekcije traženih nepravilnosti. Koriste se prvenstveno za klasifikaciju, grupiranje slika prema sličnosti te obavljanje prepoznavanja objekata unutar scena. CNN uzima sliku, dodjeljuje važnost različitim objektima snimanja i sposoban je razlikovati objekte unutar slike snimanja. U usporedbi s tradicionalnim metodama tehnike računalnog NDT pregleda, koje se uvelike oslanjaju na ljudski prepoznate tipove karakterističnih grešaka, CNN je u stanju automatski stvoriti bazu karakterističnih grešaka i puno brže prepoznavati greške od ispitivača. Učinkovitost CNN u prepoznavanju grešaka jedan je od glavnih razloga zbog kojih tehnike računalnog NDT pregleda imaju sve veću zastupljenost u industriji kao i težnju za unaprjeđenjem.

Za razliku od bazičnih tehnologija vizualnog pregleda, NDT zahtjeva otkrivanje grešaka vrlo malih dimenzija (npr. poroznost ili pukotine). Da bi se ispitivanjem postigla točnost što bliža ljudskom vidu, algoritmi računalnog vida moraju zadovoljiti sljedeće parametre:

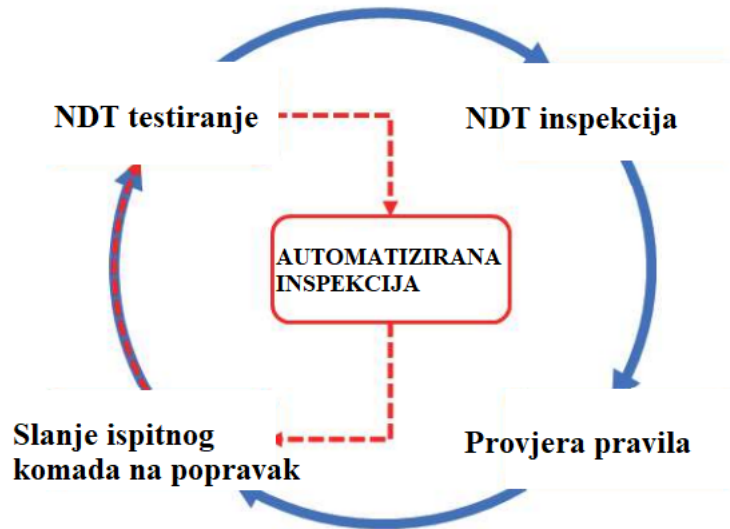
- Točnost pri ispitivanju. Nedostaci u zavarenim spojevima kod npr. rendgenskog ispitivanja predstavljaju male segmente na filmu, što zahtjeva točnost od segmentacijskog algoritma
- Interpretacija diskontinuiteta u zavarenim spojevima zahtjeva stručnost, što dodatno poskupljuje proces računalnog NDT pregleda
- Standardizirana kvaliteta ispitivanja. Algoritmi moraju biti sposobni otkriti različite vrste diskontinuiteta u zavarenim spojevima pri promjenjivim uvjetima. [37]

### **7.3. Definicija okvira automatiziranog sustava za NDT ispitivanje**

U ovom poglavlju pojasnit će se prilagodljivi okvir za automatizirano NDT ispitivanje. Standardni NDT proces sastoji se od četiri faze:

- NDT testiranja
- NDT inspekcije
- Provjere pravila
- Slanja ispitnog komada na popravak

Ciklus proces ispitivanja označen je plavim linijama kao što je vidljivo na slici 7.1., gdje je svaka faza ovisna o prethodnoj i sve faze uključuju interakciju s ispitivačima. Sve četiri faze okvira automatiziranog sustava mogu se podijeliti u dvije skupine, one koje zahtijevaju fizički rad tj. NDT testiranje i slanje ispitnog komada na popravak tj. one koje zahtijevaju evaluacijski rad odnosno NDT inspekcija i provjera pravila.



Slika 7.1. Ilustracija primjene računalnog pregleda za automatizaciju NDT procesa

Kako bi se ubrzao cijeli ciklus NDT ispitivanja, koriste se algoritmi umjetne inteligencije AI kako bi se djelomično zamijenio evaluacijski rad. Velika količina ručne inspekcije može se izvesti pomoću algoritama ručnog vida kao npr. primjena tehnike segmentacije slika za detekciju nedostataka u zavarenim spojevima ili prepoznavanje objekata za identifikaciju oblika na konačnom filmu. Na ovaj način se stvara skraćeni put u petlji kao što je označeno crvenom isprekidanom linijom na slici 7.1. kako bi se smanjila potreba za uključivanjem stručnjaka za NDT. Rezultat primjene automatizirane inspekcije svodi se na postizanje automatizirane segmentacije tj. klasifikacije nedostataka na slikama NDT filmova npr. kod radiografskog ispitivanja. Nadalje, zadatak općenitog prepoznavanja grešaka na ispitnim uzorcima zahtjeva stotine tisuća označenih slika kako bi se dobio kvalitetno podešen model dubokog učenja. Osim toga, analiza nedostataka u zavarenim spojevima puno je skuplja od analize koja se radi iz skupa podataka kojima mogu pristupiti ispitivači, jer su slike NDT zavarenih spojeva privatno vlasništvo poduzeća. To se smatra jednom od najvećih prepreka za primjenu računalnom vida u NDT .



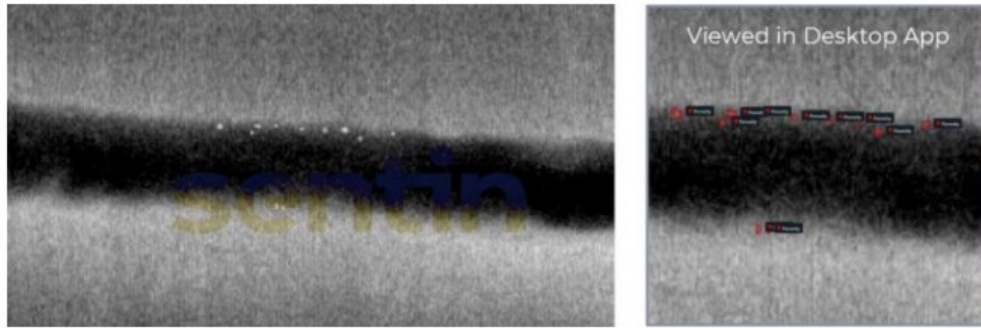
Glavne prednosti primjene automatizirane NDT inspekcije:

- Smanjenje ljudskih grešaka. Točnost stručnog ispitivača znatno se može smanjiti kada se ispitivanje vrši veliki broj puta te se iz toga razloga primjenjuje automatizirani sustav za ispitivanje jednostavnijih slučajeva ispitivanja i tako se smanjuje šansa za greškom.
- Smanjenje vremena obrade i troškova. Stručnost ljudi potrebna je samo u fazi izrade NDT izvješća, čime se štedi na radnoj snazi i vremenu.
- Zaštita podataka, sigurnosna kopija i dohvat. S digitalnim slikama i rezultatima inspekcije, svi rezultati NDT ispitivanja mogu se pohraniti digitalno.

Zaključno AI ima obećavajuću budućnost u primjeni NDT kada je potrebno ponavljajuće, opterećujuće i regresijsko testiranje. [37]

#### **7.4. Automatizacija radiografskog ispitivanja diskontinuiteta u zavarenim spojevima**

Kako bi se automatiziralo radiografsko ispitivanje, algoritmi računalnog pregleda mogu zamijeniti operacije ručnog pregleda zavara. Segmentacija slika rješava probleme u vidu lokacije granice objekata. Zbog svoje povezive primjene, segmentacija slika se može koristiti za otkrivanje i lociranje diskontinuiteta u zavarenim spojevima. Na rendgenskom filmu diskontinuiteti u zavarenim spojevima mogu se analizirati uz pomoć modela segmentacije. Ako se radi o slici zavarenog spoja, automatizirani radiografski sustav za ispitivanje ima sposobnost predviđanja lokacije, vrste i dimenzije diskontinuiteta. Slično tome, algoritam također generira NDT izvješće sa svim detaljima ispitivanja. Također algoritam za ispitivanje vrši ispitivanje, dok specijalizirani NDT ispitivač donosi konačnu potvrdu o valjanosti ispitivanja. Ako se detektira i potvrdi diskontinuitet u zavarenom spoju od strane stručnjaka, pokreće se sljedeći korak reparacije neprihvatljivog dijela. [37]



*Slika 7.2. Otkrivanje diskontinuiteta na zavarenom spoju primjenom automatiziranog sustava segmentacije slika*

### **7.5. Bežični ultrazvučni senzori**

Bežični senzori omogućuju brza ekonomična ispitivanja korozije, pukotina i drugih diskontinuiteta u reaktorima, cijevima i ostalim strukturama za ispitivanje. Glavna osobina bežičnih ultrazvučnih senzora je duga trajnost, mogućnost umetanja senzora na teško dostupna mjesta kao i brzina ispitivanja. Mogućnost umetanja senzora na teško dostupna mjesta pruža jednostavno mjerenje debljine ispitnog uzorka, prepoznavanje korozije, pukotina kao i ostalih karakterističnih grešaka što uvelike pomaže u smanjenju troškova ispitivanja. Bežični ultrazvučni senzori ponajviše su utjecali na naprednost NDT ispitivanja svojom kompaktnosti, bežičnosti i sposobnosti trajnog umetanja u strukture, ili ispod slojeva kao što su izolacije, premazi ili kompozitni materijali. Izvor energije proizlazi iz prateće ručne sonde koja je povezana s bežičnim sensorom. Ovaj sustav omogućuje prikupljanje podataka s iste lokacije na strukturi i praćenje promjena poput korozije. Također, sustav bežičnog ispitivanja ostavlja malo mjesta za ljudsku pogrešku, a mjerenja se obavljaju jako brzo. [38]

### **7.6. Prediktivno upravljanje korozijom**

Prediktivno upravljanje korozijom funkcionira na uporabi senzora za neprekidno praćenje korozije koji omogućuju zaštitu proizvodne i cjevovodne opreme. Napredni senzorski sustavi za praćenje diskontinuiteta danas omogućuju industrijama podatke koji im omogućuju proaktivno upravljanje svojim objektima. Prediktivna inteligencija poboljšava performanse opreme i izbjegava financijske i operativne posljedice. Inovativna NDT rješenja idu dalje od standardnih NDT metoda, pružajući

cjelodnevni nadzor i neprestano informiranje o nepravilnostima, bez ugrožavanja industrijskih standarda. PCM se temelji na ultrazvučnoj tehnologiji integriranoj s analizom podataka u bazi podataka koja se sastoji od alata za modeliranje, naprednih alata i alata za analizu. Takav pristup praćenja omogućuje industrijama pristup kontinuiranim i trenutnim podacima o debljini stijenke ispitnih komponenti kako bi se bolje upravljalo pojavom korozije. Pet koraka za cjelodnevno praćenje korozije zamjenjuje tradicionalne preglede kombinirajući rezultate iz podataka inspekcije i praćenja kako bi se osigurala kontinuirana procjena debljine stijenke i stope korozije. Omogućuje se predvidivo upravljanje održavanjem, poboljšanje pouzdanosti uređaja, minimaliziranje ukupnog vlasničkog troška, produljenje vijeka trajanja uređaja kako i povećanje operativne sigurnosti. Proces za cjelodnevno praćenje korozije sastoji se od pet koraka:

- Ručna ultrazvučna inspekcija
- Instalacija PCM ultrazvučnih senzora
- Cjelodnevni nadzor od pojave korozije
- Analiza podataka korištenjem baze podataka
- Izvještavanje o nerazornom ispitivanju [39]

### **7.7. Budućnost NDT-a u smanjenju ekološkog utjecaja**

Potaknuto konstantnim razvoje NDT metoda posljednjih godina, pojavio se interes za povećanje ekološke osviještenosti i smanjenju ekološkom utjecaja. Napredovanje NDT metoda, kao što je uporaba algoritama umjetne inteligencije i strojnog učenja, čine NDT točnijim, učinkovitijim i ekonomičnijim. Potaknuto konstantnim napredovanjem i povećanjem ekološke osviještenosti, pojavljuje se povećana potražnja za NDT metodama u industrijama i primjenama gdje može pomoći u povećanju ekološke osviještenosti. NDT je ključan alat za osiguranje sigurnosti i pouzdanosti ključnih komponenata i struktura u mnogim industrijama. Međutim, također pruža značajne ekološke prednosti koje se često zanemaruju. Kako svijet i industrija povećavaju ekološku osviještenost potaknuto globalnih ekološkim zagađenjem, važno je razmotriti sve moguće alate kojima se u industriji može smanjiti ekološki utjecaj. NDT je jedan od takvih alata, a njegov potencijal za poboljšanje sigurnosti, pouzdanosti i održivosti u mnogim industrijama je značajan. Investiranjem u NDT tehnologije i obuku stručnih ispitivača, industrije mogu pristupiti proaktivnom pristupu smanjenja svojeg ekološkog utjecaja, istovremeno poboljšavajući svoje financijsko stanje putem

povećanja učinkovitosti i smanjenja vremena zastoja. Primjena inovacija u NDT omogućuje od smanjenja emisije otpada do poboljšanja sigurnosti i sprječavanja ekoloških zagađenja. Gledajući prema budućnosti, postoji velika vjerojatnost da će NDT igrati još veću ulogu u promicanju ekološke održivosti u raznim industrijama i primjenama. [40]

## 8. KARAKTERISTIČNE GREŠKE U ZAVARENIM SPOJEVIMA

### 8.1. Pukotine u zavarenim spojevima

Pukotine u zavarima odnose se na deformaciju u zavaru povodom koje zavar ne podnosi velika opterećenja. Pukotine u zavarima smatraju se najopasnijim pogreškama koje se javljaju u zavarenim spojevima jer konstrukcija može popustiti uslijed širenja pukotine. Iz tog razloga pukotine u zavarima zahtijevaju trenutnu sanaciju. Postoji nekoliko razloga zbog kojih unutarnja naprezanja mogu postati veća od čvrstoće materijala zavara. To su uglavnom nepravilna toplinska obrada, geometrija zavara, koncentracija naprezanja i svojstva materijala. Što se tiče naprezanja u zavaru, fizičko opterećenje kao i ostatak naprezanja, dva su glavna čimbenika koji stoje iza razvoja pukotina u zavarenim spojevima. Navedeni ostatak naprezanja oslabljuje zavareni spoj, dok fizičko opterećenje uzrokuje pucanje zavarenog spoja. Ostatak naprezanja razvija se tijekom širenja i skupljanja materijala tijekom procesa zavarivanja. Unutarnje pukotine u zavaru mogu se razviti kada materijal zavara nije dovoljno jak da ublaži silu kojom se utječe na njega. Fizička opterećenja uključuju ekstremne vibracije, napetost na spoju zavara, kompresiju i savijanje. Osim toga, sposobnost spoja zavara da podnese fizička opterećenja smanjuje se s vremenom i brojem puta koji je izložen ekstremnim opterećenjima. Razmatranjem svih tih čimbenika, pukotine u zavarenim spojevima mogu se podijeliti u dvije osnovne kategorije. [41]

#### 8.1.1. Tople pukotine

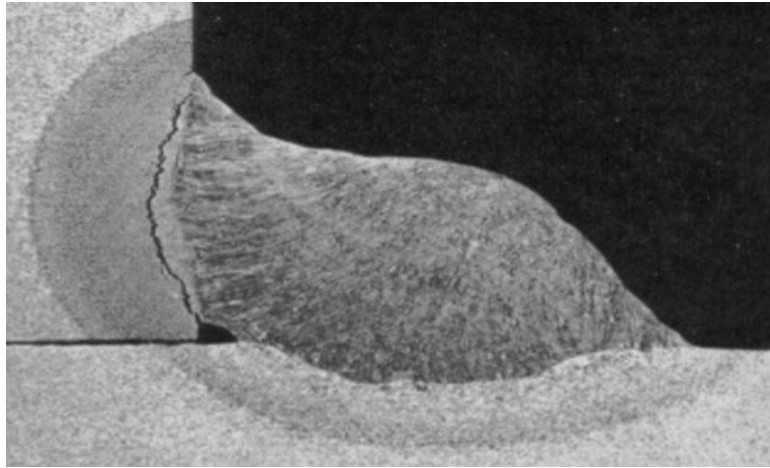
Tople pukotine razvijaju se dok se zavar u potpunosti ne ohladi tj. stvrdne. Iz različitih razloga, zavareni metal djelomično puca, većinom uzdužno kroz središte linije zavara. Tople pukotine najčešće se pojavljuju tijekom procesa zavarivanja. Ako se tople pukotine pojave tijekom procesa zavarivanja, pojavljuju se odmah nakon zavarivanja tj. tijekom procijene kvalitete novonastalog zavara. U tom slučaju, zavareni metal se hladi i skuplja, a granice zavara postaju slabije zbog djelomičnog topljenja tijekom procesa zavarivanja. Postoje tri vrste toplih pukotina koje se mogu razviti procesom zavarivanja, a to su: uzdužne pukotine, laminarne pukotine i pukotine na krateru zavara.



*Slika 8.1. Topla pukotina, lice zavarenog spoja*

#### 8.1.2. Hladne pukotine

Hladne pukotine u pravilu se razvijaju nakon završetka procesa zavarivanja. Također mogu se pojaviti odmah prilikom zavarivanja ili nakon nekog vremena. Nekim hladnim pukotinama treba i po sedam dana da se pojave, a neke se ne pojavljuju sve dok ih se ne izloži opterećenju. Hladne pukotine su komplicirane jer se pojavljuju unutar zavara, a u nekim slučajevima mogu prodirati i na površini. Zato su inicijalno teško vidljive, te se javlja potreba za radiografskim ispitivanjem. U uređenijih industrijama, nakon određenog vremena provodi se radiografsko ispitivanje kako bi se ispitaio mogući nastanak hladnih pukotina. Najčešći razlog nastanka hladnih pukotina je kombinacija vodika s metalom zavara, a to se dešava zbog razbijanja molekula vodika toplinom luka. Vodik se može pojavljivati u prljavštini, ulju, boji ili elektrodama. Postoje tri vrste hladnih pukotina: pukotine na spoju zavara, pukotine na korijenu zavara i poprečne tj. pukotine koje nastaju prilikom spajanja zavara. [41]



*Slika 8.2. Hladna pukotina, kutni zavar*

## 8.2. Poroznost u zavarenim spojevima

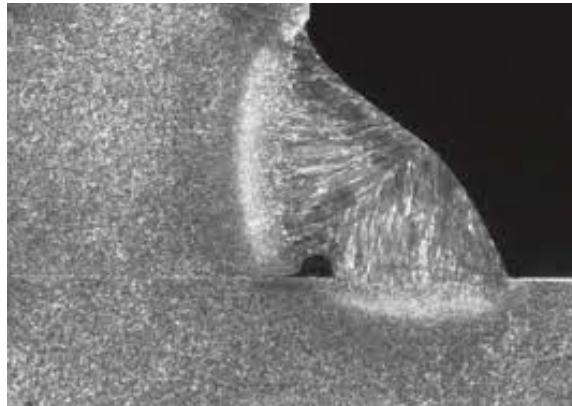
Poroznost u zavarenim spojevima uglavnom se javlja zbog apsorpcije plinova kao što su dušik, kisik, i vodik u rastopljenoj elektrodi koji se pritom oslobađaju pri skrućivanju tj. hlađenju zavarenog spoja i pokazuju na površini zavara u obliku mjehurića. Apsorpcija navedenih plinova u rastopljenoj elektrodi emitira se zbog nepreventivne zaštite plinova koji se oslobađaju. Već i 1% prisutnosti navedenih plinova u zaštitnom plinu uzrokovat će pojavom poroznosti, dok sve preko 1% rezultira pojavom grubih pora koje se probijaju na površini zavara. U teoriji to znači da ako su otopljeni plinovi prisutni u količinama većim od dozvoljene, višak iz rastopljene elektrode izbacivat će se u obliku mjehurića dok se zavareni spoj hladi. Vodik je jedan od glavnih uzroka pojave poroznosti u zavarenim spojevima. Također ako je metal koji se zavaruje prethodno pocinčan, cinkova para može biti jedan od plinova čije oslobađanje koji uzrokuju poroznost. [42]



*Slika 8.3. Površinska poroznost*

### 8.3.Čvrsti uključci

Čvrsti uključci odnose se na nemetalne čestice zarobljene u zavarenom spoju ili između ohlađene rastopljene elektrode i osnovnog metala. Čvrsti uključci mogu biti prisutni kao izolirane čestice ili kao prekinuti tok rastopljene elektrode. Čvrsti uključci najčešće nisu vidljivi sve dok se ne pojave na zavarenoj površini. Neprihvatljivost zavarenih sklopova najčešće potječe od čvrstih uključaka koji leže na zavarenoj površini ili kao uključci koji svojom veličinom značajno smanjuju presječni presjek zavarenoj spoja. Broj i veličina čvrstih uključaka može se svesti na minimum održavanjem niske viskoznosti zavarenih materijala, smanjenjem brzine skrućivanja otopljene elektrode kao i održavanjem dovoljno visoke temperature zavarenog materijala. Također upotreba elektrode koja sadrži željezni oksid pomoći će održavaju korijena u koji dolazi zavar s nižom površinskom napetošću i profilom zavara pravilnijeg oblika, omogućujući pravilno skrućivanje zavara. [43]



*Slika 8.4. Čvrsti uključci u zavarenom spoju*

### 8.4.Naljepljivanje i nedovoljno provarivanje

Naljepljivanje je karakteristična greška koja nastaje nedostatkom čvrste veze između materijala elektrode i osnovnog materijala. Glavni uzrok pojave naljepljivanja uključuje pogrešan kut ili položaj zavarivačkog pištolja, pogrešnu tehniku kretanja prilikom popunjavanja zavara, prenisku ili previsoku brzinu zavarivanja kao i bilo kakvo onečišćenje osnovnog metala. Većina tih faktora je pod kontrolom



zavarivača. Postoje i drugi faktori poput manje kvalitete materijala elektrode koja se topi ili loše konstrukcije spoja koja doprinosi nepotpunom spajanju zavara. [44]

Nepotpuno provarivanje spoja greška je u zavarivanju koja se može pojaviti kada se zavareni metal ne proteže kroz cijelu debljinu spoja. Takav oblik nepravilnosti događa se iz različitih razloga kao što su:

- Netočni parametri zavarivanja
- Loša konstrukcija spoja
- Neodgovarajući materijal za zavarivanje

Nepotpuno provarivanje spoja greška je u zavarivanju koja može imati ozbiljne posljedice. Obraćajući pažnju da se koriste odgovarajući parametri zavarivanja kao i materijali, te osiguravajući da je konstrukcija spoja ispravna, može se izbjeći krucijalne posljedice i stvoriti čvrst i pouzdan zavar. [45]

## 9. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

U eksperimentalnom dijelu rada proveden je postupak MAG zavarivanja kutnog zavarenog spoja, nakon čega je zavareni spoj ispitan metodama bez razaranja: vizualnim ispitivanjem, ispitivanjem magnetskim česticama te ultrazvučnim ispitivanjem. Objekt ispitivanja (zavareni spoj) dio je nosive konstrukcije (slika 9.1) koja se izrađuje za trafostanicu u tvrtci *Dalekovod proizvodnja d.o.o.* u Zagrebu.

Uz stjecanje praktičnog iskustva, cilj eksperimentalnog dijela rada bio je otkrivanje nepravilnosti/grešaka u zavarenom spoju te donošenje odgovarajućih zaključaka o zavarenom spoju i primijenjenim NDT metodama.

Zavarivanje te ispitivanje zavarenog spoja provedeno je u hali za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju tvrtke *Dalekovod proizvodnja d.o.o.*



Slika 9.1. Nosiva komponenta izrađena za trafostanicu

## 9.1. Postupak MAG zavarivanja

### 9.1.1. Priprema elemenata za zavarivanje

Priprema površine i oblikovanje elemenata za zavarivanje ovisi ponajviše o vrsti zavarivačkog postupka. Priprema za zavarivanje uključuje čišćenje, brušenje te oblikovanje žlijeba zavara. Pravilno provođenje navedenih aktivnosti ima značajan utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja.

Čišćenjem površine uklonile su se sve nečistoće poput prašine, prljavštine, ulja, masti ili produkata korozije koje bi kontaminirale zavareni spoj i dovele do pojave grešaka u zavarenom spoju.

Na slici 9.2. prikazana je pripremljena površina za zavarivanje MAG postupkom. Na istoj slici vidljiva je opća korozija na dijelu elementa koji nije pripremljen za zavarivanje.



*Slika 9.2. Priprema površine i oblikovanje elemenata za zavarivanje*

## 9.1.2. Točkasto zavarivanje spojnih površina

Nakon prethodno kvalitetno počišćene i pobrušene površine, prelazi se na pripojno zavarivanje spojnih elemenata (eng. *Tack welding*). Ovim korakom privremeno se povezuju dva ili više elemenata prije nego li se izradi trajni zavar. Pripojnim zavarivanjem osigurava se stabilnost konstrukcije, što je posebno važno za održavanje točnog položaja i orijentacije elemenata tijekom postupka zavarivanja te postizanje konačne željene geometrije konstrukcije. Na slici 9.3 crvenim krugom označen je jedan od pripojnih zavara.



Slika 9.3. Pripojno zavarivanje spojnih elemenata

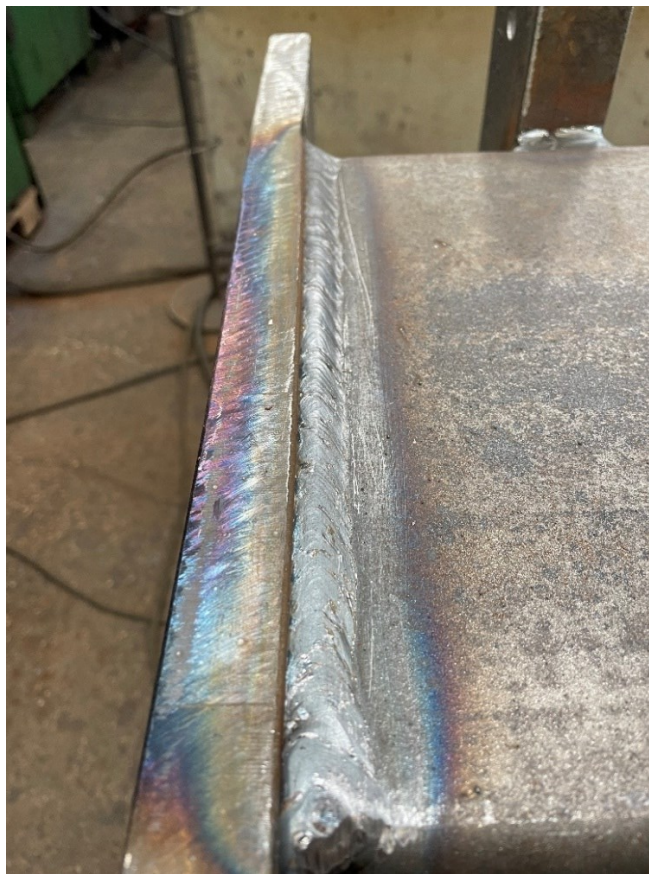


### 9.1.3. Zavarivanje MAG postupkom

Usljedilo je zavarivanje korijena zavara postupnim pomicanjem zavarivačkog alata duž spoja, propisanom brzinom i propisanom udaljenošću pištolja za zavarivanje od elemenata koji se zavaruju. Nakon toga je korijen zavara vizualno ispitan te su brušenjem uklonjene sve uočene nepravilnosti. Budući da je postignuto protaljivanje elemenata koji se spajaju, nastavilo se sa zavarivanjem popune u više prolaza, sve dok se nije postigla tražena dimenzija i geometrija zavara.

Za zavarivanje je korišten elektrolučni MAG postupak uz primjenu dodatnog materijala – taljive žice EZ SG2, promjera 1,2 mm, proizvođača *Elektroda Zagreb*, u zaštiti aktivne mješavine plina (M21 82% Ar, 18% CO<sub>2</sub>).

Nakon zavarivanja, zavareni spoj ostavljen je na hlađenju do sobne temperature prirodnim putem, što je prikazano na slici 9.4.



*Slika 9.4. Konačni izgled zavrenog spoja*

## 9.2. Vizualno ispitivanje

Za vizualno ispitivanje korijena zavarenog spoja korišten je videoskop *GIC 120 Professional*, proizvođača *Bosch*, s ciljem dobivanja jasne, digitalne slike površine korijena zavarenog spoja, što nije moguće dobiti direktnim vizualnim ispitivanjem.

Vizualnom ispitivanju zavarenog spoja pristupilo se kroz „glavu“ nosive konstrukcije u koju se pritom gurala savitljiva cijev na vrhu koje se nalazi kamera s lećom promjera 8,5 mm (slika 9.5).



*Slika 9.5 Vizualna inspekcija unutarnje strane zavara korištenjem videoskopa „BOSCH Professional GIC 120“*

Na slici 9.6 prikazani su rezultati vizualnog ispitivanja koji ukazuju na postignutu potpunu penetraciju u korijenu zavarenog spoja (provar). Prskotine vidljive na istoj slici tragovi su prskanja taljive žice prilikom MAG zavarivanja i ne utječu na kvalitetu zavarenog spoja.



*Slika 9.6. Rezultati ispitivanja videoskopom*

### **9.3. Ispitivanje fluorescentnim magnetskim česticama**

Ispitivanje fluorescentnim magnetskim česticama provedeno je sa strane lica zavarenog spoja. Za ispitivanje su korištene mokre fluorescentne magnetske čestice u sprej dozi proizvođača *Magnaflux* te UV LED lampa proizvođača *Labino AB*. Zavareni spoj magnetiziran je pomoću elektromagnetskog jarma proizvođača *Magnaflux*. Na slici 9.7 prikazana je oprema za ispitivanje.

Prema normi HRN EN ISO 3059, pri ispitivanju fluorescentnim magnetskim česticama osvjetljenje ispitne površine bijelim svjetlom mora biti manje od 20 lx.





*Slika 9.7. Oprema za ispitivanje magnetskim česticama*

Nakon adekvatne pripreme opreme za ispitivanje magnetskim česticama pristupilo se ispitivanju zavarenog spoja.

Zavareni spoj ispitivan je kontinuiranom tehnikom, uz istovremenu magnetizaciju i nanošenje fluorescentnih magnetskih čestica (slika 9.8). Za magnetizaciju elektromagnetskim jarmom primijenila se „cik-cak“ tehnika, koja omogućuje otkrivanje nepravilnosti u zavarenom spoju neovisno o njihovoj orijentaciji, uz preklapanje.





Slika 9.8. Ispitivanje fluorescentnim magnetskim česticama

Ispitivanjem fluorescentnim magnetskim česticama nisu uočene indikacije površinskih nepravilnosti.

#### 9.4. Ultrazvučno ispitivanje

Za ultrazvučno ispitivanje zavarenog spoja korišten je ultrazvučni uređaj *USM 36* proizvođača *Krautkramer* te kosa sonda oznake *MWB 60-4* (kuta sonde  $60^\circ$  te frekvencije ultrazvučnih valova 4MHz), s pripadajućim kabelom. Kao kontaktno sredstvo korišten je gel za ultrazvučno ispitivanje.

Ultrazvučno ispitivanje provedeno je prema normi EN ISO 17640:2018 koja propisuje tehnike, razine ispitivanja i ocjenjivanje zavarenih spojeva. Navedena norma odnosi se na ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva debljine  $\geq 8$  mm.

Prvi korak ispitivanja bio je unasanje odgovarajućih parametara ispitivanja u ultrazvučni uređaj: brzine ultrazvučnih valova (3235 m/s) i frekvencije (4 MHz). Korištena je DGS metoda kalibracije osjetljivosti ispitivanja. Za kalibraciju vremenske osi korišten je blok K2.

U drugom koraku ispitivanja površina uz zavareni spoj temeljito je očišćena te je na nju nanoseno kontaktno sredstvo koje omogućuje prijenos ultrazvučnih valova iz sonde u objekt ispitivanja.

U trećem koraku započeto je ispitivanje prislanjanjem sonde na površinu materijala i kutnim skeniranjem zavarenog spoja. Opseg ispitivanja zavarenog spoja obuhvaćao je metal zavara i 10 mm osnovnog materijala s obje strane zavara. Na slikama 9.9 i 9.10 prikazano je kutno skeniranje zavarenog spoja.



*Slika 9.9. Kutno skeniranje zavarenog spoja*

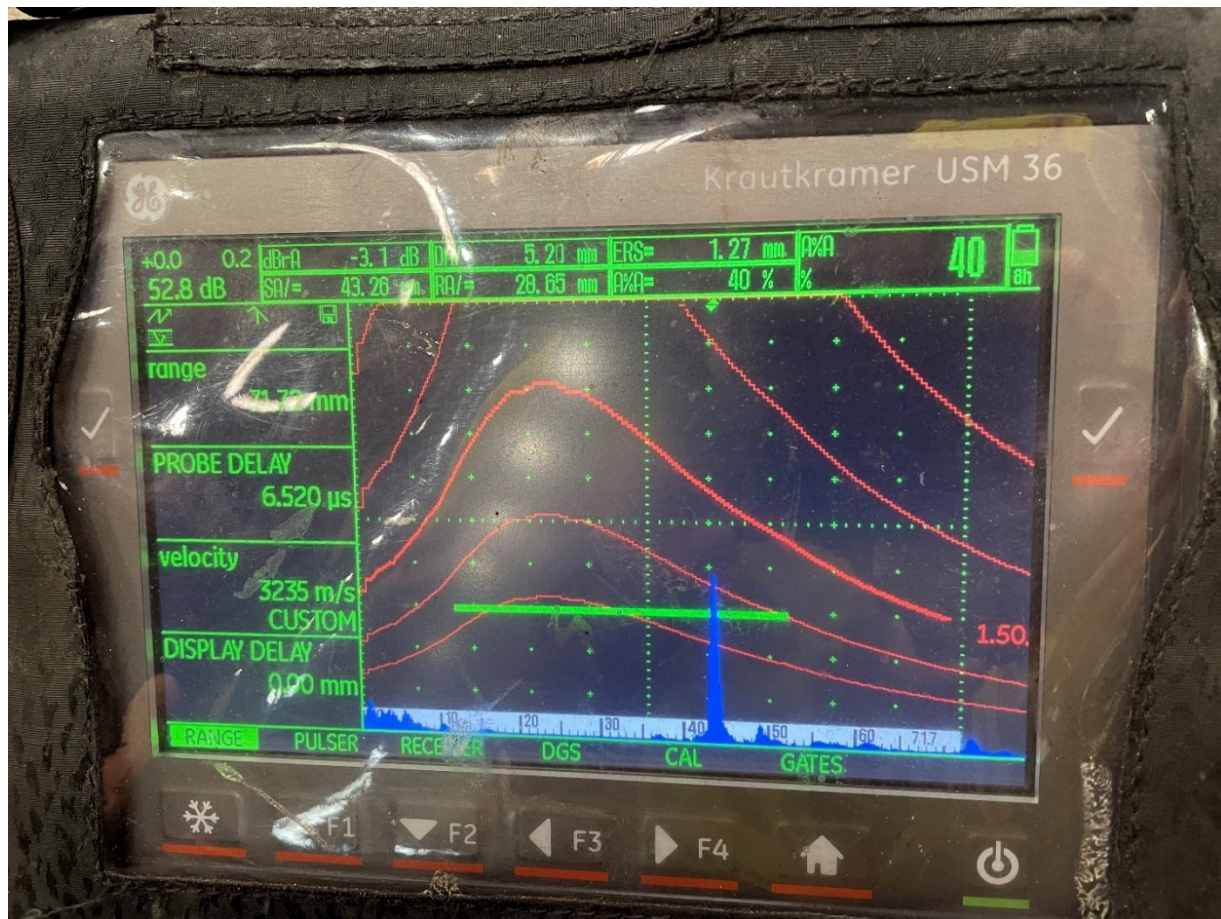




*Slika 9.10. Ultrazvučni uređaj USM 36*

U slučaju kada je u zavarenom spoju prisutna nepravilnost od koje se reflektira ultrazvučni val, na ekranu ultrazvučnog uređaja vidljiv je odjek navedene nepravilnosti (slika 9.11). Budući da je ultrazvučni uređaj prethodno kalibriran, na temelju ultrazvučnog puta moguće je točno odrediti položaj nepravilnosti (dubinu i udaljenost od čela sonde), a na temelju amplitude odjeka veličinu nepravilnosti.

Rezultati ultrazvučnog ispitivanja zavarenog spoja ukazuju na nepravilnost u zavarenom spoju na dubini od 5,2 mm. Na temelju dubine i duljine nepravilnosti zaključeno je da se radi o nedovoljnom provaru korijena zavara.



Slika 9.11. Indikacija nepravilnosti u zavarenom spoju

## 10. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu istraživalo se različite metode NDT-a i njihovu primjenu u detekciji karakterističnih grešaka u zavarenim spojevima. Kroz analizu NDT metoda i praktičnu primjenu, razmatralo se prednosti i ograničenja različitih NDT metoda u identifikaciji nedostataka u zavarima. Također se istraživalo najnovije trendove razvoja NDT metoda i njihovu buduću ulogu u industriji.

Jedan od glavnih zaključaka provedenog istraživanja je da NDT metode igraju ključnu ulogu u osiguravanju integriteta zavarenih spojeva. Ovisno o vrsti zavarenog spoja, materijalu i okolnim uvjetima, odabir odgovarajuće NDT metode može biti ključan za pravilnu detekciju prisutnih nepravilnosti. Također se istaknuo rastući razvoj NDT metoda i donosi se zaključak da će se ove metode kontinuirano poboljšavati kako bi se osigurala veća preciznost, brzina i pouzdanost ispitivanja. Primjena naprednih senzora, metoda dubokog učenja i digitalne tehnologije omogućuje automatizaciju NDT procesa i smanjuje utjecaj ljudske greške.

U eksperimentalnom dijelu rada preispitan je zavareni spoj nosive konstrukcije izrađene za trafostanicu vizualnom, magnetskom i ultrazvučnom metodom. Analizom rezultata ispitivanja detektirana je nepravilnost karakteristična za postupak zavarivanja. Na temelju rezultata ispitivanja donesen je zaključak o pojavi nedovoljnog provara korijena zavara.

Ovaj rad pruža temeljno razumijevanje NDT metoda kao i njihovu primjenu, ali također potiče na daljnje istraživanje i razvoj u navedenom području koje igra ključnu ulogu u očuvanju sigurnosti i pouzdanosti zavarenih spojeva.

## Literatura

- [1] „Kontrola bez razaranja“, s Interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Kontrola\\_bez\\_razaranja](https://hr.wikipedia.org/wiki/Kontrola_bez_razaranja), 13. ožujak 2023.
- [2] „Vizualna kontrola“, s Interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Vizualna\\_kontrola](https://hr.wikipedia.org/wiki/Vizualna_kontrola), 29. listopada 2022.
- [3] „Boroscope“, s Interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/Boroscope>, 20. travanj 2023.
- [4] „Non-Destructive Testing (NDT) – Process, Types & Applications Explained“, s Interneta, <https://fractory.com/non-destructive-testing/>, 07. rujna 2022.
- [5] „Nondestructive testing – Liquid penetrant testing, General Dynamics- Classroom training handbook“, San Diego 1967
- [6] Worman, J.: „Liquid Penetrant Examination“, s Interneta, <https://www.nationalboard.org/index.aspx?pageID=164&ID=374>, 2011.
- [7] „Liquid penetrant inspection“, s Interneta, <https://www.bindt.org/What-is-NDT/Liquid-penetrant-inspection/>, 2013.
- [8] Josip Rajter; „Karakterizacija materijala metodama bez razaranja“, Završni rad, Rijeka, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, 2019.
- [9] „Liquid Penetrant Inspection Process“, s Interneta, <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/PenetrantTest/Introduction/visualacuity.xhtml>, 2014.
- [10] „Common Uses of Liquid Penetrant Inspection“, s Interneta, <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/PenetrantTest/Principles/commonuses.xhtml>, 2014.
- [11] „Magnetic Particle Inspections: A Guide“, s Interneta, <https://www.flyability.com/magnetic-particle-inspection>, 2022.
- [12] „Magnetic Field Indicators“, s Interneta, <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/MagParticle/Equipment/FieldIndicators.xhtml>, 2014.
- [13] „Magnetic Particle Inspection, Yoke“, s Interneta, <https://www.ndt.net/article/az/mpi/yoke.htm>, 2011.

- [14] „Wet Suspension Inspection“, s Interneta, <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/MagParticle/TestingPractices/WetSuspension.xhtml>, 2014.
- [15] dr. Hijazi.A.:“Introduction to Non-Destructive Testing Techniques“, <https://eis.hu.edu.jo/ACUploads/10526/Magnetic%20Particle%20Testing.pdf>, London 2015.
- [16] „Application of Magnetic Particle Testing“, s Interneta, <https://mechtechguru.com/2023/01/application-of-magnetic-particle-testing-mpt/>, 20. siječanj 2023.
- [17]“Advantages and disadvantages of magnetic particle testing“, s Interneta,[http://dr-hatatest.com/NEWS/Advantages and disadvantages of magnetic particle testing.html](http://dr-hatatest.com/NEWS/Advantages_and_disadvantages_of_magnetic_particle_testing.html), 2017
- [18] „Ultrasonic Testing“, s Interneta, [https://www.wermac.org/others/ndt\\_ut.html](https://www.wermac.org/others/ndt_ut.html), 2023
- [19]“A Primer on Ultrasonic Testing“, s Interneta, <https://inspectioneering.com/airs/2018-10-01/7912/a-primer-on-ultrasonic-testing>, London 2018.
- [20] „Internal Rotary Inspection System (IRIS)“, s Interneta, <https://www.eddyfi.com/en/technology/internal-rotary-inspection-system-iris>, 2023.
- [21]“Time of flight diffraction-TOFD-NDT for weld inspection“, s Interneta, <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/time-of-flight-diffraction>, 2023.
- [22] dr. Hijazi.A.:“Introduction to Non-Destructive Testing Techniques“, <https://eis.hu.edu.jo/ACUploads/10526/Ultrasonic%20Testing.pdf>, London 2015.
- [23] „Ultrasonic Piezoelectric Transducers: Advantages and Application“, s Interneta, <https://ndt-kits.com/ultrasonic-piezoelectric-transducers/>, 2022.
- [24]“Transducer Modeling“, s Interneta, <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/EquipmentTrans/transducermodeling.xhtml>, 2014.
- [25] „Data Presentation“, s Interneta, <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.xhtml>, 2014.
- [26] „5 Powerful Applications of Ultrasonic Flaw Detectors“, s Interneta, <https://www.modsonic.com/ultrasonic-flaw-detectors-applications/>, 2023.

[27]“Advantages and Limitations of Ultrasonic Testing“, s Interneta,

<https://www.europeanbusinessreview.com/what-are-advantages-and-limitations-of-ultrasonic-testing/>, 10. ožujak 2022.

[28] „Advantages and Disadvantages of Ultrasonic Testing“, s Interneta,

<https://www.modsonic.com/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-ultrasonic-testing/>, 11. svibanj 2021.

[29]“What is Radiography in NDT“, s Interneta, <https://www.trainingndt.com/what-is-radiography-in-ndt/>, 16. veljače 2023.

[30] ]“A Primer on Radiographic Testing“, s Interneta,<https://inspectioneering.com/airs/2023-03-14/10497/a-primer-on-radiographic-testing>, London 2018.

[31]“Film Radiography“, s Interneta, [https://www.applus.com/global/en/what-we-do/sub-service-sheet/radiographic-testing-\(rt\)-film](https://www.applus.com/global/en/what-we-do/sub-service-sheet/radiographic-testing-(rt)-film), 2019

[32] „What is digital radiography and how does it work“, s Interneta, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/digital-radiography>, 2023

[33] „Real-Time Radiography (RTR)“, s Interneta, <https://www.corrosionpedia.com/definition/7112/real-time-radiography-rtr>, 2023.

[34]“What is computed radiography“, s Interneta, <https://www.duerr-ndt.com/products/computed-radiography/what-is-cr-technology.html>, 2023.

[35]Weaver,G.J.:„Computed Tomography for NDT“, s Interneta, <https://www.qualitymag.com/articles/96388-computed-tomography-for-ndt>, 2023.

[36]“NDT Radiography: Application and Tools“, s Interneta, [https://www.ndt.com.au/ndt-radiography-applications-tools-accurate-testing/#:~:text=Applications%20of%20non%2Ddestructive%20radiography%3A&text=New%20pipelines%20\(including%20bends%20and,internal%20flaws%20in%20existing%20plant.,](https://www.ndt.com.au/ndt-radiography-applications-tools-accurate-testing/#:~:text=Applications%20of%20non%2Ddestructive%20radiography%3A&text=New%20pipelines%20(including%20bends%20and,internal%20flaws%20in%20existing%20plant.,) 2016.

[37]Yanzhi, C.:“Automatisation of Non-Destructive testing process“, s Interneta, [https://brandcentral.dnv.com/fr/gallery/10651/others/a4aea3fdec86483b9142498ccd41f5fd/a4aea3fdec86483b9142498ccd41f5fd\\_low.pdf?utm\\_campaign=GR\\_PUBLICATIONS\\_AUTORESPONDER\\_DNV&utm\\_medium=email&utm\\_source=Eloqua&&](https://brandcentral.dnv.com/fr/gallery/10651/others/a4aea3fdec86483b9142498ccd41f5fd/a4aea3fdec86483b9142498ccd41f5fd_low.pdf?utm_campaign=GR_PUBLICATIONS_AUTORESPONDER_DNV&utm_medium=email&utm_source=Eloqua&&), 2020



- [38] „Wireless ultrasonic sensors for fast detection of defects“, s Interneta, <https://www.bristol.ac.uk/research/impact/wireless-ultrasonic-sensors-fast-defect-detect/>, 2023.
- [39]“Predictive corrosion management (PCM)“, s Interneta, <https://campaigns.sgs.com/en/vr/com/campaigns/predictive-corrosion-management>, 2023
- [40] „The enviromental Benefits of Non-Destructive Testing“, s Interneta, <https://www.linkedin.com/pulse/environmental-benefits-non-destructive-testing-ndt-engineers>, 1. ožujak 2023.
- [41] „Welding Crack“, s Interneta, <https://www.electronicshub.org/welding-crack/>, 28. studeni 2022.
- [42]“Porosity in Welding-Defects/Imperfections in Welds“, s Interneta, <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/defects-imperfections-in-welds-porosity-042#:~:text=Porosity%20is%20the%20presence%20of,surface%20breaking%20pores>, 2023.
- [43]“Slag inclusions- Causes and Remedies“, s Interneta, <https://www.en.hongky.com/slag-inclusion-causes-and-remedies>, 06. svibanj 2019.
- [44]“Weld defects due to incomplete fusion“, s Interneta, ]<https://weldingengineers.co.nz/welding-assistance/weld-defects-due-to-incomplete-fusion/#:~:text=Common%20causes%20of%20incomplete%20fusion,cleaning%20of%20the%20base%20metal.>, 2019.
- [45]“What is incomplete joint penetration“, s Interneta, <https://weldingtech.net/incomplete-joint-penetration/>, 28. Listopad 2019.

## Popis slika

<i>Slika 2.1. Princip rada Boroskopa prilikom ispitivanja.....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 2.2 Prikaz jednog od modela videoscopa za vizualno ispitivanje.....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 3.1. Set za ispitivanje penetrantima u boji.....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 3.2. Set za ispitivanje fluorescentnim penetrantima.....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 3.3. Ilustrativni prikaz zasebnih koraka ispitivanja tekućim penetrantima.....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 4.1. Prikaz orijentacije magnetskog polja.....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 4.2. Prikaz utjecaja diskontinuiteta na curenje magnetskog toka.....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 4.3. Primjena magnetskih čestica na magnetizirani ispitni komad.....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 4.4. „Head shot“ metoda direktnog magnetiziranja ispitnog uzorka.....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 4.5. Uspostavljanje magnetskog polja pomoću ručnih elektroda.....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 4.6. Magnetizacija uporabom elektromagnetskog jarma.....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 4.7. Magnetizacija ispitnog komada primjenom zavojnice.....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 4.8. Ispitivanje mokrim magnetskim česticama osvjetljavanjem UV lampom, prikaz pukotina.....</i>	<i>21</i>
<i>Slika 5.1. Princip rada ultrazvučnog sustava ( sonda i ultrazvuk).....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 5.2. Prikaz montaže sastavnih komponenti LRUT-a na ispitnoj cijevi.....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 5.3. Prikaz pristupa ispitivača internim rotirajućim sustavom inspekcije IRIS.....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 5.4. Ispitivanje vremena difrakcije leta TOFD pomoću dva ultrazvučna pretvornika.....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 5.5. Prikaz ponašanja čestica ovisno o načinu širenja vala kroz materijal.....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 5.6. Refrakcija zvučnog vala kao posljedica razlike akustičnih brzina i dijagram prikaza Snellovom zakona.....</i>	<i>34</i>
<i>Slika 5.7. Prikaz A-Scana.....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 5.8. Prikaz B-scana.....</i>	<i>37</i>

<i>Slika 5.9. Prikaz C-scana.....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 7.1. Ilustracija primjene računalnog pregleda za automatizaciju NDT procesa.....</i>	<i>47</i>
<i>Slika 7.2. Otkrivanje diskontinuiteta na zavarenom spoju primjenom automatiziranog sustava segmentacije slika.....</i>	<i>49</i>
<i>Slika 8.1. Topla pukotina, lice zavarenog spoja.....</i>	<i>53</i>
<i>Slika 8.2. Hladna pukotina, kutni zavar.....</i>	<i>54</i>
<i>Slika 8.3. Površinska poroznost.....</i>	<i>54</i>
<i>Slika 8.4. Čvrsti uključci u zavarenom spoju.....</i>	<i>55</i>
<i>Slika 9.1. Nosiva komponenta izrađena za trafostanicu.....</i>	<i>57</i>
<i>Slika 9.2. Priprema površine i oblikovanje elemenata za zavarivanje.....</i>	<i>58</i>
<i>Slika 9.3. Pripojno zavarivanje spojnih elemenata.....</i>	<i>59</i>
<i>Slika 9.4. Konačni izgled zavrenog spoja.....</i>	<i>60</i>
<i>Slika 9.5 Vizualna inspekcija unutarnje strane zavara korištenjem videoscopa „BOSCH Professional GIC 120“.....</i>	<i>61</i>
<i>Slika 9.6. Rezultati ispitivanja videoskopom.....</i>	<i>62</i>
<i>Slika 9.7. Oprema za ispitivanje magnetskim česticama.....</i>	<i>63</i>
<i>Slika 9.8. Ispitivanje fluorescentnim magnetskim česticama.....</i>	<i>64</i>
<i>Slika 9.9. Kutno skeniranje zavarenog spoja.....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 9.10. Ultrazvučni uređaj USM 36.....</i>	<i>66</i>
<i>Slika 9.11. Indikacija nepravilnosti u zavarenom spoju.....</i>	<i>67</i>

**Sažetak**

Tema ovog završnog rada je „Ispitivanje zavarenog spoja JR.03\_DI.22“. U uvodnom dijelu rada objašnjene su metode ispitivanja bez razaranja, njihova primjena kao i pripadajuće prednosti i nedostaci. Zatim su opisani trendovi razvoja metoda ispitivanja bez razaranja s naglaskom na automatizaciju metoda ispitivanja bez razaranja i karakteristične greške koje se javljaju u zavarenim spojevima. Nakon teorijskog dijela rada opisan je i eksperimentalni dio proveden u suradnji s poduzećem Dalekovod d.o.o. U eksperimentalnom dijelu rada opisan je proces MAG zavarivanja zavarenog spoja „JR.03\_DI.22“ te primjena vizualnog, magnetskog i ultrazvučnog ispitivanja. Uspješno je proveden postupak ispitivanja metodama bez razaranja te je donesen zaključak o uočenim indikacijama.

**KLJUČNE RIJEČI:** pukotine, nedovoljni provar korijena zavara, metode ispitivanja bez razaranja

## Summary

Headline topic of this Master thesis is “testing of welded joint JR.03-DI.22. The introductory part of the Master thesis introduces and explains non-destructive testing methods, the advantages and disadvantages alligned with this method as well as the main use of the meantioned non-destructive method within industry. Furthermore, the trends in the development of non-destructive testing methods were described, with an emphasis on the automation of NDT processes and the characteristic errors that occur in welded joints. What is more, after the theoretical part of the Master thesis, the experimental part was conducted in collaboration with Dalekovod d.o.o. Within this part of the research, metal arc welding process was thoroughly described with the given example on the welded joint JR.03-DI.22. Lastly, applications of visual, ultrasonic and magnetic partical testing were examined and inspected on the previously mentioned welded joing. The examination was successfully conducted with NDT methods and the conclusion was formed based on given indications.

KEY WORDS: 0