

# Nerazorna ispitivanja zavarenih spojeva

---

**Pešut, Domagoj**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*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:190:466371>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-30**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**NERAZORNA ISPITIVANJA ZAVARENIH SPOJEVA**

Rijeka, rujan 2024.

Domagoj Pešut

0069061868

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**NERAZORNA ISPITIVANJA ZAVARENIH SPOJEVA**

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

Rijeka, rujan 2024.

Domagoj Pešut

0069061868

Rijeka, 05.03.2024.

Zavod: Zavod za inženjerstvo materijala  
Predmet: Ispitivanje materijala i analiza loma

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Domagoj Pešut (0069061868)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva (2100)  
Modul: Industrijsko inženjerstvo i menadžment (2114)

Zadatak: **Nerazorna ispitivanja zavarenih spojeva / Non-destructive testing of welded joints**

### 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. Opisati postupak ispitivanja, korištenu opremu i pribor te prikazati rezultate ispitivanja. Dati odgovarajuće zaključke.

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

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

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

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:  
izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## IZJAVA

Ja, Domagoj Pešut, izjavljujem da sam diplomski rad pod nazivom „Nerazorna ispitivanja zavarenih spojeva“ izradio samostalno, primjenjujući stečeno znanje tijekom studija te uz pomoć literature i izvora navedenih na kraju rada. Rad je izrađen pod stručnim vodstvom mentorice izv. prof. dr. sc. Sunčane Smokvina Hanza.

Domagoj Pešut

0069061868

---

(potpis)

## **ZAHVALA**

Srdačno se zahvaljujem svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Sunčani Smokvina Hanza na odvojenom vremenu i pomoći tijekom pisanja diplomskog rada. Također, zahvaljujem firmi LBD d.o.o. koja mi je omogućila izvođenje eksperimentalnog dijela rada. Posebno zahvaljujem svojoj obitelji koja je cijelo vrijeme bila uz mene i pružala mi veliku podršku.

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O ISPITIVANJU BEZ RAZARANJA.....	2
2.1. Definicija i primjena.....	2
2.2. Povijest.....	3
2.3. Prednosti i nedostaci ispitivanja bez razaranja.....	5
3. VIZUALNA METODA ISPITIVANJA.....	6
3.1. Postupak vizualnog ispitivanja.....	6
3.2. Oprema za vizualno ispitivanje.....	7
3.3. Područje primjene.....	8
3.4. Prednosti i nedostaci vizualne metode.....	9
4. ISPITIVANJE TEKUĆIM PENETRANTIMA.....	10
4.1. Postupak ispitivanja tekućim penetrantima.....	11
4.2. Vrste penetranta i metode uklanjanja.....	12
4.3. Prednosti i nedostaci ispitivanja tekućim penetrantima.....	14
4.4. Područje primjene.....	15
5. ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE.....	16
5.1. Vrste ultrazvučnih valova.....	17
5.2. Tehnike ultrazvučnog ispitivanja.....	18
5.2.1. Tehnika prozvučavanja.....	18
5.2.2. Tehnika odjeka.....	19
5.3. Prikaz nepravilnosti.....	19
5.4. Oprema za ultrazvučno ispitivanje.....	21
5.5. Područje primjene ultrazvučnog ispitivanja.....	23
5.6. Prednosti i nedostaci.....	23
6. ISPITIVANJE MAGNETSKIM ČESTICAMA.....	25
6.1. Princip ispitivanja magnetskim česticama.....	26
6.2. Postupak ispitivanja.....	27
6.3. Oprema i pribor za ispitivanje magnetskim česticama.....	28
6.4. Prednosti i nedostaci.....	31
7. RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE.....	32
7.1. Princip radiografije.....	32
7.2. Priroda rendgenskih zraka i gama zraka.....	33
7.3. Izvor zračenja.....	34

7.3.1. Izvor rendgenskih zraka .....	34
7.3.2. Izvor gama zraka .....	36
7.4. Radiografski film .....	36
7.5. Postupak radiografskog ispitivanja .....	38
7.6. Tehnike radiografskog ispitivanja .....	39
7.7. Područje primjene .....	40
7.8. Prednosti i nedostaci radiografskog ispitivanja .....	40
8. KARAKTERISTIČNE GREŠKE U ZAVARENIM SPOJEVIMA .....	42
8.1. Pukotine u zavarenim spojevima .....	42
8.2. Poroznost u zavarenim spojevima .....	43
8.3. Čvrsti ključci .....	44
8.4. Naljepljivanje i nedovoljni provar .....	45
8.5. Pogreške oblika zavara .....	45
9. TRENDOVI RAZVOJA METODA ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA .....	46
10. EKSPERIMENTALNI RAD .....	48
10.1. Ispitni uzorak .....	48
10.2. Ispitna oprema .....	49
10.2.1. Rendgenski uređaj .....	49
10.2.2. Radiografski film .....	50
10.2.3. Indikator kvalitete radiograma (IKR) .....	50
10.2.4. Sustav za obradu filma .....	51
10.2.5. Iluminator .....	51
10.2.6. Denzitometar .....	52
10.3. Postupak ispitivanja .....	53
10.3.1. Ispitivanje atestne ploče .....	53
10.3.2. Obrada radiografskog filma .....	56
10.3.3. Analiza radiograma .....	57
10.4. Rezultati ispitivanja .....	60
11. ZAKLJUČAK .....	62
LITERATURA .....	63
POPIS SLIKA .....	67
POPIS TABLICA .....	69
SAŽETAK .....	70
SUMMARY .....	71



# 1. UVOD

U današnje vrijeme svi proizvodi prolaze kroz učestale kontrole kvalitete zbog osiguravanja sigurnosti i funkcionalnosti. Kod industrija poput zrakoplovstva, brodogradnje, energetike i građevinarstva, potrebne su učestale kontrole kvalitete. Kontinuirano ispitivanje materijala od izuzetne je važnosti jer posljedice uzrokovane greškama u nekim materijalima ili strukturama mogu biti katastrofalne. Postoji mnogo različitih vrsta ispitivanja kojima materijal može biti podvrgnut. Neka od tih ispitivanja su destruktivne prirode, što znači da oštećuju materijal prilikom ispitivanja. S druge strane postoje i nerazorne metode ispitivanja (eng. Non-destructive testing, NDT), koje omogućuju procjenu kvalitete materijala bez uništavanja ili oštećivanja, što je ključno za očuvanje funkcionalnosti strukture.

Dosadašnja istraživanja ukazuju na značajne prednosti nerazornih metoda u održavanju visokih standarda kvalitete, ali i na određene izazove, poput točnosti detekcije i interpretacije rezultata. Zbog brzog tehnološkog napretka, kontinuirano se razvijaju nove tehnike i alati za ispitivanje, što otvara mogućnosti za daljnja poboljšanja u ovom području.

U teorijskom dijelu diplomskog rada analizirat će se metode ispitivanja bez razaranja. Detaljno će biti opisani postupci ispitivanja, te će se navesti potrebna oprema i pribor. Osim toga, biti će navedeni prednosti i nedostaci, kao i područje primjene u različitim industrijskim sektorima. Cilj teorijskog dijela je pružiti sveobuhvatnu teorijsku osnovu koja će kasnije poslužiti kao podloga za izvođenje eksperimentalnog dijela rada.

U eksperimentalnom dijelu rada, teorijska saznanja vezana za radiografsko ispitivanje bit će primijenjena na konkretnu atestnu ploču. Detaljno će se opisati postupak ispitivanja, te će se analizirati dobiveni rezultati. Na temelju dobivenih rezultata donijeti će se odgovarajući zaključak.

## 2. OPĆENITO O ISPITIVANJU BEZ RAZARANJA

### 2.1. Definicija i primjena

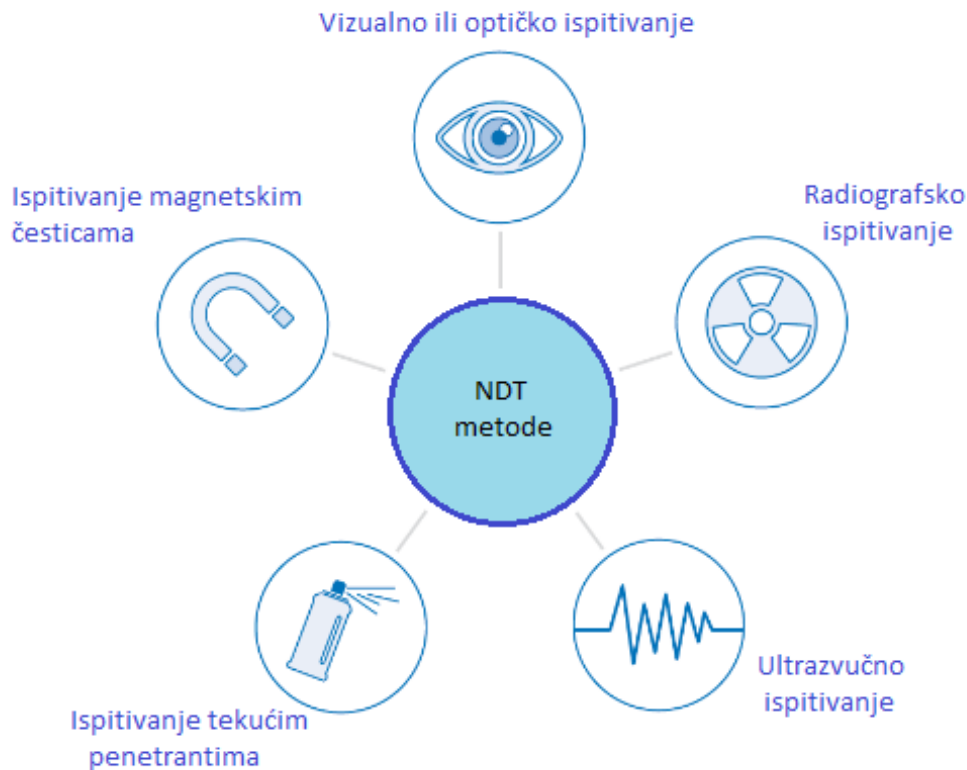
Ispitivanje bez razaranja je skup metoda ispitivanja i analize koje se koriste za procjenu svojstava materijala, komponenti ili sustava bez nanošenja štete. Ove metode omogućuju otkrivanje nedostataka poput pukotina, šupljina, uključaka i poroznosti. Znanstvenici i inženjeri svjesni su da nijedan materijal ne može biti apsolutno savršen. Moguće je samo minimizirati količinu nedostataka ili smanjiti njihovu veličinu. [1]

Kao tehnologija, NDT je doživjela značajan rast u posljednjih 50-ak godina. Danas se smatra jednom od najbrže rastućih tehnologija s aspekta jedinstvenosti i inovacija. Učestala poboljšanja i modifikacije opreme, uz temeljitije razumijevanje materijala, doprinijeli su razvoju tehnologije koja je vrlo značajna i koja je našla široku primjenu i prihvaćenost u mnogim industrijama. Ispitivanje bez razaranja se primjenjuje u različitim industrijama, uključujući proizvodnju, građevinarstvo, zrakoplovstvo, automobilsku industriju i druge, kako bi se osigurala pouzdanost i sigurnost kritičnih komponenti i struktura. Svaka od navedenih industrija koristi različite metode i tehnologije za ispitivanje unutarnjih i vanjskih karakteristika materijala i komponenti. [2]

Na slici 2.1. prikazane su NDT metode koje se najčešće koriste kod ispitivanja. Među tim metodama nalaze se ultrazvučno ispitivanje (UT), radiografsko ispitivanje (RT), ispitivanje magnetskim česticama (MT), ispitivanje tekućim penetrantima (PT) i vizualno ispitivanje (VT). Svaka od ovih metoda ima svoje jedinstvene principe i primjene, što ih čini prikladnima za određene materijale i vrste nedostataka.

Metode ispitivanja bez razaranja kreću se od jednostavnijih do složenijih, ovisno o potrebama i specifičnostima ispitivanja. Vizualno ispitivanje je najjednostavnija i najosnovnija metoda koja se koristi za otkrivanje očitih nesavršenosti na površinama ispitivanog uzorka. Ispitivanje se može provest golim okom ili uz pomoć optičkih pomagala. Ukoliko su površinske nesavršenosti nevidljive oku tada se odabire penetrantska ili magnetska metoda. Ako se pronađu ozbiljne površinske nesavršenosti, često nema smisla prelaziti na složenija ispitivanja unutrašnjosti ultrazvukom ili radiografijom. [1]

Osim već nabrojanih metoda ispitivanja, postoje i druge metode koje se koriste samo za specijalizirane primjene i stoga su ograničene u upotrebi. Neke od tih metoda su ispitivanje akustičkom emisijom, termografsko ispitivanje, ispitivanje rezonantnom frekvencijom, ispitivanje curenjem, ispitivanje difuzijom vodika, te mnoge druge.



Slika 2.1. Najčešće korištene NDT metode [3]

## 2.2. Povijest

Nemoguće je odrediti točno vrijeme koje bi ukazivalo na početak provođenja nerazornog ispitivanja kakvo danas poznajemo. Prije 1920-ih godina izraz “NDT” još nije dobio značenje niti je našlo mjesto u jeziku inženjerstva. Bilo je mnogo metoda ispitivanja, ali NDT kao takvo u to vrijeme nije postojalo. Većina metoda koje se danas koriste pojavile su se tek krajem 1930-ih i početkom 1940-ih. Veliki utjecaj na razvoj današnjih metoda imale su aktivnosti tijekom Drugog svjetskog rata. Prije Drugog svjetskog rata, inženjeri su se oslanjali na neuobičajeno visoke sigurnosne faktore, koji su bili projektirani ili ugrađeni u mnoge proizvode tog vremena, poput tlačnih posuda i drugih složenih komponenti. Porast nesreća i kvarova povezanih s neadekvatnostima proizvoda doveo je zabrinutost za kvalitetu sustava i komponenti u prvi plan. [2]

Neki od ključnih događaja u kronologiji NDT-a prikazani su u Tablici 2.1.

*Tablica 2.1. Ključni događaji u razvoju NDT-a [2]*

Godina (približno)	Događaj
1895.	Wilhelm Conrad Röntgen postaje prva osoba koja je promatrala i otkrila X-zrake. To otkriće postavilo je temelj za radiografsko ispitivanje, koje je jedno od prvih i najvažnijih metoda ispitivanja bez razaranja.
1917.	Počinju se koristiti X-zrake za ispitivanje metala, posebno u vojnoj industriji za provjeru ispravnosti topovskih cijevi.
1920-e	Dolazi do razvijanja osnovne metode ultrazvučnog ispitivanja, ali još nije u širokoj upotrebi.
1930-e	Metoda ispitivanja vrtložnim strujama počinje se koristiti za detekciju pukotina i nehomogenosti u metalima.
1935.	Prva primjena magnetskih čestica za otkrivanje pukotina na površini feromagnetnih materijala.
1942.	Prve primjene ultrazvučne metode ispitivanja za detekciju unutarnjih nepravilnosti.
1950-e	Početak široke primjene ultrazvučnog ispitivanja u industriji.
1960-e	Razvijaju se prve metode akustične emisije koje omogućavaju praćenje pucanja i deformacija u realnom vremenu.
1963.	Razvijaju se prve metode ispitivanja penetrantima za otkrivanje površinskih pukotina u neporoznim materijalima.
1970-e	Započinje razvoj računalne tomografije (CT), koja omogućava trodimenzionalnu analizu unutarnjih struktura objekata.
1980-e	Razvijaju se digitalni radiografski sustavi koji omogućavaju bržu i precizniju analizu.
1990-e	Razvoj fazno pomičnih rešetki u ultrazvučnom ispitivanju.
2000-e	Početak primjene robotskih sustava za ispitivanje bez razaranja, omogućavajući ispitivanje u teže dostupnim područjima.
2010-e	Integracija NDT-a s umjetnom inteligencijom (AI)

### 2.3. Prednosti i nedostaci ispitivanja bez razaranja

Ispitivanje bez razaranja postalo je ključna praksa u raznim industrijama, nudeći niz prednosti koje doprinose boljoj učinkovitosti, sigurnosti i kvaliteti. Korištenjem naprednih tehnika za procjenu materijala i komponenti bez izazivanja štete, NDT je transformirao način na koji industrije funkcioniraju.

Neke od prednosti ispitivanja bez razaranja su:

- glavna prednost je ta što se prilikom ispitivanja materijal ili komponenta ne oštećuju, što znači da se može nakon ispitivanja ponovo koristiti u daljnjoj upotrebi ili proizvodnji.
- ispitivanja se mogu provoditi izravno na proizvodu ili konstrukciji bez potrebe za demontažom ili transportom, te je moguće provesti 100%-tnu kontrolu.
- objekt je moguće ispitati više puta, koristeći više različitih metoda.
- u većini metoda oprema je prijenosna, čime je olakšan rad na terenu.

Nedostaci ispitivanja bez razaranja su rijetki ali postoje. Neki od tih problema su:

- metode poput radiografije ili ultrazvuka zahtijevaju velika financijska ulaganja.
- kod pojedinih metoda zahtijeva se pojačana zaštita na radu.
- potrebno je školovano osoblje zbog interpretacije rezultata koji mogu biti složeni.
- neke metode ispitivanja imaju ograničenu sposobnost otkrivanja specifičnih vrsta nepravilnosti, što ovisi o materijalu i geometriji komponente.
- učestali troškovi povezani s održavanjem i kalibracijom opreme za ispitivanje bez razaranja, kako bi se ispitivanja ispravno provela i rezultati analizirali. [3,4]

### 3. VIZUALNA METODA ISPITIVANJA

Vizualno ispitivanje jedna je od najosnovnijih i najtemeljitijih metoda nerazornog ispitivanja, te se obično prvo razmatra prije primjene sofisticiranijih i skupljih metoda. Ovom metodom ispitivanje se vrši na površini objekta kako bi se uočile površinske nepravilnosti. U prošlosti se vizualno ispitivanje smatralo vrlo subjektivnim i pružalo je malo ili nimalo tiskane dokumentacije. Rezultati ispitivanja ovisili su o više faktora, kao što su obučenosť ispitivača, čistoća i stanje ispitnog objekta, kvaliteta optičkog instrumenta i ispravnom osvjetljenju ispitivanog objekta. Ti su čimbenici i danas važni, no oprema kojom se provodi ispitivanje postala je sofisticiranija. Na slici 3.1. prikazano je ispitivanje zavara vizualnom metodom.

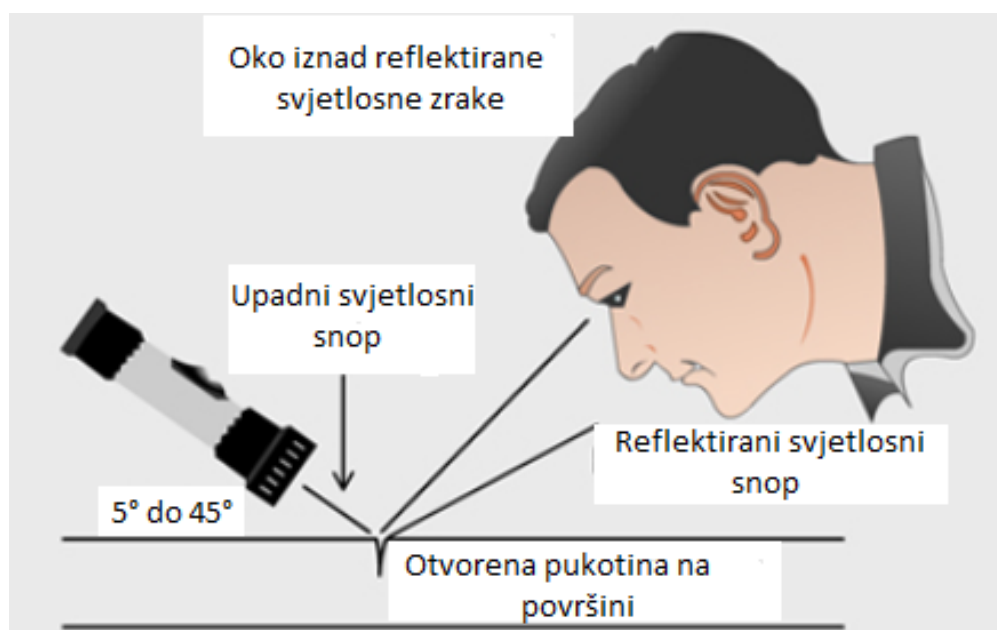


*Slika 3.1. Vizualna metoda ispitivanja [5]*

#### 3.1. Postupak vizualnog ispitivanja

Vizualno ispitivanje može se provesti brzo i primjenjivo je na sve vrste materijala, te zahtijeva niska ulaganja. Ova metoda ispitivanja često djeluje kao predinspekcijska tehnika za određivanje kvalitete izrade proizvoda, prije nego što se ispita korištenjem drugih nerazornih metoda. Tijekom proizvodnog procesa često se provodi vizualno ispitivanje jer ispitivač može u ranoj fazi prepoznati problem i spriječiti moguću grešku koja bi u konačnici mogla utjecati na funkcionalnost proizvoda.

Prije samog ispitivanja potrebno je pripremiti opremu i očistiti površinu koja će se pregledavati. Vizualno ispitivanje započinje temeljnim pregledom površine ispitivanog uzorka. Ispitivanjem se traže vidljive nepravilnosti na površini, poput pukotina, oštećenja, korozije i drugih nesavršenosti. Ispitivani uzorak najprije se pregledava golim okom, kao što je prikazano na slici 3.2., pri čemu je rasvjeta ključna. Potrebno je obasjati uzorak svjetlom koje je obično u području vidljive svjetlosti elektromagnetskog spektra. Količina svjetlosti koja pada na uzorak može se izmjeriti mjeracom svjetlosti. Ako površinske nepravilnosti nisu vidljive golim okom, osjetljivost ispitivanja može se povećati uporabom povećala ili mikroskopa. Nakon što se ispitivanje provede, potrebno je dokumentirati pronađene nepravilnosti. Dokumentacija mora sadržavati lokaciju, vrstu i veličinu nepravilnosti. [6]



Slika 3.2. Vizualno ispitivanje pomoću oka [7]

### 3.2. Oprema za vizualno ispitivanje

Najvažniji NDT alat za vizualno ispitivanje je ljudsko oko zbog svoje izvanredne vizualne percepcije, koja omogućuje prepoznavanje i ispitivanje različitih vizualnih karakteristika problema. Oko može precizno procijeniti veličinu, boju, oblik, svjetlinu, dubinu i teksturu ispitnog uzorka. Za vizualno ispitivanje mogu biti potrebna mehanička i optička pomagala. Mehanička pomagala uključuju uređaje kao što su pomično mjerilo i mikrometar. Ako nije moguć izravan pogled na

ispitivani uzorak, koriste optička pomagala, prikazana na slici 3.3. Uređaji variraju od jednostavnih ogledala do složenih instrumenata poput boroskopa.

Boroskopi su optički instrumenti dizajnirani za daljinsko pregledavanje objekta. U nekim slučajevima, njihova uporaba je neizbježna zbog nemogućnosti približavanja objektu koji se želi pregledati ili zbog opasnosti od topline ili radijacije. Danas se najviše koriste videoskop koji su poznati po tome što nude digitalnu sliku. Videoskop je naprednija vrsta boroskopa koja u svom vrhu sadrži vrlo maleni senzor slike. Video slika se prenosi do zaslona pomoću unutarnjih žica. Glavna prednost videoscopa je u tome što omogućuje da istovremeno nekoliko operatera ili inženjera gleda ekran. [2]



Slika 3.3. Oprema za vizualno ispitivanje [8]

### 3.3. Područje primjene

Vizualno ispitivanje može se primijeniti na sve vrste materijala za otkrivanje površinskih pukotina, praznina, pora te za procjenu hrapavosti površine. Može se koristiti za metrologiju i dimenzionalna mjerenja pomoću mehaničkih mjernih instrumenata. Ova metoda ispitivanja koristi se u brojnim industrijama, a neke od njih su zrakoplovna, prehrambena, naftna i plinska industrija, farmaceutska, te mnogim drugim sektorima koji zahtijevaju rutinske vizualne inspekcije kao dio svojih procesa održavanja. Ispitivač može identificirati opasne nedostatke ili nečistoće koje mogu utjecati na buduću upotrebu proizvoda. Važno je izvršiti testiranje proizvoda prije nego što se puste na tržište. [2]



### 3.4. Prednosti i nedostaci vizualne metode

Među prednostima ove vrste ispitivanja bez razaranja mogu se istaknuti:

- najjeftinija metoda ispitivanja jer nema potrebe za skupom opremom; najčešće se ispitivanje može izvršiti uz pomoć oka ili povećala.
- pouzdana je metoda za osiguravanje visokih standarda kvalitete proizvoda u različitim industrijama.
- omogućuje identifikaciju većih nepravilnosti i općenito ukazuje na moguća mjesta gdje bi se mogle pojaviti nepravilnosti koje treba ispitati drugim metodama nerazornog ispitivanja.

Među ograničenjima i nedostacima ove vrste ispitivanja mogu se istaknuti:

- ograničeno je na otkrivanje površinskih nepravilnosti, dok za provođenje detaljnijih ispitivanja potrebna specijalizirana oprema.
- uspješnost izvođenja ove metode ispitivanja ovisi o iskustvu ispitivača.
- metoda ispitivanja koja je ovisna o uvjetima okoline jer zbog loše rasvjete, magle ili padalina može biti otežana identifikacija nepravilnosti.
- može biti dugotrajno i zahtijevati puno rada ako se izvodi bez korištenja specijalizirane opreme. [9]

#### 4. ISPITIVANJE TEKUĆIM PENETRANTIMA

Ispitivanje tekućim penetrantima jedna je od najstarijih i najjednostavnijih metoda ispitivanja bez razaranja. Ova metoda koristi se za otkrivanje otvorenih površinskih nepravilnosti, kao što su pukotine, poroznost, naslage ili bilo koje druge nepravilnosti koje mogu utjecati na kvalitetu i funkcionalnost ispitivanog predmeta. Metoda ispitivanja tekućim penetrantima popularna je zbog dva glavna čimbenika: relativne jednostavnosti korištenja i fleksibilnosti. Može se koristiti za ispitivanje gotovo bilo kojeg materijala, pod uvjetom da njegova površina nije izuzetno gruba ili porozna. Materijali koji se obično ispituju ovom metodom su metali, staklo, guma, plastika i mnogi keramički materijali.

Krajem 19. stoljeća željeznički inspektori koristili su petrolej i kredu kao sredstva za ispitivanje. Današnje penetrantne tekućine mnogo su sofisticiranije i pažljivo su formulirane kako bi postigle razinu osjetljivosti koju zahtijevaju ispitivači. Razina osjetljivosti može se definirati kao sposobnost tekućine penetranta da otkrije nedostatke u materijalu. Pukotine širine od oko 5  $\mu\text{m}$  mogu se otkriti obojenim penetrantima, dok se pukotine širine od 1 do 2  $\mu\text{m}$  mogu otkriti fluorescentnim penetrantima. [1]

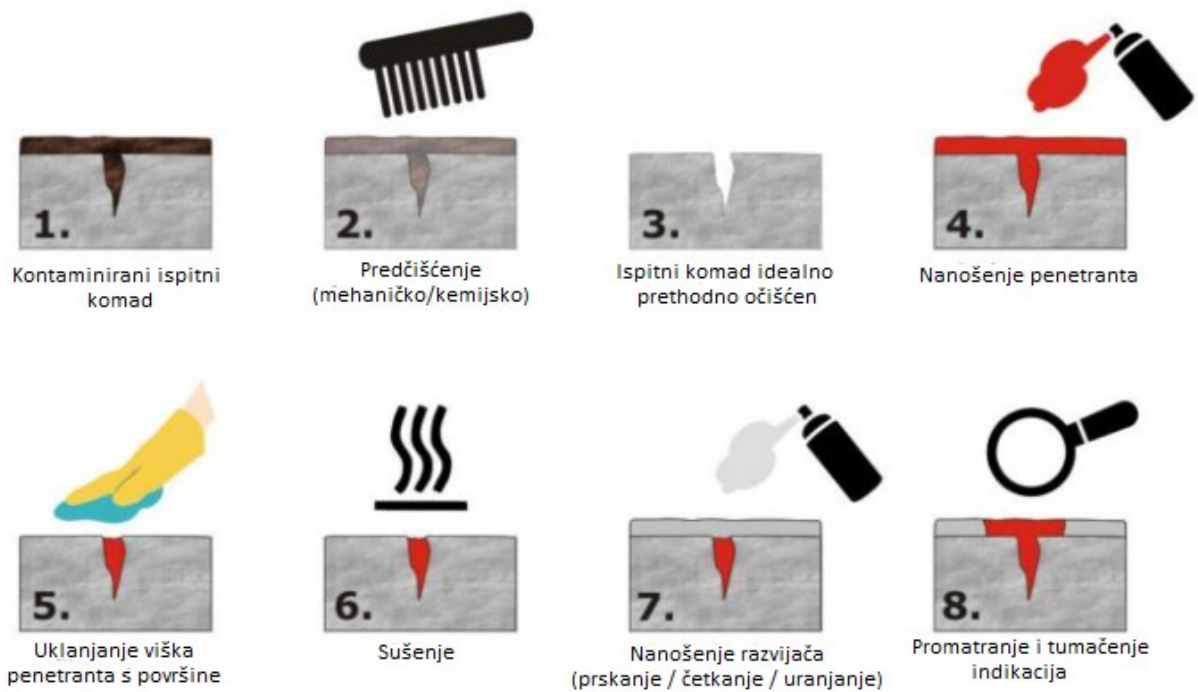


*Slika 4.1. Ispitivanje tekućim penetrantima [10]*

## 4.1. Postupak ispitivanja tekućim penetrantima

Točan postupak ispitivanja tekućim penetrantom može se razlikovati od slučaja do slučaja, ovisno o nekoliko čimbenika kao što su sastav korištenog penetranta, veličina i materijal ispitivane komponente, tip nepravilnosti koji se očekuje u komponenti, te uvjeti i okruženje u kojem se ispitivanje provodi. Međutim, opći koraci prikazani su na slici 4.2. i mogu se sažeti na sljedeći način:

- Čišćenje površine koja se ispituje – potrebno je osigurati da površina na kojoj će se provoditi ispitivanje bude u potpunosti čista. To je potrebno kako bi se spriječile lažne indikacije i otkrile skrivene nepravilnosti.
- Sušenje površine – neophodan korak jer ako iz bilo kojeg razloga pukotine ostanu ispunjene tekućinom, one će spriječiti ulazak penetranta. Treba imati na umu da iako površina može izgledati suha, pukotine i dalje mogu biti ispunjene tekućinom.
- Nanošenje penetranta – nanošenje se vrši pomoću četke, prskanjem ili uranjanjem ispitnog komada u kadu s penetrantom. Vrijeme zadržavanja penetranta na ispitnom komadu može varirati ovisno o temperaturi, vrsti penetranta, prirodi nepravilnosti i materijalu ispitivanog uzorka.
- Uklanjanje viška penetranta – potrebno je ukloniti višak penetranta s površine kako bi se postigao optimalan kontrast i spriječilo stvaranje lažnih indikacija. Uklanjanje se vrši upotrebom krpe ili prskanjem vode. Postoje i posebna sredstva za uklanjanje penetranta koja su u osnovi otapala. Prilikom uklanjanja viška penetranta treba pripaziti da se ne ispere penetrant iz nepravilnosti, te je bolje ostaviti male tragove penetranta na površini nego provesti pretjerano čišćenje.
- Nanošenje razvijaača - razvijaač stvara bijeli premaz koji je u kontrastu s obojenim penetrantom, te izvlači penetrant iz nepravilnosti na površinu filma razvijaača, otkrivajući tako nedostatke.
- Promatranje i tumačenje indikacija – indikacije u razvijaaču postaju vidljive nakon određenog vremena. Za interpretaciju indikacija vrlo je važno promatrati njihove karakteristike u trenutku pojave. Nakon nekog vremena, indikacije mogu prerasti u veće mrlje, što otežava dobivanje karakterističnih informacija o nedostatku. Izuzetno je važno osigurati dobro osvjjetljenje, budući da se sve metode ispitivanja penetrantima oslanjaju na vizualno uočavanje indikacija od strane ispitivača. [1]



Slika 4.2. Postupak ispitivanja tekućim penetrantima [11]

## 4.2. Vrste penetranta i metode uklanjanja

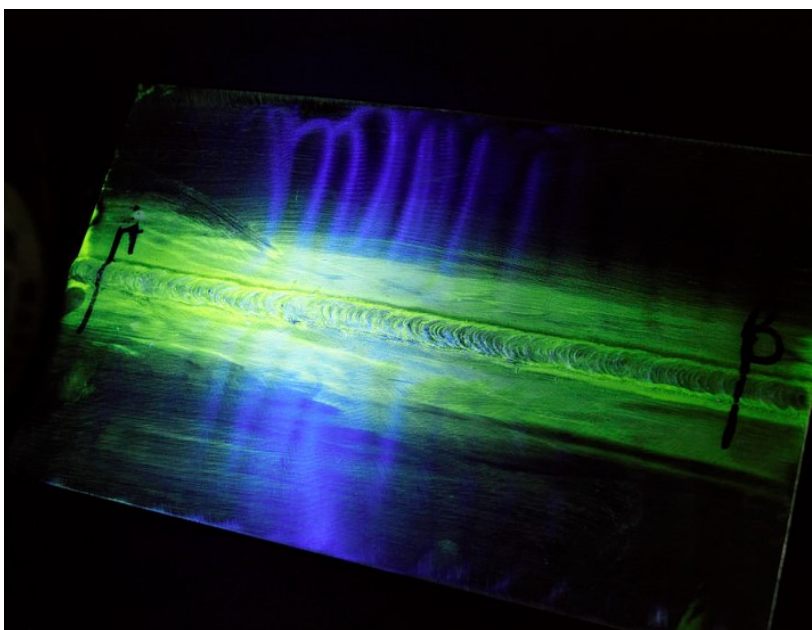
Penetrant je tekućina koja posjeduje jedinstvena svojstva koja joj omogućuju da prodre u male otvore, što je čini posebno prikladnom za upotrebu u otkrivanju površinskih nesavršenosti. Ovisno o uvjetima ispitivanja, mogu se koristiti različite vrste penetranta. Postoje dvije glavne vrste: obojeni penetranti i fluorescentni penetranti.

Obojeni penetranti najčešće su crvene boje jer postižu optimalan kontrast u odnosu na bijelu pozadinu razvijaača. Postupak ispitivanja ne zahtijeva upotrebu ultraljubičastog (UV) svjetla, već je dovoljno samo bijelo svjetlo. Obojeni penetranti, u usporedbi s fluorescentnim penetrantima, imaju nešto nižu osjetljivost, ali su dovoljno učinkoviti za otkrivanje mnogih površinskih nedostataka. Njihova glavna prednost je jednostavna primjena i niska cijena, što ih čini dobrim rješenjem za pregled površina na kojima se traži detekcija očiglednih nesavršenosti. Na slici 4.3. prikazano je nanošenje obojenog penetranta na ispitivanu površinu. [12]



*Slika 4.3. Ispitivanje pomoću obojenog penetranta [13]*

Fluorescentni penetranti sadrže fluorescentne boje koje svijetle pod utjecajem ultraljubičastog (UV) svjetla u tamnim prostorijama. Ova vrsta penetranta nije pogodna za terenska ispitivanja zbog mogućeg utjecaja vanjskog svjetla. Za razliku od obojenih penetranta, fluorescentni penetranti se koriste u industrijama gdje je visoka osjetljivost ispitivanja ključna. Oni omogućuju otkrivanje nesavršenosti na materijalu koje nije moguće vidjeti obojenim penetrantima. Na slici 4.4. prikazano je ispitivanje zavara pomoću fluorescentnog penetranta. [12]



*Slika 4.4. Ispitivanje pomoću fluorescentnog penetranta [14]*

Penetranti obično imaju bazu koja se sastoji od ulja, što znači da ih je potrebno emulgirati. Ovisno o tome kada je došlo do emulgiranja, penetranti se mogu ukloniti pomoću vode, emulgatora ili sredstva za uklanjanje. Sredstvo za uklanjanje obično sadrži neku vrstu alkohola. Penetranti se također mogu klasificirati prema metodi kojom se uklanja višak penetranta s ispitivane površine. Četiri su metode:

1. Metoda A: pranje vodom – najekonomičnija metoda uklanjanja penetranta s ispitivane površine. Penetranti sadrže emulgator te se s površine mogu ukloniti samo uporabom vode.
2. Metoda B: post-emulgirajući, lipofilni - penetrant je topljiv u ulju i reagira s emulgatorom na bazi ulja kako bi omogućio uklanjanje.
3. Metoda C: uklanjanje otapalom – ova metoda ima najveću osjetljivost i koristi se za uklanjanje penetranta s malih površina. Umjesto vode, zahtijeva korištenje otapala za uklanjanje penetranta s ispitivane površine.
4. Metoda D: post-emulgirajući, hidrofilni – koriste emulgator koji je vodotopivi deterdžent i uklanja višak penetranta s površine pranjem vodom. [12]

### **4.3. Prednosti i nedostaci ispitivanja tekućim penetrantima**

Ispitivanje tekućim penetrantima, kao i svaka metoda nerazornog ispitivanja, ima svoje prednosti i nedostatke. Neke od prednosti su:

- visoka osjetljivost koja omogućuje otkrivanje vrlo malih površinskih nepravilnosti.
- ispitivanje ovom metodom je vrlo jednostavno, a rezultati ispitivanja su dostupni u relativno kratkom vremenu.
- mala ograničenja materijala, što znači da se mogu koristiti na metalu, keramici, plastici i drugim neporoznim materijalima.
- mogućnost rutinskog pregleda dijelova složenih geometrijskih oblika.
- za razliku od drugih metoda, ispitivanje tekućim penetrantima je relativno jeftino jer su penetranti i popratna oprema lako dostupni.

Nedostaci ove metode su:

- jedan od glavnih nedostataka ovog ispitivanja je taj da se mogu otkriti samo nepravilnosti koje se probijaju do površine.
- mogu se pregledavati samo materijali s relativno neporoznom površinom.

- nečistoće poput prašine, ulja, boje ili hrđe mogu prekriti nepravilnosti, pa je potrebno provesti predčišćenje.
- kod ispitivanja tekućim penetrantima ispitivač mora imati izravan pristup površini koju pregledava.
- završna obrada površine i hrapavost mogu utjecati na osjetljivost pregleda.
- ova metoda uključuje rukovanje kemikalijama i zahtjeva njihovo pravilno odlaganje. [22]

#### 4.4. Područje primjene

Ispitivanje tekućim penetrantima jedna je od najčešće korištenih metoda nerazornog ispitivanja. Korisna je za širok spektar primjena i industrija. Ova metoda se koristi u:

- zrakoplovnoj industriji za ispitivanje zamornih pukotina u zrakoplovnim komponentama.
- naftnoj i plinskoj industriji za inspekciju spremnika, cjevovoda i zavara.
- proizvodnji za kontrolu kvalitete zavara, otkivaka i drugih komponenti.
- automobilskoj industriji za pregled motora, osovina, zavara i itd.

Osim navedenih industrija, ispitivanje tekućim penetrantima može se koristiti u bilo kojem procesu koji koristi bilo koju vrstu metalnog spajanja, poput zavarivanja. [2]

## 5. ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE

Ultrazvučno ispitivanje je jedna od najčešće korištenih nerazornih metoda jer se primjenjuje na većinu materijala, uključujući metale, polimere, keramike i mnoge druge. U materijal koji se ispituje, uvode se ultrazvučni zvučni valovi visoke frekvencije, nakon čega se detektira i analizira odjek koji izlazi iz uzorka. Većina ultrazvučnih ispitivanja provodi se na frekvencijama od 0,5 do 20 MHz, što je znatno iznad raspona ljudskog sluha. Na slici 5.1. prikazano je ispitivanje pomoću ultrazvučnog uređaja.

Ultrazvučno ispitivanje ima superiornu moć prodiranja u usporedbi s radiografijom i može otkriti nedostatke duboko u ispitnom uzorku. Ova metoda ispitivanja ima široku primjenu u inženjerstvu i koristi se za otkrivanje nedostataka, mjerenje dimenzija, karakterizaciju materijala i mnoga druga ispitivanja. Ultrazvučno ispitivanje je idealno za praćenje korozije u cjevovodima i ključna komponenta bilo kojeg programa prediktivnog održavanja. Mnogi ultrazvučni detektori grešaka sadrže trigonometrijsku funkciju koja omogućuje brzo i precizno lociranje grešaka tijekom ispitivanja ultrazvučnim valovima. Određeni uređaji za ultrazvučno ispitivanje mogu prilagoditi mjerenje ovisno o uvjetima površine materijala. [15]

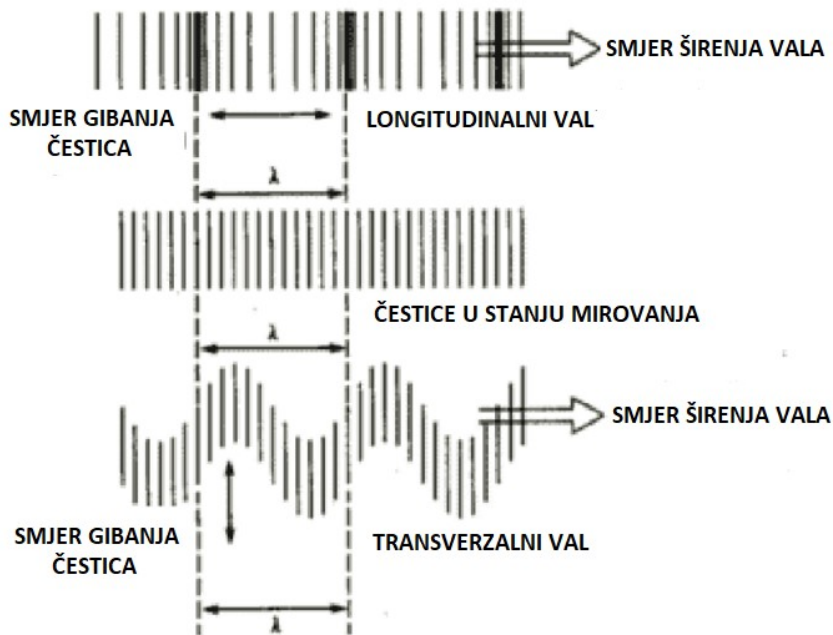


Slika 5.1. Ultrazvučno ispitivanje [16]



## 5.1. Vrste ultrazvučnih valova

U čvrstim tijelima, zvučni valovi mogu se širiti na četiri glavna načina, koji se temelje na načinu na koji čestice osciliraju. Zvuk se može širiti kao longitudinalni valovi, transverzalni valovi, površinski valovi i u tankim materijalima kao pločasti valovi. Longitudinalni i transverzalni valovi su dva načina širenja koja se najčešće koriste u ultrazvučnom ispitivanju. Kretanje čestica odgovorno za širenje longitudinalnih i transverzalnih valova prikazano je na slici 5.2.



Slika 5.2. Longitudinalni i transverzalni valovi [18]

Kod longitudinalnih valova, oscilacije se događaju u uzdužnom smjeru ili smjeru širenja vala. Budući da su kompresijske i dilatacijske sile aktivne u tim valovima, oni se također nazivaju kompresijskim valovima. Ponekad se nazivaju i valovima gustoće jer gustoća čestica varira dok se kreću. Longitudinalni valovi mogu se generirati u tekućinama, kao i u čvrstim tijelima, jer se energija prenosi kroz atomsku strukturu serijom kompresijskih i ekspanzijskih pokreta. Oni se najčešće koriste u ultrazvučnom ispitivanju zbog jednostavne generacije i detekcije.

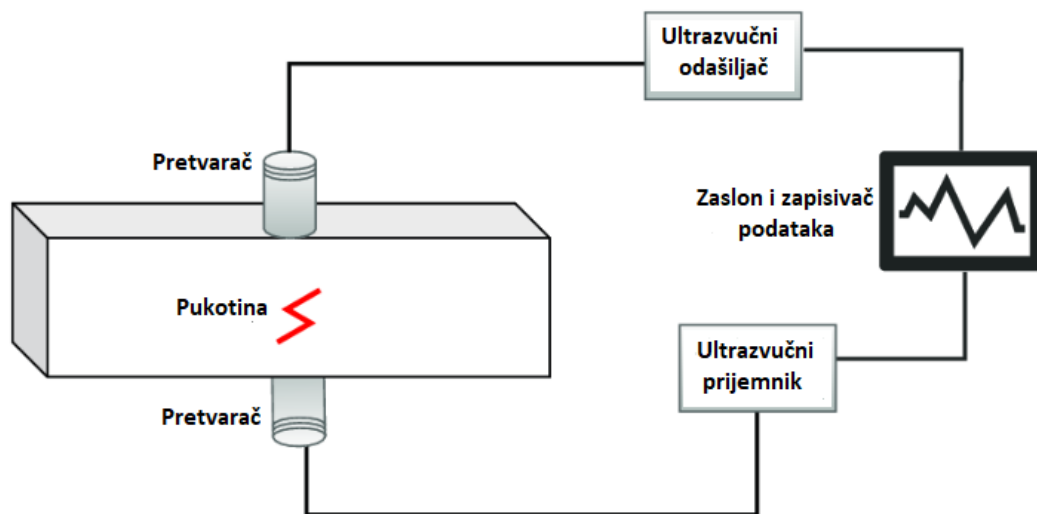
Kod transverznog ili posmičnog vala, čestice osciliraju pod pravim kutom ili poprečno u odnosu na smjer širenja vala. Za učinkovito širenje, transverzalni valovi zahtijevaju akustički čvrst materijal, stoga se ne šire učinkovito u materijalima poput tekućina ili plinova. U usporedbi s longitudinalnim valovima, transverzalni valovi su relativno slabi. Obično se generiraju u materijalima koristeći dio energije iz longitudinalnih valova. [17]

## 5.2. Tehnike ultrazvučnog ispitivanja

Osnovne tehnike ultrazvučnog ispitivanja su tehnika prozvučavanja i tehnika odjeka. Osim njih, postoje i druge tehnike koje se manje koriste, kao što su imerzijska tehnika, višepretvornička tehnika (PAUT) i tehnika difrakcije (TOFD). Svaka od ovih navedenih tehnika ima specifične prednosti i primjene, ovisno o tipu ispitivanog materijala i prirodi nepravilnosti koja se traži.

### 5.2.1. Tehnika prozvučavanja

Ultrazvučni valovi koji dolaze do granice između dva medija djelomično se reflektiraju natrag u medij iz kojeg su došli, a djelomično se prenose u drugi medij. Tehnika ultrazvučnog ispitivanja koja koristi preneseni dio ultrazvučnih valova je tehnika prozvučavanja (eng. Through Transmission Method).



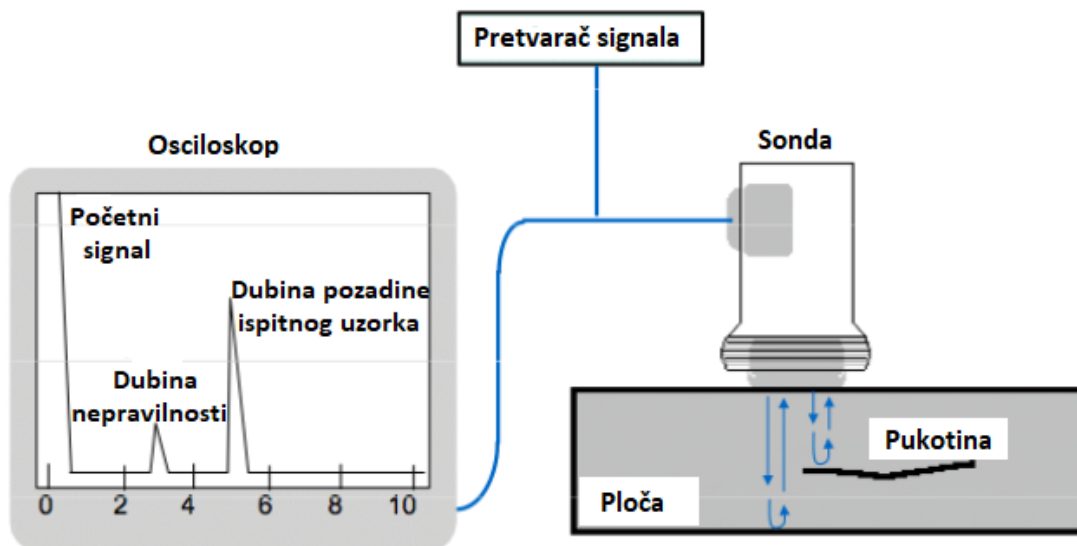
Slika 5.3. Princip ispitivanja tehnikom prozvučavanja [19]

U ovoj metodi koriste se dvije ultrazvučne sonde. Jedna je sonda odašiljača, a druga je prijemna sonda. Kao što je prikazano na slici 5.3., ove sonde nalaze se na suprotnim stranama ispitnog uzorka. Prisutnost nepravilnosti u ispitnom uzorku prikazuje se smanjenjem amplitude signala, dok kod velikih nedostataka signal može potpuno nestati. Ova metoda ispitivanja ne daje informacije o veličini i mjestu nepravilnosti. [17]

### 5.2.2. Tehnika odjeka

Ovo je tehnika koja se najčešće koristi u ultrazvučnom ispitivanju materijala. Za razliku od prethodne, ova tehnika koristi odjek prenesenih ultrazvučnih valova. Princip izvođenja ove tehnike prikazan je na slici 5.4. Na istoj strani ispitivanog uzorka nalazi se sonda za odašiljanje i prijem odjeka. Generator impulsa proizvodi električni impuls odgovarajuće frekvencije na kojoj pretvarač radi. Ultrazvučni pretvarač pretvara električni impuls u akustični signal koji prolazi kroz ispitni uzorak. Ako je u ispitnom uzorku prisutna nepravilnost tada će odjek biti prikazan na zaslonu ispitnog uređaja. Kod ove tehnike ispitivanja može se točno odrediti položaj nepravilnosti pomoću ispitnog uređaja koji je kalibriran tako da prikazuje razliku u udaljenosti između vremena dolaska odjeka u odnosu na odjek stražnje strane uzorka. Kada ispitivanje sa sondama pod pravim kutem nije moguće, problem se može riješiti upotrebom kutne sonde.

Ova tehnika koristi se za detekciju unutrašnjih grešaka, mjerenje debljine materijala i ispitivanje zavarenih spojeva. Glavna prednost tehnike odjeka je što se lako može automatizirati, jednostavna je za rad i brzo se mjeri. [17]

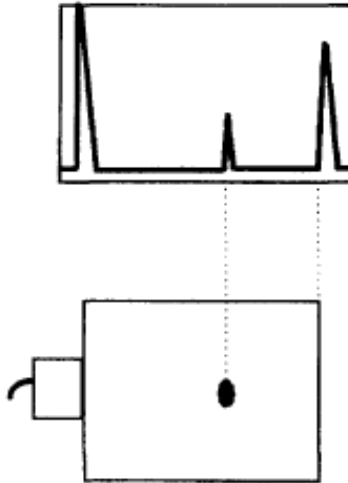


Slika 5.4. Tipični ultrazvučni sustav odjeka pulsa [20]

### 5.3. Prikaz nepravilnosti

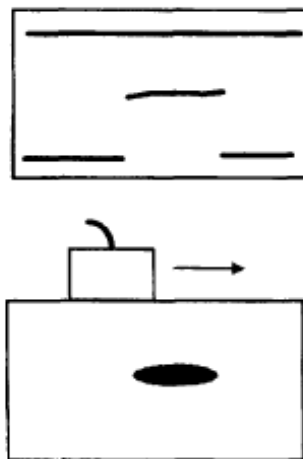
Nepravilnosti kod ultrazvučnog ispitivanja mogu se prikazati u nekoliko različitih formata. Tri najčešća formata prikaza nepravilnosti su A-prikaz, B-prikaz i C-prikaz. Prikazi nepravilnosti ključni su za pravilno tumačenje rezultata i identifikaciju nepravilnosti unutar materijala.

A-prikaz je najosnovniji prikaz podataka i predstavlja pojedinačne zvučne impulse poslone kroz ispitani uzorak. Prikazan je kao jednodimenzionalni graf na kojem je amplituda ultrazvučnog odjeka prikazana kao funkcija vremena. Na slici 5.5. prikazan je grafikon na kojem horizontalna linija predstavlja proteklo vrijeme, a vertikalna prikazuje amplitudu odjeka. Na temelju položaja i amplitude odjeka može se odrediti položaj nepravilnosti i njegova dubina u materijalu. [17]



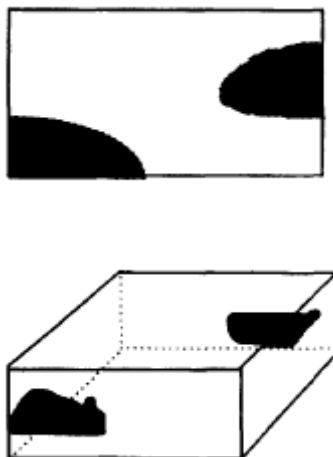
Slika 5.5. A-prikaz [17]

B-prikaz je dvodimenzionalni prikaz ispitnog uzorka koji prikazuje debljinu i dubinu nedostataka mjerenih na različitim položajima kroz vrijeme. Na slici 5.6. nalazi se B-prikaz koji prikazuje refleksiju s prednje i stražnje strane ispitnog uzorka. Glavna prednost B-prikaza je to što prikazuje presjek ispitnog uzorka i nedostatke unutar njega. [17]



Slika 5.6. B-prikaz (bočni pogled) [17]

Na slici 5.7. prikazan je C-prikaz, jedan od najsofisticiranijih načina za prikaz rezultata ultrazvučnog ispitivanja. Ovaj prikaz pruža dvodimenzionalni prikaz ispitanog uzorka u ravnini, prikazujući nedostatke unutar materijala. Za razliku od prethodnih prikaza, C-prikaz se fokusira na planarni pregled, prikazujući duljinu i širinu nedostatka, ali ne pruža informacije o njihovoj dubini. [17]



*Slika 5.7. C-prikaz (pogled iz ravnine) [17]*

#### **5.4. Oprema za ultrazvučno ispitivanje**

Oprema za ultrazvučno ispitivanje prikazana je na slici 5.8., a sastoji se od ultrazvučnog uređaja, sonde, kabela i kontaktnog sredstva.



*Slika 5.8. Oprema za ultrazvučno ispitivanje [21]*

Generator impulsa stvara visokofrekventne električne impulse koji se koriste za generiranje ultrazvučnih valova. Valovi se šalju prema sondi koja ih pretvara u zvučne impulse. Sonda je uređaj koji emitira i prima ultrazvučne valove, a postoje različiti oblici i tipovi sonde. Piezoelektrična sonda je jedna od najvažnijih komponenti kod ultrazvučnog ispitivanja. Ona služi za pretvorbu električnih impulsa u mehaničke vibracije te pretvorbu vraćenih mehaničkih vibracija natrag u električnu energiju. Posebnu pažnju potrebno je posvetiti odabiru odgovarajuće sonde za određenu primjenu. Sonde se klasificiraju u dvije glavne skupine prema načinu primjene:

- kontaktne sonde – koriste se za ispitivanje s izravnim kontaktom i obično se ručno manipuliraju. Elementi sonde su zaštićeni u kućištu kako bi izdržali klizni kontakt s različitim materijalima. Kontaktna sredstva, poput vode, masti ili ulja, koriste se za uklanjanje zračnog razmaka između sonde i ispitivane komponente.
- sonda za uranjanje – ne dolaze u izravan kontakt s ispitivanom komponentom. Dizajnirane su za rad u tekućem okruženju i imaju vodonepropusne spojeve. Sonde za uranjanje obično imaju sloj za usklađivanje impedancije koji pomaže prenošenje više zvučne energije u vodu, a potom u komponentu koja se ispituje. Mogu imati ravnu, cilindrično fokusiranu ili sferično fokusiranu leću. [2]

Ultrazvučni pulser-prijamnici vrlo su prikladni za opće ultrazvučno ispitivanje. U kombinaciji s odgovarajućom sondom i prikaznim uređajima, mogu se koristiti za otkrivanje nedostataka i mjerenje debljine u širokom rasponu materijala kao što su metali, plastika, keramika i kompoziti. Pulser-prijamnici pružaju jedinstvenu, niskobudžetnu mogućnost ultrazvučnog mjerenja. Dio instrumenta koji generira impulse (pulser) stvara kratke električne pulseve velike amplitude s kontroliranom energijom, koji se pretvaraju u kratke ultrazvučne impulse.

Osim navedenih komponenti, vrlo važnu ulogu ima i kontaktno sredstvo. Glavni zadatak kontaktnog sredstva je olakšati prijenos zvučne energije između sonde i ispitivane komponente. Obično su to viskozne, netoksične tekućine, gelovi ili paste. Njihova upotreba je nužna jer zrak ne prenosi učinkovito zvučnu energiju ultrazvučnih frekvencija; čak i vrlo tanak sloj zraka između sonde i komponente može onemogućiti prijenos zvučne energije i onemogućiti ispitivanje. [2]

## 5.5. Područje primjene ultrazvučnog ispitivanja

Ultrazvučno ispitivanje nije prikladno za krupnozrnate strukture, već je namijenjeno ispitivanju sitnozrnate, kakvu imaju valjani limovi ili ploče. Većinu lijevanih komada nije moguće skenirati ovom metodom zbog krupnozrnate strukture koja dovodi do raspršivanja i slabljenja valova.

Ova metoda ispitivanja primjenjuje se u zrakoplovnoj, željezničkoj, građevinskoj, medicinskoj industriji te industriji nafte i plina. Ultrazvučno ispitivanje koristi se za praćenje korozije ili erozije, omogućujući otkrivanje unutarnje korozije bez unutarnjeg pristupa. U termoelektranama, cijevi kotla podložne su degradaciji zbog visokih temperatura i nečistoća. Redovita ispitivanja procjenjuju stope stanjivanja stijenci cijevi, dok inspekcija u radu detektira pukotine. Kritični elementi poput parnih ventila u elektranama podliježu redovitoj inspekciji zbog sigurnosnih rizika. Starija postrojenja često provode opsežna NDT ispitivanja za produženje vijeka trajanja. [2]

## 5.6. Prednosti i nedostaci

Nema metode nerazornog ispitivanja koja predstavlja univerzalno rješenje. Svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke. Neke od prednosti ultrazvučnog ispitivanja su:

- velika osjetljivost na nepravilnosti koji se nalaze na površini i ispod površine.
- dubina penetracije za otkrivanje ili mjerenje nepravilnosti je superiorna u odnosu na druge metode nerazorne metode.
- kada se ispitivanje vrši tehnikom odjeka, potreban je pristup samo s jedne strane.
- metoda nije opasna za ispitivače ili obližnje osoblje i ne utječe na materijal koji se testira.
- osim za otkrivanje nepravilnosti, može se koristiti i za druge primjene, kao što je mjerenje debljine.
- potrebna je minimalna priprema ispitivanog uzorka.
- može se koristiti za trenutačnu procjenu jer su rezultati odmah dostupni.
- oprema može biti prenosiva ili visoko automatizirana.

Neki od nedostataka ultrazvučnog ispitivanja su:

- primjenom ultrazvučne metode teško je ispitati male, grube, izuzetno tanke i nepravilno oblikovane materijale.

- potrebna je pristupačna površina kako bi se moglo koristiti ultrazvuk.
  - lijevano željezo i drugi materijali s krupnim zrnima teško se ispituju zbog slabog prijenosa zvuka i visokog šuma signala.
  - za razliku od drugih metoda nerazornog ispitivanja, kod ultrazvučnog ispitivanja potrebna je opsežnija obuka i specifične vještine.
  - potrebni su etaloni i referentni uzorci za kalibraciju opreme i karakterizaciju nepravilnosti.
- [23]



## 6. ISPITIVANJE MAGNETSKIM ČESTICAMA

Ispitivanje magnetskim česticama jedna je od najčešće korištenih nerazornih metoda jer je brza i relativno jednostavna za primjenu, a priprema ispitivane površine nije toliko kritična kao kod nekih drugih metoda. Ova metoda koristi se za ispitivanje feromagnetskih materijala koji se mogu lako magnetizirati te ima sposobnost lociranja i procjene nepravilnosti koji se nalaze na površini ili neposredno ispod površine. Feromagnetski materijali mogu se magnetizirati stavljanjem materijala u jako vanjsko magnetsko polje ili prolaskom električne struje kroz materijal. U feromagnetske metale spadaju željezo, nikal, čelik i kobalt. [27]

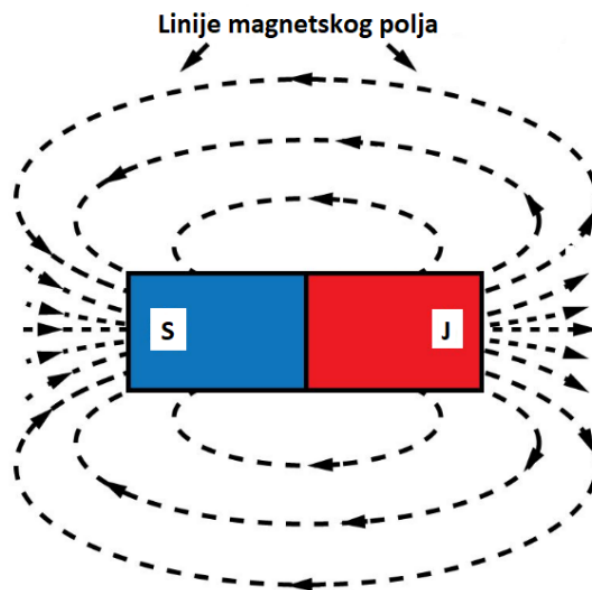
Ispitivanje magnetskim česticama primjenjuje se u različitim industrijama, poput automobilske, petrokemijske, industrije konstrukcijskog čelika i zrakoplovstva. Ova metoda koristi se za ispitivanje raznih oblika proizvoda, uključujući odljevke, kovane dijelove i zavare. Također se koristi kod podvodnog ispitivanja, primjerice za ispitivanje podvodnih cjevovoda. Na slici 6.1. prikazana je površina materijala na kojoj se provodi ispitivanje magnetskim česticama.



*Slika 6.1. Ispitivanje magnetskim česticama [24]*

## 6.1. Princip ispitivanja magnetskim česticama

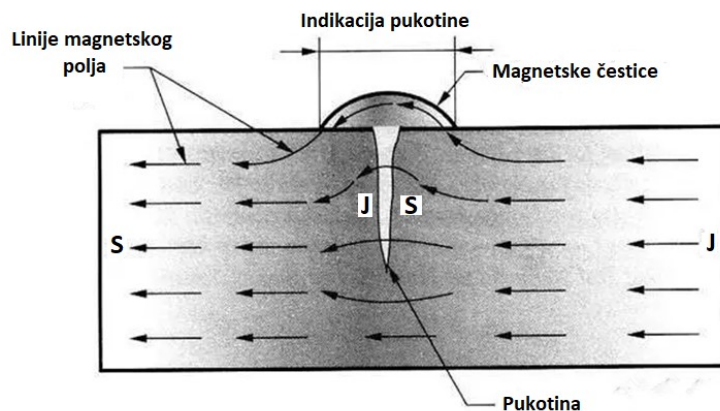
Princip ispitivanja magnetskim česticama temelji se na korištenju magnetnog polja za otkrivanje površinskih i ispodpovršinskih nesavršenosti u feromagnetskim materijalima. Ova metoda se smatra kombinacijom ispitivanja curenja magnetskog toka i vizualnog ispitivanja. Kod štapnog magneta, magnetsko polje nalazi se unutar i oko magneta, kao što je prikazano na slici 6.2. Svako mjesto gdje magnetska sila izlazi ili ulazi u magnet naziva se pol. Magnetne linije izlaze iz magneta na sjevernom polu i ulaze na južnom polu.



Slika 6.2. Prikaz magnetskog polja [25]

Kada se štapni magnet razbije na sredini svoje duljine, nastaju dva nova štapna magneta s magnetskim polovima na svakom kraju. Ako je magnet samo napuknut, ali nije potpuno razbijen na dva dijela, sjeverni i južni pol formirat će se na svakom rubu pukotine. Magnetsko polje se širi kada naiđe na mali zračni razmak koji stvara pukotina, jer zrak ne može poduprijeti toliko magnetskog polja po jedinici volumena kao što to može magnet. Kada linije toka naiđu na nepravilnost koja je obično smještena okomito u odnosu na smjer toka, stvara se polje curenja toka neposredno iznad površine komponente.

Curenje toka otkriva se upotrebom magnetskih čestica koje se nanose na površinu kao na slici 6.3, pri čemu se neke od njih okupljaju i zadržavaju u polju curenja. Ove magnetske čestice koriste se za formiranje obrisa nepravilnosti te za označavanje njezine lokacije, veličine, oblika i opsega. Magnetske čestice mogu biti u obliku praha (suhe) ili tekuće suspenzije (mokre). [2]



Slika 6.3. Primjena magnetskih čestica na ispitivanoj površini [26]

## 6.2. Postupak ispitivanja

Kako bi se osigurala točnost i pouzdanost rezultata pri ispitivanju magnetskim česticama, potrebno je pratiti sljedeće korake:

- priprema ispitnog uzorka – prije samog ispitivanja potrebno je s ispitivane površine ukloniti ulje, masnoću, prljavštinu te ostatke korozije ili markera. Također, potrebno je demagnetizirati komponentu kako bi se uklonio preostali magnetizam i time izbjegle lažne indikacije. Ako se koriste mokre metode čišćenja, površina mora biti potpuno suha prije nastavka ispitivanja.
- magnetiziranje ispitnog uzorka – mnogi dijelovi koji se ispituju nemaju jednostavne geometrijske oblike. U takvim slučajevima može biti potrebno koristiti više tehnika magnetiziranja kako bi se ispitivanje izvršilo u potpunosti. Ispitivani objekt se magnetizira pomoću elektromagneta, permanentnog magneta ili prolaskom struje kroz objekt, ukoliko je vodljiv. Osjetljivost otkrivanja nepravilnosti poboljšava se s razinom magnetizacije. Vrijednost zasićenja za ispitni objekat može se odrediti povećanjem razine toka dok se ne stvori pozadinski šum.
- primjena magnetskih čestica – na ispitivani objekt, dok je pod utjecajem magnetskog polja, nanose se magnetne čestice. Čestice se mogu nanijeti u suhom ili mokrom obliku. Suhe čestice treba ravnomjerno nanijeti na magnetiziranu površinu. Mokre čestice najbolje je nanositi tijekom magnetizacije, izbjegavajući snažan protok kako ne bi poremetili slabe indikacije. Mokra metoda je osjetljivija na površinske nepravilnosti, dok suha metoda bolje otkriva nepravilnosti ispod površine.

- pregled i bilježenje indikacija – potrebno je pregledati cijelu površinu ispitivanog objekta i označiti sve pronađene indikacije markerom. Prilikom pregleda koristi se odgovarajuće osvjetljenje. Često je poželjno zabilježiti ne samo izgled indikacija na ispitivanom objektu, već i njihovu lokaciju. Za trajni zapis, pronađene indikacije mogu se prenijeti s ispitivanog uzorka na bijeli papir pomoću ljepljive trake.
- demagnetizacija ispitivanog objekta – nakon završetka ispitivanja, potrebno je demagnetizirati ispitivani objekt kako bi se uklonilo zaostalo magnetsko polje. Zaostalo magnetsko polje može prouzročiti probleme poput poremećaja u funkcionalnosti elektroničke opreme ili poteškoće u daljnjoj obradi i montaži. Demagnetizacija se izvodi pomoću uređaja za demagnetizaciju, koji je prikazan na slici 6.4., tako da se ispitivani objekt postavlja u polje izmjenične struje i postupno izvlači iz tog polja. Kod velikih masa čelika ili željeza za demagnetiziranje je često potrebna istosmjerna struja. Učinkovitost demagnetizacije može se provjeriti pomoću kompasa ili indikatora magnetskog polja. [28]



*Slika 6.4. Uređaj za demagnetizaciju [29]*

### **6.3. Oprema i pribor za ispitivanje magnetskim česticama**

Oprema za ispitivanje magnetnim česticama može se podijeliti prema načinu primjene na stacionarnu i prijenosnu.

Stacionarnu opremu čini stacionarni stol s opremom za magnetiziranje, koji ima mogućnost uzdužne i kružne magnetizacije objekta ispitivanja. Neke jedinica također imaju mogućnost demagnetiziranja dijelova, ali najčešće se to postiže zasebnim uređajem. Na slici 6.5. prikazan je jedan od takvih ispitnih

stolova, koji ima fiksnu glavnu i pomičnu steznu glavu između kojih se postavlja dio. Kada se dio stegne, stvara se kružno magnetsko polje.



*Slika 6.5. Stacionarni stol s opremom za magnetiziranje [30]*

Kod ispitivanja šupljih dijelova koristi se tehnika središnjeg vodiča. Ova tehnika uključuje upotrebu šipke visoke električne vodljivosti, najčešće od bakra ili aluminija, koja se steže između glavne i stražnje stezne glave. Prednosti ove tehnike su u tome što se nekoliko komponenti može pregledati istovremeno i što nema rizika od pregrijavanja dijelova ili stvaranja električnog luka između jedinice i dijelova, jer se radi o neizravnoj tehnici magnetizacije. Za longitudinalnu magnetizaciju, dio može biti smješten u zavojnici ili na donjoj unutarnjoj površini zavojnice. Omjer promjera zavojnice i dijela određuje najbolji položaj za ispitivanje. Glavno ograničenje stacionarnih jedinica je njihova nemogućnost upotrebe na terenu, zbog čega je potrebna prijenosna oprema. [2]

Na slici 6.6. prikazan je magnetski jaram, koji spada u prijenosnu opremu i pogodan je za terenski rad. To je uređaj koji se koristi za generiranje lokalnog magnetskog polja. Koristi se za ispitivanje zavora, malih odljevaka ili strojnih dijelova. Može biti permanentni magnet ili elektromagnet koji se aktivira prolaskom električne struje. Permanentni magneti omogućuju ispitivanje na mjestima gdje izvor električne struje nije dostupan ili na mjestima gdje postoji opasnost od požara ili eksplozije. Glavna prednost magnetskog jarma je njegova lakoća prenošenja i jednostavan uporabe. [27]



*Slika 6.6. Magnetski jaram [29]*

Magnetske čestice koriste se za detekciju površinskih i ispodpovršinskih nepravilnosti u feromagnetnim materijalima. Na ispitni objekt nanose se u suhom ili mokrom obliku. Za ispitivanje se koristi bijelo svjetlo. Osim navedenih čestica, postoje i fluorescentne čestice. Na slici 6.7. prikazana je UV lampa koja se koristi za osvjetljavanje fluorescentnih magnetskih čestica. UV lampa omogućuje ispitivanje u tamnim okruženjima i kada je potrebna veća osjetljivost. [27]



*Slika 6.7. UV lampa [29]*

## 6.4. Prednosti i nedostaci

Kao i svaki drugi učinkovit proces nerazornog ispitivanja, ispitivanje magnetskim česticama ima svoje prednosti, a to su:

- rezultati ispitivanja su praktički trenutni, jer se indikacije formiraju unutar jedne ili dvije sekunde nakon nanošenja čestica. Nije potrebno vrijeme za razvijanje ili obradu.
- trajni zapisi indikacija mogu se izraditi koristeći fotografiju, magnetsku gumu ili tehnike prozirne trake.
- indikacije su jednostavne za tumačenje.
- indikacije formirane česticama blisko predstavljaju oblik i tip nepravilnosti.
- oprema za ispitivanje magnetskim česticama može biti znatno jeftinija od druge NDT opreme. Ovisi o stupnju automatizacije ili obimu rada, također može biti ekonomičnija od mnogih drugih nerazornih metoda.
- može se ispitati gotovo bilo koja veličina ili oblik komponente.
- ispitivanja se mogu provoditi tijekom svih faza proizvodnje.

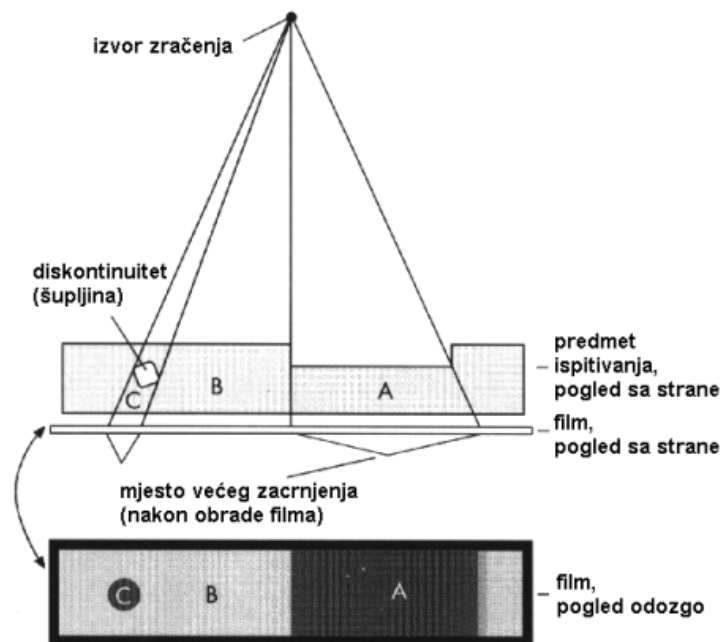
Osnovni nedostaci ove metode ispitivanja u odnosu na druge metode nerazornog ispitivanja uključuju:

- učinkovito je samo za ispitivanje feromagnetskih materijala.
- otkrivanje nepravilnosti ograničeno je na one koji se nalaze na ili blizu površine.
- demagnetizacija može biti potrebna prije, tijekom i nakon ispitivanja.
- neke tehnike ispitivanja magnetskim česticama mogu uzrokovati oštećenje dijela zbog lukova ili lokaliziranog pregrijavanja dijelova (npr. kod korištenja istosmjernih elektroda).
- nerazumljive indikacije zbog naglih promjena u profilu komponente ili lokalnih promjena u svojstvima materijala mogu otežati tumačenje.
- uklanjanje boje ili premaza potrebno je s lokaliziranih područja na dijelu kako bi se omogućio dobar električni kontakt pri korištenju tehnika izravne magnetizacije [2]

## 7. RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE

### 7.1. Princip radiografije

Prilikom provođenja radiografskog ispitivanja, izvor rendgenskih zraka (X-zraka) ili gama zraka postavlja se s jedne strane ispitivanog objekta, dok se detektor zračenja postavlja s druge strane. Pri prolasku kroz objekat, zračenje slabi ovisno o debljini materijala, tako da kroz tanje dijelove objekta prodire više zračenja i stvara se veći učinak na detektoru. U većini slučajeva kao detektor koristi se radiografski film. Na slici 7.1. prikazan je točkasti izvor zračenja koji stvara prostornu sliku ispitivanog objekta. Zacrtnjenje na filmu može varirati ovisno o promjenama debljine, unutarnjim šupljinama ili uključcima.



Slika 7.1. Radiografski sustav [32]

Slika na filmu formira se pomoću rendgenskih zraka koje putuju u ravnim linijama od izvora zračenja kroz ispitivani objekt do filma. Ovo geometrijsko formiranje slike potpuno je analogno stvaranju sjene uz pomoć vidljive svjetlosti, a oština slike na filmu ovisi o geometriji izvora zračenja i relativnim udaljenostima između izvora, objekta i filma. Izvori zračenja malog promjera mogu proizvesti oštre slike.

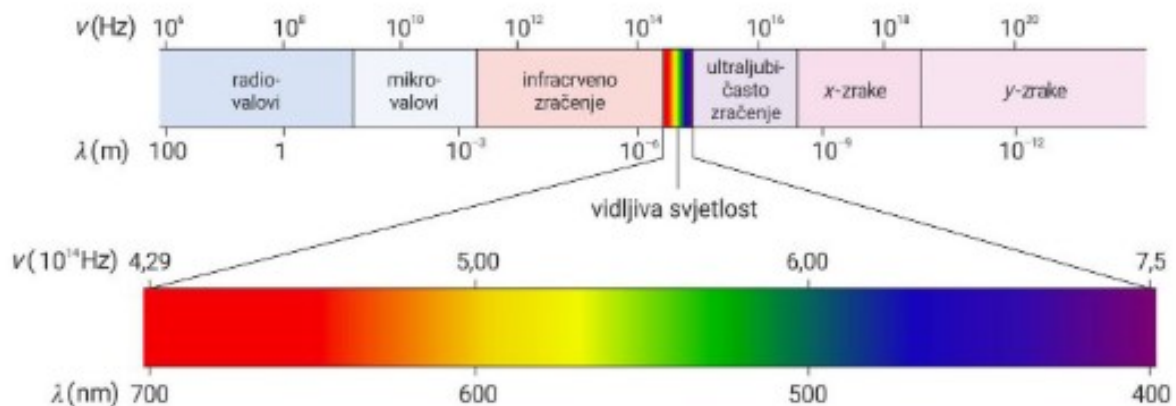
Za uspješno provođenje radiografije potrebno je uskladiti energiju zračenja s debljinom ispitivanog objekta. Energija zračenja mora biti dovoljna za prozračivanje debljine objekta, ali istovremeno što



manja kako bi se postigao bolji kontrast. Zračenje koje se snažno apsorbira bolje otkriva male promjene u debljini ispitivanog objekta u usporedbi sa zračenjem više energije koje se manje apsorbira. [31]

## 7.2. Priroda rendgenskih zraka i gama zraka

Rendgenske zrake i gama zrake su oblici elektromagnetskog zračenja s valnim duljinama u rasponu od  $10^{-9}$  do  $10^{-12}$  m, kao što je prikazano na slici 7.2. Gama zrake općenito imaju veće frekvencije od rendgenskih zraka. Glavna razlika između rendgenskih i gama zraka je njihovo porijeklo; rendgenske zrake se obično umjetno proizvode pomoću generatora rendgenskih zraka, dok gama zrake nastaju kao produkt radioaktivnog raspada materijala. Rendgenske zrake nastaju kada se snop visokoenergetskih elektrona velike brzine usmjeri na metalni materijal, dok se gama zrake emitiraju iz jezgre radioaktivnih elemenata. Obje vrste zraka putuju u ravnim linijama i nisu vidljive golim okom. Rendgenske i gama zrake lakše prolaze kroz materijale niske gustoće, a njihova sposobnost prodiranja ovisi o valnoj duljini. [33]



Slika 7.2. Spektar elektromagnetskog zračenja [33]

Njemački fizičar Max Planck predložio je kvantnu teoriju, prema kojoj elektromagnetsko zračenje ne zrači kontinuirano, već u malim kvantima. Kvant je najmanja količina energije koja se može povezati s određenim fenomenom. [33]

Energija fotona  $E$  svakog kvanta računa se prema izrazu (7.1):

$$E = h \cdot f \quad [\text{keV}] \quad (7.1)$$

gdje je:

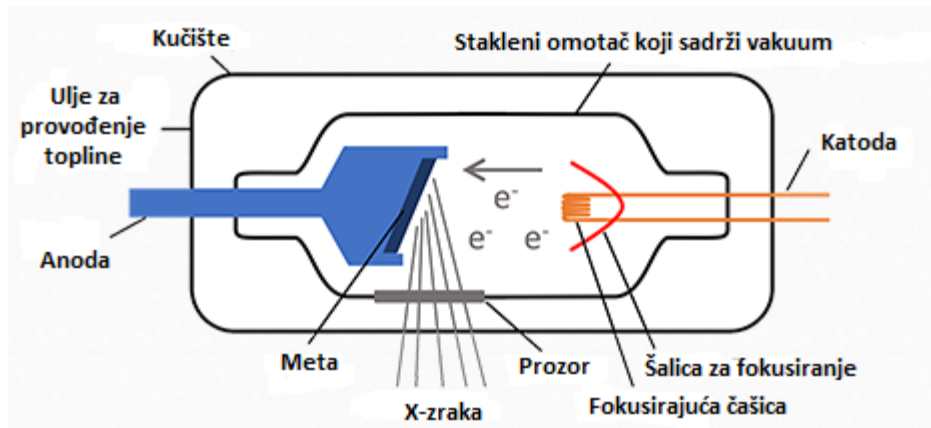
- $E$  energija fotona [J]

- $h$  Planckova konstanta [Js]
- $f$  frekvencija [1/s]

## 7.3. Izvor zračenja

### 7.3.1. Izvor rendgenskih zraka

Rendgenske zrake se proizvode kada se elektroni naglo zaustave sudarom s metalnom metom. Glavni uređaj za stvaranje rendgenskih zraka je rendgenska cijev, koja je prikazana na slici 7.3. Rendgenska cijev sastoji se od vakuumski zatvorenog omotača s katodom i anodom, te je zapečaćena pod visokim vakuumom, što zahtijeva precizno pumpanje i uklanjanje plinova.

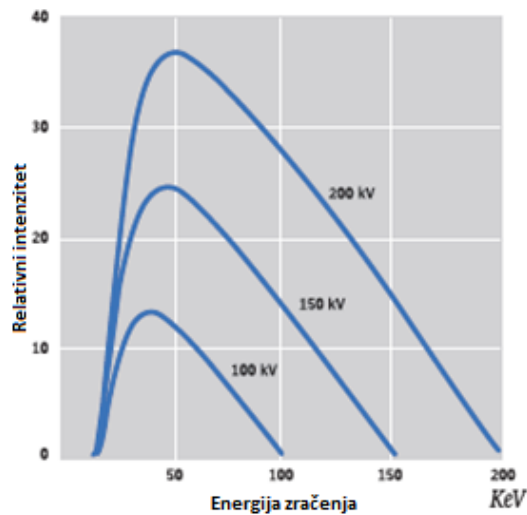


Slika 7.3. Shema rendgenske cijevi [35]

Katoda se sastoji od volframove žarne niti koja je obično spiralno namotana. Žarna nit okružena je oblikovanom metalnom elektrodom koja se naziva fokusirajuća čašica. Najčešće je izrađena od vrlo čistog željeza i nikla, a glavni zadatak je da kontrolira oblik snopa elektrona emitiranih iz žarne niti. Anoda se sastoji od metalne elektrode s visokom toplinskom vodljivošću koja sadrži metu od volframa ili zlata. Meta je ugrađena u blok od vakuumski lijevanog bakra, a spoj mora biti kvalitetan kako bi se osigurala dobra toplinska vodljivost. Površina mete koja je okrenuta prema žarnoj niti postavljena je pod kutem u odnosu na os cijevi kako bi se energija snopa elektrona ravnomjernije raspširila na veću površinu. To omogućuje visoki izlaz rendgenskih zraka iz male žarišne točke bez topljenja mete. Pri izlazu iz rendgenske cijevi, rendgenske zrake se emitiraju ravnomjerno u svim smjerovima. [31]

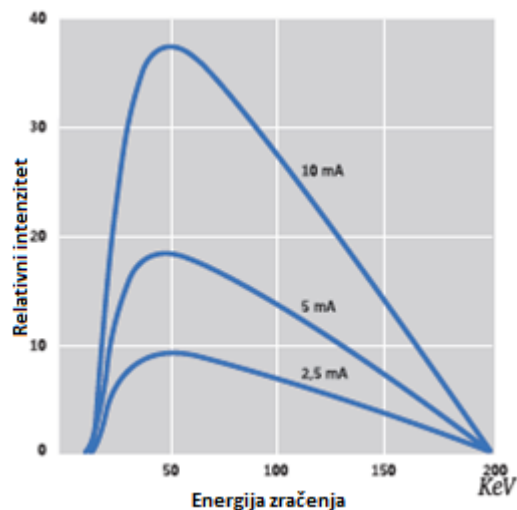
Rendgenske cijevi dizajnirane su tako da podnesu maksimalnu moguću struju bez topljenja mete, što ovisi o učinkovitosti sustava hlađenja. Najčešće je anoda šuplja, a kroz nju cirkulira rashladna tekućina. Rendgenska cijev također može biti okružena izolacijskim uljem koje djeluje kao rashladni medij.

Intenzitet rendgenskih zraka ovisi o naponu i struji cijevi koja kontrolira broj elektrona koji se emitiraju i udaraju u metu. Na slici 7.4 prikazano je kako napon na rendgenskoj cijevi određuje energetske spektre zračenja, a time i "tvrdoću" zračenja. Porastom napona povećava se intenzitet i energija zračenja. [34]



Slika 7.4. Energetski spektri pri različitim naponima cijevi [34]

Na slici 7.5. prikazano je kako intenzitet zračenja proporcionalan sa strujom cijevi. Za razliku od napona cijevi, struja cijevi ne mijenja spektar, što znači da "tvrdoću" zračenja ostaje ista. [34]



Slika 7.5. Energetski spektri pri različitim vrijednostima struje cijevi [34]

### 7.3.2. Izvor gama zraka

Gama zrake nastaju prilikom raspada radioaktivnih atomskih jezgri. Radioaktivni izvori mogu biti prirodni ili umjetni. Prije uvođenja umjetno proizvedenih radioaktivnih izvora, radij se koristio kao izvor gama zraka za radiografiju. Radij emitira vrlo tvrdo zračenje, što ga čini pogodnim za ispitivanje vrlo debelih objekata. Danas je radij potpuno zamijenjen mnogo jeftinijim umjetnim izotopima, koji se dobivaju ozračivanjem u nuklearnom reaktoru. Iako postoji nekoliko stotina radioizotopa, samo se nekolicina široko koristi za industrijsku radiografiju. Dva najčešće korištena radioizotopa su kobalt-60 (Co60) i iridij-192 (Ir192), dok se sve više počinje koristiti selen-75 (Se75). Oba emitiraju relativno visokoenergetsko zračenje te nisu pogodni za upotrebu na tankim čelicima ili za radiografiju lakih legura. Na slici 7.6. prikazani su radioizotopi koji se koriste u radiografiji, zajedno s njihovim karakteristikama. [1, 31]

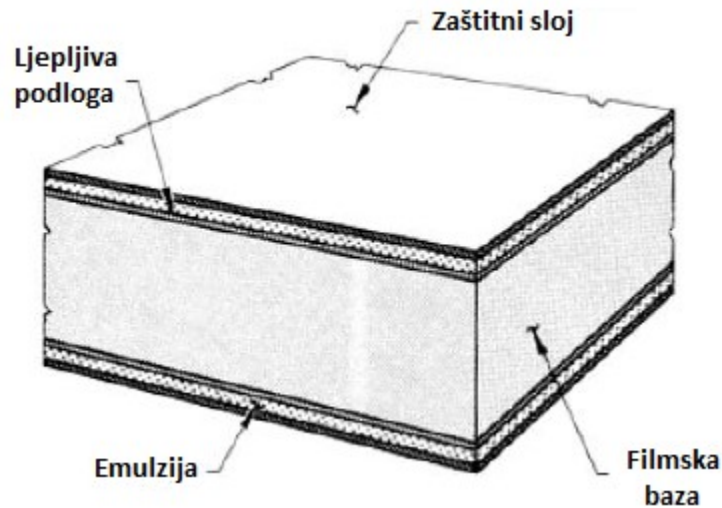
IZVOR	Srednji nivo energije / keV	Poludebljina u olovu / mm	Najveća debljina čelika / mm	Vrijeme poluraspada
Tulij Tm170	72	0,4	< 5	128 dana
Iterbij Yb169	200	0,88	12	31 dan
Selen Se75	320	1	40	120 dana
Iridij 192	450	5,5	70	74 dana
Cezij Cs137	660	8,4	100	30 godina
Kobalt Co60	1250	13	180	5,2 godine

Slika 7.6. Radioizotopi sa karakteristikama [32]

## 7.4. Radiografski film

Radiografski film koristi se u radiografiji za snimanje unutarnjih struktura objekata pomoću rendgenskih zraka ili gama zraka. U radiografskom ispitivanju film je ključan jer omogućuje vizualizaciju nevidljivih nesavršenosti u materijalima. Film se sastoji od tanke osnove koja je prozirna i fleksibilna, te premazana osjetljivom emulzijom. Emulzija je pričvršćena na osnovu pomoću tankog sloja ljepila, a prekrivena je dodatnim slojem želatine kako bi se smanjilo trošenje. Vrlo mali dio rendgenskog zračenja koje pada na film se apsorbira. Najčešće filmovi imaju dva premaza emulzije, što udvostručuje brzinu u usporedbi s filmom koji ima samo jedan sloj emulzije. Fotografska emulzija je tvar osjetljiva na ionizirajuće zračenje i svjetlost, te se sastoji od mikroskopskih čestica kristala

srebrovih halogenida suspendiranih u želatini. Na slici 7.7. prikazana je struktura radiografskog filma. [31]



Slika 7.7. Struktura radiografskog filma [39]

Radiografski filmovi mogu se podijeliti u četiri klase:

- Klasa I – film s izuzetno sitnim zrnom, male brzine, s vrlo visokim kontrastom. Ovaj film se općenito koristi za materijale niže gustoće.
- Klasa II - film s finim zrnom, srednje brzine i visokim kontrastom. Također se koristi za materijale niže gustoće uz nisko i srednje energetske zračenje. Ova klasa filma ima širu primjenu od Klase I jer pruža vrlo dobru definiciju, fino zrno i nešto veću brzinu filma od Klase I.
- Klasa III - film velike brzine, što zahtijeva kraća vremena ekspozicije. Obično se koristi za rendgenske ili gama zrake s višim energijama. Smatra se filmom srednjeg kontrasta s visokim stupnjem zrnatosti.
- Klasa IV – specijalna klasa filma s vrlo visokom definicijom i vrlo finim zrnom. [2]

## 7.5. Postupak radiografskog ispitivanja

Ovisno o zahtjevima projekta, postupak radiografskog ispitivanja može se razlikovati. Međutim, opći koraci mogu se sažeti na sljedeći način:

- priprema površine – prije ispitivanja potrebno je očistiti površinu objekta od prljavštine, masnoće, hrđe ili boje kako se ti faktori ne bi odrazili na kvalitetu slike. Površinske nepravilnosti mogu uzrokovati lažne indikacije ili otežati interpretaciju radiografske slike.
- odabir parametara i radiografskog filma – izvori zračenja često se ne mogu izabirati, pa se može koristiti izvor kao što je iridij, čak i kada se radi o tanjim materijalima. Pri korištenju rendgenskih zraka, odabir napona definira energiju rendgenskog zračenja. Nakon što su izabrani parametri ispitivanja, potrebno je odabrati i vrstu filma, koja također ovisi o debljini materijala i vrsti očekivanih nepravilnosti.
- postavljanje objekta i filma – nakon što su odabrani parametri i vrsta filma, postavlja se ispitni objekt. Potrebno je osigurati da se prilikom procesa ispitivanja objekt ne pomiče jer može dovesti do zamućenja slike. Izvor zračenja se nalazi s jedne strane objekta, a radiografski film s druge strane. Prolaskom zračenja kroz materijal stvara se slika unutarnje strukture na filmu.
- izlaganje zračenju – objekt se izlaže rendgenskim ili gama zrakama određeno vrijeme, ovisno o već navedenim parametrima. Tijekom zračenja, ispitivači moraju biti izvan područja zračenja.
- obrada radiografskog filma – nakon zračenja, potrebno je pomoću kemijskog postupka pretvoriti latentnu sliku pretvoriti u vidljivu sliku. Taj postupak se odvija u tamnoj komori pod crvenim svjetlom kako bi se izbjegli neželjeni utjecaji svjetlosti na film.
- analiza i interpretacija radiograma – nakon kemijske obrade, film se pregledava kako bi se otkrile nepravilnosti. Nepravilnosti se klasificiraju prema njihovoj vrsti, veličini i lokaciji. Rezultate analize potrebno je dokumentirati. [36]

## 7.6. Tehnike radiografskog ispitivanja

Postoje brojne tehnike radiografskog ispitivanja, uključujući konvencionalnu radiografiju, digitalnu radiografiju, računalnu radiografiju (CR), direktnu radiografiju (DR), radiografiju u stvarnom vremenu (RTR) i računalnu tomografiju (CT).

Konvencionalna radiografija ili filmska radiografija koristi klasični rendgenski film koji reagira na emitirano zračenje kako bi snimila sliku ispitivanog objekta. Dobivena slika se pregledava radi otkrivanja nepravilnosti. Ova tehnika može biti dugotrajna i zahtjeva puno vremena, a film se može samo jednom koristiti.

Digitalna radiografija za razliku od konvencionalne radiografije ne koristi film nego digitalni detektor za prikazivanje slika na zaslonu računala. Ova tehnika zahtjeva kraće izlaganje zračenju čime je brža interpretacija slike. Digitalne slike su znatno kvalitetnije u usporedbi s konvencionalnim radiografskim slikama. Osoblje koje je obučeno za radiografsko ispitivanje lako može usvojiti digitalnu radiografiju. Postoje dvije vrste digitalne radiografije: računalna radiografija i direktna radiografija. Računalna radiografija (CR) koristi fosfornu ploču za snimanje slika umjesto filma kao u konvencionalnim radiografskim tehnikama. Slika se snima indirektno na fosfornoj ploči, a zatim pretvara u digitalni signal koji se može vizualizirati na monitoru računala. Kvaliteta slike je prosječna ali se može poboljšati korištenjem odgovarajućih alata i tehnika. Direktna radiografija (DR) također je oblik digitalne radiografije, te je vrlo slična računalnoj radiografiji. Razlika između te dvije radiografije je u načinu snimanja slike. Kod izravne radiografije koristi se ravna ploča detektora koja izravno snima sliku i pokazuje ju na ekranu računala. Ova tehnika je brza i proizvodi slike visoke kvalitete, ali i znatno skuplja od računalne radiografije. [34]

Radiografija u stvarnom vremenu (RTR) ili fluoroskopija je oblik digitalne radiografije koji se odvija u stvarnom vremenu. Ova tehnika radi na principu da emitira zračenje koje prolazi kroz ispitivani objekt. Emitirane zrake stupaju u interakciju s posebnom fosfornom pločom ili ravnim detektorom s mikroelektroničkim senzorima. Tijekom te interakcije stvara se digitalna slika koja se može pregledavati i analizirati u stvarnom vremenu. Radiografija u stvarnom vremenu omogućuje brži pregleda i analizu slike, ali ima i nekoliko nedostataka kao što su niža osjetljivost kontrasta i ograničena razlučivost slike. [34]

Računalna tomografija (CT) je tehnika koja koristi stotine do tisuće 2D radiografskih snimaka i superponira ih kako bi stvorila 3D radiografsku sliku. O veličini komponente ovisi koliko će se napraviti 2D snimki. U industrijskom okruženju, računalna tomografija može se provesti na dva načina. Jedan od načina je da se komponenta ostavi nepomična dok se izvor zračenja i detektor X-zraka rotiraju oko nje, što je prikladno za velike komponente. Drugi je način da se izvor zračenja i detektor ostave nepomični dok se komponenta rotira za 360°. Ova druga tehnika je korisnija kada je komponenta mala ili ima složenu geometriju. Iako je ova tehnologija dugotrajna, skupa i zahtjeva puno prostora za pohranu podataka, računalna tomografija pruža vrlo precizne slike te minimizira ljudske pogreške. [34]

## 7.7. Područje primjene

Radiografsko ispitivanje koristi se u raznim industrijama, uključujući naftnu i plinsku industriju, zavarivačku industriju i proizvodnju, za otkrivanje unutarnjih grešaka u materijalima i osiguranje kvalitete. Ova metoda ispitivanja također se koristi za inspekciju novih proizvoda i zavora kako bi se osiguralo da zadovoljavaju zahtjeve standarda. Pomoću radiografije, ispitivanje spremnika za skladištenje, cjevovoda, pa čak i izoliranih materijala postaje rutina. Radiografsko ispitivanje omogućuje otkrivanje i mjerenje unutarnjih grešaka u postojećim postrojenjima. Rano otkrivanje unutarnjih grešaka u cjevovodima i postrojenjima u naftnom i plinskom sektoru ključno je za održavanje proizvodnog toka i sprječavanje katastrofalnih posljedica.

Radiografija se koristi i za otkrivanje korozije ispod izolacije, što omogućuje operatorima da precizno identificiraju nedostatke bez potrebe za skupim i dugotrajnim uklanjanjem i zamjenom izolacije. Osim industrijske primjene, radiografija je pronašla svoje mjesto i u osiguranjima. Koristi se u zračnim lukama za pregled sumnjivih paketa i objekata, čime se eliminira potreba za ručnom metodom inspekcije. [37]

## 7.8. Prednosti i nedostaci radiografskog ispitivanja

Radiografsko ispitivanje ima mnoge prednosti, a neke od najznačajnijih su:

- ova metoda ispitivanja omogućuje otkrivanje unutarnjih nedostataka, poput pukotina i šupljina, koje nisu vidljive s površine.
- radiografsko ispitivanje može se primijeniti na gotovo sve materijale, uključujući metale, plastiku, kompozite i keramiku.



- radiografske slike mogu se pohranjivati digitalno ili kao fizički film, pružajući trajni zapis o ispitivanim objektima.
- omogućen je detaljni prikaz pronađenih nedostataka, što omogućuje inženjerima da ocijene ozbiljnost grešaka i donesu odluku o ispravnosti ispitivanog objekta.
- ova metode koristi se za ispitivanje velikih i složenih objekata.

Međutim, postoje i neki nedostaci kod radiografskog ispitivanja:

- prilikom radiografskog ispitivanja potrebna je posebna pažnja zbog opasnosti od zračenja, koje može biti štetno za ispitivače.
- metoda zahtjeva puno vremena jer postavljanje, izlaganje i razvoj slika traže detaljnu pažnju.
- ova metoda ispitivanja zahtijeva velika financijska ulaganja. [38]

## **8. KARAKTERISTIČNE GREŠKE U ZAVARENIM SPOJEVIMA**

Greške su vrlo česte u bilo kojoj vrsti proizvodnje, uključujući zavarivanje. Upotreba neispravnog postupka zavarivanja ili pogrešne tehnike zavarivanja može uzrokovati odstupanje u obliku i veličini metalne strukture. Najčešće greške koje se javljaju kod zavarivanja su pukotine, poroznost, čvrsti uključci, naljepljivanje i nedovoljan provar i pogreške oblika zavara.

### **8.1. Pukotine u zavarenim spojevima**

Pukotine su najozbiljnija vrsta pogrešaka u zavaru koje mogu dovesti do katastrofalnih kvarova tijekom upotrebe. Mogu se pojaviti na površini ili unutar zavarenog materijala, posebno u područjima koja su pod utjecajem izravne topline. Na slici 8.1. prikazana je pukotina koja se nalazi na zavaru.

Prema uzroku nastajanja, pukotine se dijele na tople i hladne pukotine. Tople pukotine nastaju tijekom zavarivanja ili neposredno nakon što je zavar nanesen. Glavni uzrok nastajanja toplih pukotina je gubitak sposobnosti metala zavara da izdrži naprezanja nastala skupljanjem u posljednjoj fazi skrućivanja kod visokih temperatura. Hladne pukotine nastaju nakon završetka procesa zavarivanja. Uglavnom se pojavljuju kod zavarivanja čelika povišene i visoke čvrstoće. Hladne pukotine nastaju zbog prisutnosti vodika u zavaru, brzine hlađenja zavara, nepovoljnog položaja uključaka u zavaru, te djelovanja naprezanja nastalih skupljanjem zavara.

Općenito, pukotine u zavaru ili zoni zahvaćenoj toplinom ukazuju na to da zavar ili osnovni metal imaju nisku duktilnost. Mnogi čimbenici mogu doprinijeti ovom stanju, kao što su brzo hlađenje, loša priprema spoja, neodgovarajuća vrsta elektrode, nedovoljna veličina zavara, nedovoljan unos topline ili nedostatak prethodnog zagrijavanja.

Kako bi se izbjegle pukotine kod zavara treba posegnuti za nekim od rješenja kao što su izbjegavanje brzog hlađenja u području zavara, pravilna priprema spoja, korištenje odgovarajućih postavki jakosti struje, te uzeti u razmatranje elektrode s niskim sadržajem vodika. [40,44]



*Slika 8.1. Pukotina u zavarenom spoju [41]*

## **8.2. Poroznost u zavarenim spojevima**

Poroznost se odnosi na šupljine ili pore koje nastaju tijekom zavarivanja zbog zarobljenih plinova. Na slici 8.2. prikazana je poroznost u zavarenom spoju. Plinovi poput vodika i ugljičnog monoksida, koji se lako apsorbiraju u rastaljenom čeliku, oslobađaju se tijekom skrućivanja jer nisu topivi u čvrstom metalu. Neki od najčešćih uzroka pojave poroznosti kod zavarivanja su pretjerana brzina zavarivanja, upotreba neodgovarajućeg zaštitnog plina, prisutnost vlage u zoni zavara, loša priprema spoja, slaba obloženost elektrode i niz drugih uzroka.

Kako bi se spriječila poroznost zavarivanje treba izvoditi polako, a zavarenim spojevima osigurati čistoću. Također je važno održavati elektrode suhim i koristiti minimalnu temperaturu prethodnog zagrijavanja kako bi se spriječila vlaga. [42]



*Slika 8.2. Poroznost u zavarenom spoju [43]*

### 8.3. Čvrsti uključci

Čvrsti uključci su čvrsta strana tijela zarobljena u zavarenom metalu. Postoji više vrsta čvrstih uključaka, kao što su uključci troske, metalni uključci i uključci oksida. Kako bi se izbjegli uključci u zavaru potrebna je pravilna priprema spoja za zavarivanje, te obavezno je temeljno čišćenje troske među slojevima. Osim toga potrebno je izvoditi zavarivanje ispravnim parametrima i tehnikama rada.

Uključci troske najčešće nastaju kao posljedica nedovoljnog čišćenja između slojeva zavora. U nekim slučajevima, otežano je čišćenje troske, primjerice kod dubokih žljebova ili oštih uglova. Iskusniji zavarivači često planiraju zavarivanje u više prolaza kako bi spriječili zarobljavanje troske. Na slici 8.3. prikaza je pojava troske kod zavarenog spoja. [46]



*Slika 8.3. Pojava troske kod zavarenog spoja [46]*

Metalni uključci, kao naprimjer uključak volframa, može se pojaviti tijekom TIG zavarivanja. Na radiogramu pojavljuje se kao svijetlo područje jer je volfram gušći od okolnog metala i apsorbira veću količinu rendgenskog ili gama zračenja. Uzroci pojavljivanja mogu biti kontakt dodatnog metala s vrućim vrhom elektrode, prekoračenje granične struje za određenu veličinu ili tip elektrode, pukotine ili napuknuća na elektrodi, te nedovoljna zaštita plinom.

Uključci oksida javljaju se kod TIG i MAG zavarivanja. Posebna vrsta uključaka oksida se aluminijski oksidi, koji se javlja osobito kod aluminijskih legura. Grubo preklapanje oksidnog filma može se dogoditi zbog kombinacije nezadovoljavajuće zaštite od atmosfere kontaminacije i turbulencije u zavarenom spoju. [44]

## 8.4. Naljepljivanje i nedovoljni provar

Naljepljivanje je karakteristična pogreška koja se javlja zbog nepostojanja čvrste veze između osnovnog materijala i materijala elektrode. Po geometriji ova vrsta pogreške najbliža je pukotinama i smanjuje čvrstoću zavarenog spoja. Do ove pogreške dolazi zbog nepravilne tehnike rada, nepravilne pripreme spoja, te neispravnih parametara zavarivanja. Kako bi se izbjeglo naljepljivanje potrebno je posebnu pozornost obratiti pri MIG i MAG zavarivanju jer tu najčešće dolazi do naljepljivanja. [44]

Nedovoljni provar najčešće je rezultat nedovoljnog unosa topline za određeni spoj koji se zavari i obično se vidi na bočnim stijenkama ili na korijenu zavarenog spoja. Ove unutarnje greške teško je otkriti i najčešće su posljedica nepravilnih parametara zavarivanja ili lošeg dizajna spoja. Kako bi se uklonio nedovoljni provar potrebno je brušenje ili uklanjanje problematičnog područja i ponovo zavarivanje. Kako bi spriječilo nepotpuno prodiranje potrebno je koristiti ispravne parametre zavarivanja, koristiti materijal za punjene koji odgovara osnovnom materijalu i ima odgovarajuću temperaturu taljenja. [45]

## 8.5. Pogreške oblika zavara

Pogreške oblika zavara odnose se na nepravilnosti u geometriji zavarenog spoja koje mogu utjecati na njegovu funkcionalnost, estetiku, mehanička svojstva ili izdržljivost. Ove pogreške mogu nastati zbog neadekvatne tehnike zavarivanja, loših parametara zavarivanja, nepravilne pripreme spoja ili materijala, te drugih faktora. Ove vrste pogrešaka relativno je jednostavno odrediti jer su sve pogreške dobro vidljive i mjerljive vizualnim pregledom.

Neke od pogrešaka koje spadaju u ovu skupinu su:

- ugorine uz zavar
- preveliko nadvišenje zavara
- preveliko nadvišenje korijena zavara
- preklop zavara
- nedovoljno popunjen zavar
- nepravilan izgled zavara
- uvučen korijen zavara i dr.

Pogreške oblika zavara mogu značajno utjecati na kvalitetu i trajnost zavarenih konstrukcija, pa je važno razumjeti njihovu prirodu, uzroke i mjere prevencije. [44]

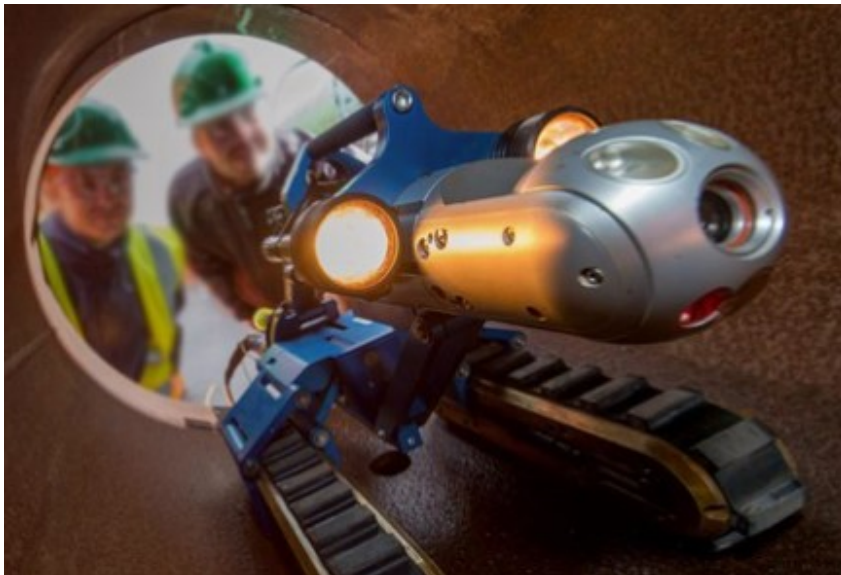
## 9. TRENDOWI RAZVOJA METODA ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA

Razvoj metoda bez razaranja ubrzao se pojavom novih tehnologija i trendova. Automatizacija i napredne tehnike poput umjetne inteligencije (eng. Artificial intelligence, AI), senzora i Interneta stvari (eng. Internet of Things, IoT) transformiraju proizvodne procese. Pomoću tih tehnologija omogućuje se predviđanje kvarova, pametna kontrola, te optimizacija održavanja.

Kako bi se poboljšala analitika i učinkovitost ispitivanja bez razaranja, potrebno je u proces ispitivanja uključiti napredne senzore, računalstvo u oblaku (eng. cloud computing) i umjetnu inteligenciju. Automatizacijom se smanjuje ljudski faktor i optimiziraju radni tokovi, dok se podaci pohranjuju u oblaku, omogućujući tako bolju sigurnost i pristup informacijama.

Pojavom naprednih senzora, koji su opremljeni najnovijim tehnologijama kao što su povezanost s Internetom stvari (IoT), umjetna inteligencija (AI) i algoritmi strojnog učenja (ML), omogućeno je praćenje i analiza u stvarnom vremenu. Time se postiže mogućnost sprječavanja problema prije nego li se on pojavi.

Razvoj robotike i automatizacije revolucionarno je utjecao na ispitivanje bez razaranja povećavajući mogućnosti i učinkovitosti ispitivanja. Dronovi, puzavci i robotske ruke opremljeni NDT sensorima mogu se koristiti na teško dostupnim mjestima i provoditi ispitivanja s neusporedivom preciznošću. Upotrebom robota smanjuje se ljudska intervencija i postiže zadovoljavajući stupanj sigurnosti u opasnim uvjetima. Na slici 9.1. prikazan je puzavac koji je praktičan za ispitivanje cijevi. [48]



*Slika 9.1. Ispitivanje cijevi uz pomoć robota [47]*

Pojava tehnologija poput proširene stvarnosti (AR) i virtualne stvarnosti (VR) utjecala je na način provođenja i tumačenje nerazornih metoda ispitivanja. Alati za imerzivnu vizualizaciju omogućuju ispitivačima da digitalne podatke postavljaju na fizičke objekte, olakšavajući analizu i donošenje odluka u stvarnom vremenu. Osim toga, simulacije temeljene na proširenoj stvarnosti poboljšavaju vještine NDT ispitivača, osiguravajući njihovu stručnost u složenim zadacima inspekcije. Na slici 9.2. prikazano je ispitivanje dijelova zrakoplova uz pomoć virtualne stvarnosti. [48]



*Slika 9.2. Ispitivanje objekta uz pomoć virtualne stvarnosti (VR) [53]*

Zaključno, navedeni trendovi svakodnevno poboljšavaju metode ispitivanja bez razaranja omogućujući im preciznije, učinkovitije i sigurnije ispitivanje i održavanje sustava i materijala.

## 10. EKSPERIMENTALNI RAD

### 10.1. Ispitni uzorak

Ekperimentalni dio rada obavljen je u suradnji sa firmom LBD d.o.o. u Rijeci. Ispitivanje zavara na atestnoj ploči imalo je dva cilja. Prvi cilj bio je utvrđivanje kvalitete zavara na atestnoj ploči, dok je drugi cilj ispitivanja bio prikazati utjecaj napona cijevi i vrste filma na kvalitetu radiograma.

Na slici 10.1. prikazana je atestna ploča čije su dimenzije 300 x 300 x 10 mm, dok je materijal od kojeg je ploča izrađena konstrukcijski čelik S355. Zavar na ploči dobiven je REL 111 postupkom. REL označava kraticu za „Ručno elektrolučno zavarivanje”, a broj 111 predstavlja specifičan postupak ručnog elektrolučnog zavarivanja s obloženom elektrodom. To je jedan od najčešće korištenih postupaka zavarivanja u industriji.

Zavar na ploči ispitan je radiografskom metodom prema normi HRN EN ISO 17636-1 koja je ključna za osiguranje kvalitete i pouzdanosti zavarenih spojeva. Kako bi se utvrdio utjecaj napona cijevi i vrste filma na kvalitetu radiograma, izvršena su četiri ispitivanja.



*Slika 10.1. Atestna ploča*



## 10.2. Ispitna oprema

### 10.2.1. Rendgenski uređaj

Na slici 10.2. prikazan je uređaj korišten za radiografsko ispitivanje zavara na ploči. Radi se o rendgenskom uređaju Comet 200D čiji je proizvođač Comet AG. Comet 200D opremljen je visokokvalitetnom metalo-keramičkom rendgenskom cijevi, a robusno kompozitno kućište štiti sve vitalne dijelove.



*Slika 10.2. Prikaz rendgenskog uređaja proizvođača Comet AG [49]*

Na slici 10.3. prikazana je upravljačka jedinica koja se nalazi uz rendgenski uređaj Comet 200D. Upravljačka jedinica je neizbježna jer se njome omogućuje upravljanje sa sigurne udaljenosti zbog opasnosti od zračenja. Također sadrži kalkulator ekspozicije i ima sučelje sa širokim rasponom naprednih funkcija. Na upravljačkoj jedinici nalazi se sigurnosna sklopka koja služi kao osigurač prije i nakon ispitivanja.



*Slika 10.3. Prikaz upravljačke jedinice za Comet 200D [51]*

### 10.2.2. Radiografski film

Za ispitivanje atestne ploče odabrani su filmovi AGFA Structurix D5 i AGFA Structurix D7. AGFA Structurix D5 nudi viši kontrast i bolju oštrinu u odnosu na AGFA Structurix D7, ali zahtijeva duže vrijeme ekspozicije. Odabirom ove dvije vrste filmova htjela se pokazati razlika u kvalitetama radiograma. Dimenzije radiografskog filma su 100 x 240 mm.



*Slika 10.4. Kutije u kojima se nalaze radiografski filmovi proizvođača AGFA [50]*

### 10.2.3. Indikator kvalitete radiograma (IKR)

Na slici 10.5. prikazan je indikator kvalitete radiograma koji kao zadatak ima određivanje kvalitete razvijenog radiograma. Svaki indikator kvalitete radiograma nosi oznaku broja najtanje pripadajuće žice i oznaku materijala za čije je grupe namijenjen, a indikator korišten za ispitivanje nosio je oznaku 10 FE EN. Kako bi razvijeni radiogram zadovoljio zahtjeve norme HRN EN ISO 17636-1, treba biti vidljiva 14 žica.



*Slika 10.5. Žičani indikator kvalitete radiograma [51]*

#### 10.2.4. Sustav za obradu filma

Potrebna je kemijska obrada filma kako bi se latentna slika pretvorila u vidljivu sliku ispitivanog objekta. Taj proces odrađen je uz pomoć sustava za razvijanje filma koji se nalazi na slici 10.6. Za ispitivanje koristio se KOWOPRO K čiji je proizvođač KOWOTEST. Unutar bazena koji se može grijati ili hladiti nalaze se tri mala spremnika u kojima su razvijач, voda za ispiranje i fiksir. Uz tri mala spremnika nalazi se i jedan veliki spremnik koji služi za konačno pranje fiksiranih filmova.



*Slika 10.6. Prikaz sustava za razvijanje filma proizvođača KOWOTEST [52]*

#### 10.2.5. Iluminator

Nakon razvijanja radiograma, vrši se detaljna analiza pomoću iluminatora koji se nalazi na slici 10.7. Na iluminatoru nalazi se svjetleća površina čiji se intenzitet svjetlosti može podešavati, te služi za osvjetljavanje radiografskih snimaka. Konstrukcija i karakteristike iluminatora definirane su normama. Za pregled radiograma koristio se iluminator Kowolux M proizvođača KOWOTEST.



*Slika 10.7. Prikaz iluminatora proizvođača KOWOTEST [52]*

#### 10.2.6. Denzitometar

Denzitometar je uređaj koji mjeri optičku gustoću radiografskih filmova. Na slici 10.8. nalazi se denzitometar Densorapid D proizvođača KOWOTEST koji je korišten u ispitivanju. Denzitometar korišten za ispitivanje može očitavati zacrnjenja maksimalne vrijednosti 4,0.



*Slika 10.8. Prikaz denzitometra proizvođača KOWOTEST [52]*

## 10.3. Postupak ispitivanja

### 10.3.1. Ispitivanje atestne ploče

Prije samog početka ispitivanja radiografijom, potrebno je izvršiti čišćenje površine ploče kako bi se uklonile sve nečistoće, masnoće ili boje koje mogu utjecati na sam rezultat ispitivanja. Nakon što je ploča očišćena kreće se s pripremom za ispitivanje. Priprema započinje s postavljanjem rendgenskog uređaja na poziciju i propisanu visinu. Na slici 10.9. prikazan je rendgenski uređaj Comet 200D koji je korišten za ispitivanje.



*Slika 10.9. Priprema rendgenskog uređaja za ispitivanje*

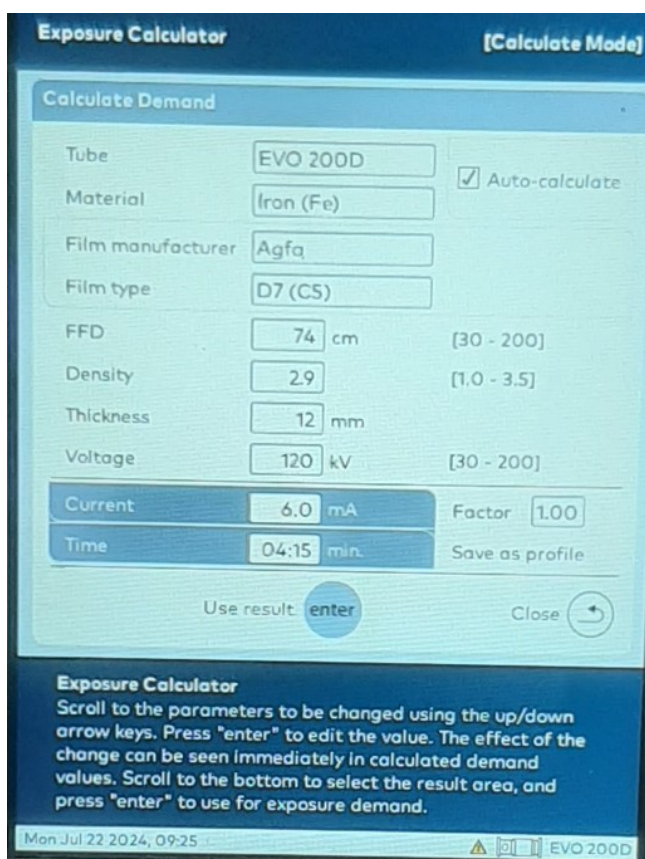
Osim pripreme rendgenskog uređaja, potrebno je pripremiti i radiografske filmove. Za potrebe ispitivanja koristili su se filmovi proizvođača AGFA čije su dimenzije 100 x 240 mm. Na radiografske filmove postavljaju se olovne oznake i indikatori kvalitete radiograma kao što je prikazano na slici 10.10. Na suprotnu stranu zavora od izvora zračenja postavlja se radiografski film. Ključno je da film bude pravilno pozicioniran i da prilikom snimanja bude stabilan.



*Slika 10.10. Postavljanje olovnih oznaka i IKR na radiografski film*

Nakon što je radiografski film ispravno postavljen ispod ploče čiji se zavar ispituje, može se početi s izračunom vremena ekspozicije. Vrijeme ekspozicije ključno je za postizanje jasnog i kvalitetnog radiografskog snimka. Krivo izračunavanje vremena ekspozicije može dovesti do presvijetlih ili pretamnih snimaka. Na vrijeme ekspozicije utječu mnogi faktori kao što su debljina materijala, vrsta materijala, napon i struja cijevi, udaljenost između izvora i filma i osjetljivost filma. Vrijeme ekspozicije određuje se na upravljačkoj jedinici koja je povezana s rendgenskim uređajem.

Na slici 10.11. prikazano je sučelje za izračunavanje vremena ekspozicije s danim parametrima. Film koji se koristio za ispitivanje je AGFA Structurix D7 čija je klasa C5. Udaljenost između izvora zračenja i filma iznosi 740 mm. Za željeno konačno zacrnjenje uzima se vrijednost 2,9. Napon cijevi iznosi 120 kV, dok je struja cijevi 6 mA. Nakon što su uneseni svi parametri, kalkulator na upravljačkoj jedinici izračunava vrijeme ekspozicije koje iznosi 4 min 15 sec.



*Slika 10.11. Izračunavanje vremena ekspozicije za unesene parametre*

Kada je dobiveno vrijeme ekspozicije može se početi sa samim ispitivanjem. Prije samog ispitivanja potrebno je okrenuti sigurnosni mehanizam koja se nalazi na upravljačkoj jedinici. Pritiskom na prekidač započinje emitiranje rendgenskih zraka, te u tom trenutku kreće ozračivanje zavara. Tijekom vremena ekspozicije ispitivani zavar kontinuirano je izložen zračenju, a rendgenske zrake prolaze kroz zavar i stvaraju latentnu sliku. Nakon što istekne vrijeme ekspozicije, potrebno je zatvoriti sigurnosni mehanizam kako bi se onemogućilo slučajno emitiranje rendgenskih zraka.

Ispitivanje zavara je ponovljeno još tri puta, ali s drugim parametrima. Kod drugog ispitivanja odabran je film AGFA Structurix D5 čija je klasa C4, dok u trećem i četvrtom ispitivanju klasa filma ostaje ista. Kod trećeg i četvrtog ispitivanja promijenjen je samo napon na rendgenskoj cijevi, te su za napon uzete vrijednosti 90 kV i 140 kV.

### 10.3.2. Obrada radiografskog filma

Nakon snimanja zavora, film je spreman za obradu. Film se razvija u klimatiziranoj tamnoj komori pod crvenim svjetlom kako bi se izbjegli neželjeni utjecaji svjetlosti prilikom razvijanja filma. Obrada filma obavljena je na sustavu za obradu filma prikazanom na slici 10.12.



*Slika 10.12. Sustav za obradu filma*

Prvi korak u ručnoj obradi je pažljivo postavljanje filma u okvire od nehrđajućeg čelika. Nakon što je film postavljen u okvire, uranja se u razvijač. Razvijači su alkalne otopine koje pretvaraju latentnu ili kemijski pohranjenu sliku u radiografskoj emulziji u vidljivu sliku, stvarajući različite nijanse sive ili crne, ovisno o količini izloženosti. Sredstva u razvijaču uzrokuju redukciju izloženih srebrnih halogenida u crno metalno srebro. Film u razvijaču stoji uronjen 7 minuta na temperaturi od 20°C. Nakon što je film proveo potrebno vrijeme u razvijaču, film se prebacuje u vodenu kupelj na 1 minutu. Prebacivanjem u vodenu kupelj zaustavlja se aktivnost razvijanja filma. Sljedeći korak je uranjanje filma u fiksir. Fiksir uklanja neizložene kristale srebrnog halogenida koji ostaju u filmu, te fiksira ili učvršćuje sliku. Film u fiksiru stoji uronjen 15 minuta. Ukoliko bi se film držao nedovoljno dugo u fiksiru, to bi moglo rezultirati time da slika na filmu dobije žućkastu ili smečkastu nijansu. Nakon fiksiranja, film se uranja u vodu za ispiranje na 30 minuta. Voda se kontinuirano mijenja kako bi se uklonili svi preostali tragovi razvijača ili fiksira. Ako bi se film ranije izvadio iz vode za ispiranje, to može dovesti da skraćivanja arhivske karakteristike filma, što može dovesti do toga da film s



vremenom postane žut ili smeđ. Završni korak u obradi je sušenje filma, što se obično radi u sušilici s toplim zrakom ili vješanjem na špagu gdje se suši prirodno na zraku. Odabrana je metoda prirodnog sušenja vješanjem na špagu i trajanje sušenja je 1 dan.

### 10.3.3. Analiza radiograma

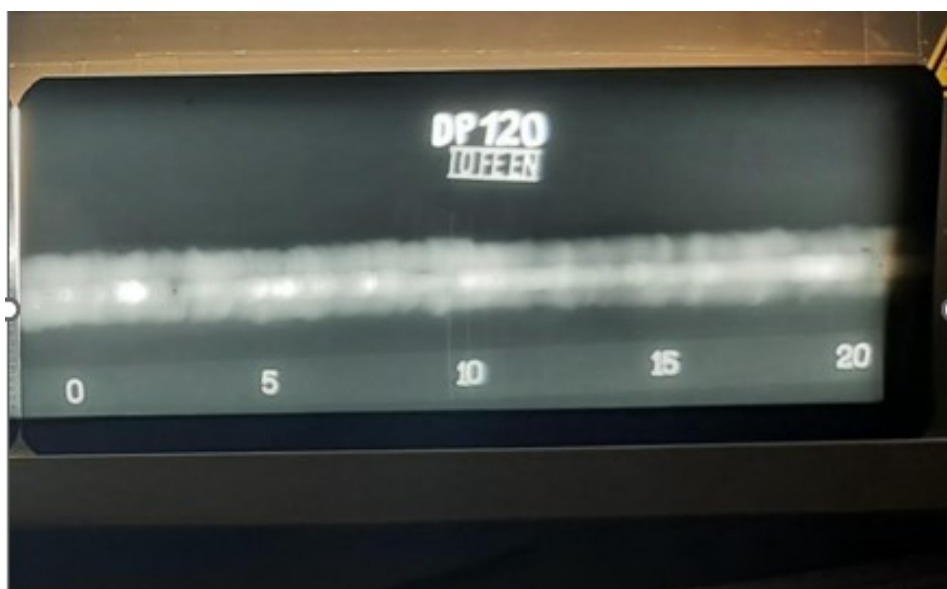
Nakon razvijanja filma, radiogrami se pregledavaju i ocjenjuju pomoću iluminatora i denzitometra. Prvi korak u provjeravanju radiograma je utvrđivanje zacrnljenja koje mora odgovarati zahtjevima norme HRN EN ISO 17636-1. Zacrnjenje se utvrđuje pomoću denzitometra. U tablici 10.1 prikazani su zahtjevi norme HRN EN ISO 17636-1 ovisno o klasi ispitivanja. Klasa A je osnovna i manje osjetljiva tehnika ispitivanja, te se primjenjuje za ispitivanja kod kojih je brzina i ekonomičnost važnija od osjetljivosti. Klasa B je naprednija tehnika s višim standardima osjetljivosti i preciznosti. Klasa B se koristi kada klasa A nije dovoljna zbog potrebe za većom osjetljivošću ili kvalitetom ispitivanja. Budući da je klasa ispitivanja B, zacrnljenje mora biti  $\geq 2,3$ , a broj vidljivih žica na radiogramu 14.

*Tablica 10.1. Zahtjevi norme HRN EN ISO 17636-1*

Klasa ispitivanja	Optička gustoća (zacrnljenje)	Potreban broj vidljivih žica na radiogramu*
A	$\geq 2,0$	W 13
B	$\geq 2,3$	W 14

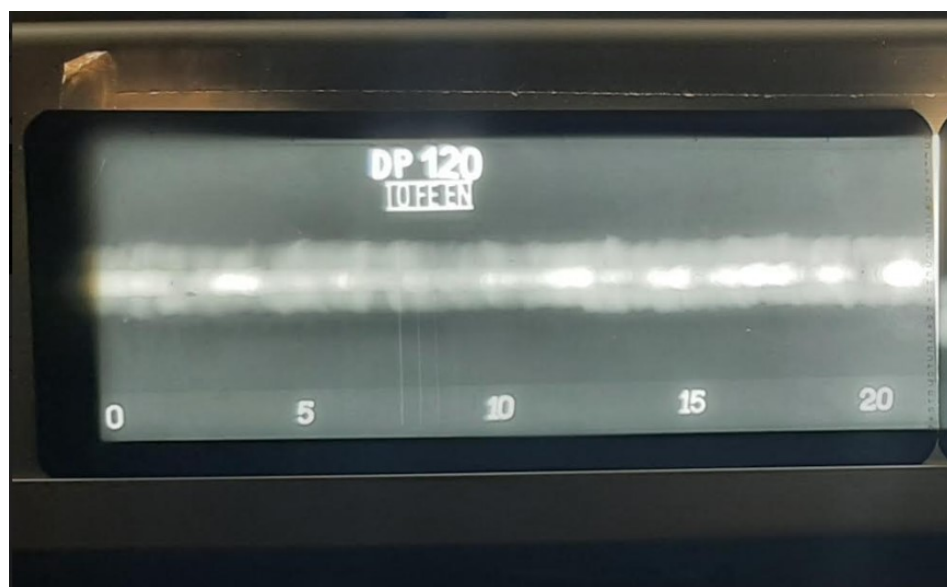
\*za atestnu ploču debljine 10mm.

Na slici 10.13. prikazan je radiogram zavara DP120(D5) čija je klasa filma C4. Denzitometrom je utvrđeno zacrnljenje 2,9, što znači da zadovoljava normu HRN EN ISO 17636-1. Postignuta je visoka kvaliteta osjetljivosti, budući da je broj vidljivih žica 16. U konačnici radiogram DP120(D5) ocijenjen je kao prihvatljiv.



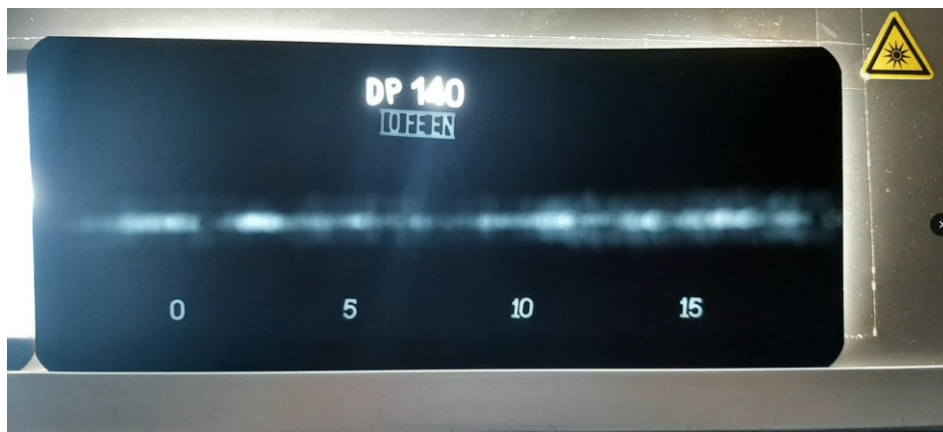
*Slika 10.13. Radiogram zavara DP120(D5)*

Na slici 10.14. prikazan je radiogram zavara DP120(D7) čija je klasa filma C5. Denzitometrom je utvrđeno zacrtnjenje 3,2 , što znači da zadovoljava normu HRN EN ISO 17636-1. Postignuta je visoka kvaliteta osjetljivosti, budući da je broj vidljivih žica 15. U konačnici radiogram DP120(D7) ocijenjen je kao prihvatljiv.



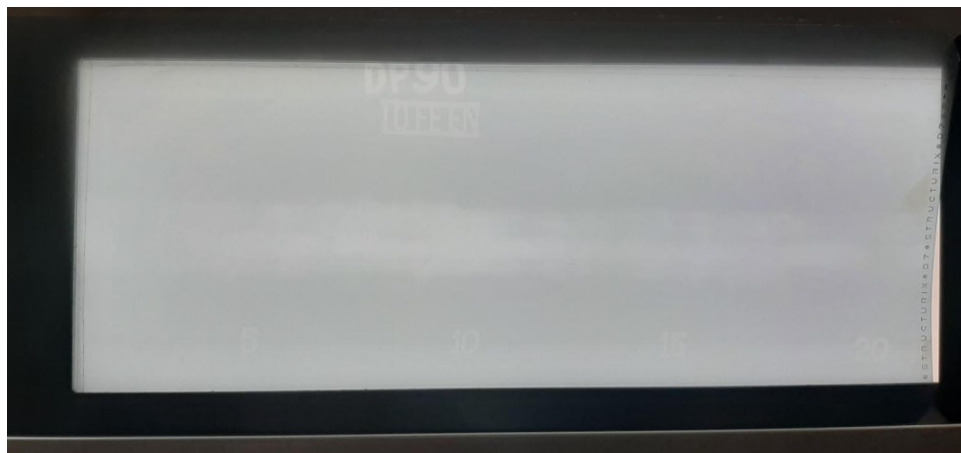
*Slika 10.14. Radiogram zavara DP120(D7)*

Na slici 10.15. prikazan je radiogram zavora DP140(D7) čija je klasa filma C5. Denzitometrom je utvrđeno zacrtnjenje koje iznosi preko 4,0. To je maksimalna vrijednost koju može očitati denzitometar korišten za ispitivanje. Uzrok smanjene osjetljivosti je pretjerana izloženost filma zračenju. Na radiogramu je vidljivo 13 žica što ne zadovoljava prema normi HRN EN ISO 17636-1. Radiogram je ocjenjen kao neprihvatljiv.



*Slika 10.15. Radiogram zavora DP140(D7)*

Na slici 10.16. prikazan je radiogram zavora DP90(D7) čija je klasa filma C5. Denzitometrom je utvrđeno zacrtnjenje 0,35, što znači da ne zadovoljava normu HRN EN ISO 17636-1. Uzrok smanjene osjetljivosti je premala izloženost filma zračenju. Radiogram je ocjenjen kao neprihvatljiv.



*Slika 10.16. Radiogram zavora DP90(D7)*

Iz tablice 10.2. možemo uočiti da su dva radiograma ocijenjena kao prihvatljiva. Kod oba radiograma zadovoljene su norme za zacrtnjenje i za stupanj osjetljivosti. Za daljnje ocjenjivanje ispitivanog

zavara koristi će se radiogram DP120(D5) jer je postignuto traženo zacrnljenje i vidljiv je najveći broj žica što znači da je i najveća kvaliteta radiograma.

Tablica 10.2. Detaljan prikaz analize radiograma

Naziv radiograma	Klasa filma	Oznaka filma	Zacrnljenje	Broj žica	Ocjena radiograma	
					A*	NA**
DP120(D7)	C5	D7	3,2	15	X	
DP120(D5)	C4	D5	2,9	16	X	
DP140(D7)	C5	D7	> 4,0	13		X
DP90(D7)	C5	D7	0,35	12		X

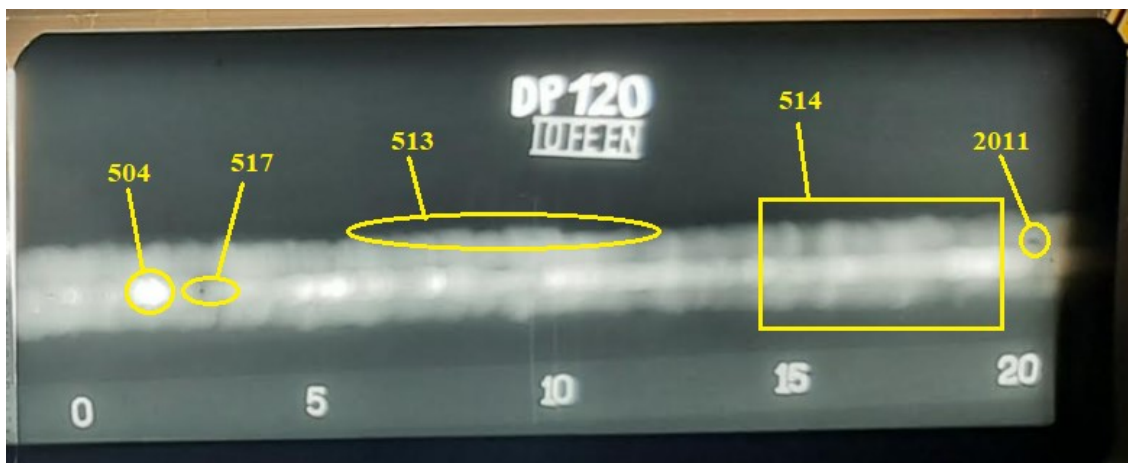
\*A - Prihvatljivo

\*\* NA - Neprihvatljivo

#### 10.4. Rezultati ispitivanja

Nakon što su se analizirali radiogrami prelazi se na ocjenjivanje zavara na ploči. Kriterij prihvatljivosti za ispitani zavar definiran je normom HRN EN ISO 10675-1, razina prihvatljivosti 1, što odgovara kriteriju prihvatljivosti norme HRN EN ISO 5817, razina prihvatljivosti B. Razina B primjenjuje se na zavarene spojeve gdje su potrebni visoki standardi kvalitete. Klasifikacija indikacija u zavarenom spoju su u skladu sa normom HRN EN ISO 6520-1.

Na slici 10.17. prikazan je radiogram DP120(D5) sa istaknutim nepravilnostima u zavaru. Prema HRN EN ISO 6520-1 utvrđene su nepravilnosti: 513 – neravnomjerna širina zavara, 514 – neravnomjerno lice zavara, 504 – preveliko nadvišenje na korjenu, 2011 - pojedinačni plinski uključci, 517 - loš nastavak zavara.



Slika 10.17. Nepravilnosti u zavaru

Prema normi HRN EN ISO 5817, loš nastavak zavara nije prihvatljiv za razinu prihvatljivosti B. U zavarenim spojevima koji podliježu ovoj razini prihvatljivosti, svi prijelazi moraju biti glatki i ravnomjerni kako bi se osigurala optimalna mehanička svojstva i izdržljivost. Zbog te nepravilnosti, zavar se ne može klasificirati kao prihvatljiv.

Preostale nepravilnosti ne utječu značajno na mehanička svojstva zavara i unutar su dopuštenih granica prema normi HRN EN ISO 5817, razina prihvatljivosti B.

		<b>IZVJEŠTAJ RADIOGRAFSKOG ISPITIVANJA</b> <b>RADIOGRAPHIC TEST REPORT</b>				Oznaka dokumenta/Document No:						
						Datum/Date: 22/07/2024	List/Page: 1/2					
Naručilac: Customer:	<b>Tehnički fakultet Rijeka</b>		Lokacija: Location:	<b>Rijeka, Hrvatska</b>								
Korisnik: User:	/		Objekt: Object:	<b>Atestna ploča</b>								
Ugovor br.: Contract No.:	/		Dio objekta: Part of object:	<b>Zavareni spoj</b>								
Radni nalog: Work order:	/		Nacrt: Drawing:	/								
Ispitni postupak: Test procedure:	<b>5-1 PRT</b>		Norma ispitivanja: Standard test:	<b>EN ISO 17636-1 KIB</b>								
Opseg ispitivanja: Extent of examination:	<b>100% zavarenog spoja</b>		Norma za kriterij prihvatljivosti: Acceptance level:	<b>EN ISO 10675-1 Ivl 1 EN ISO 5817 KIB</b>								
Vrijeme ispitivanja: Time of examination:	<b>Nakon zavarivanja</b>		Klasifikacija indikacija: Classification of indications:	<b>EN ISO 6520-1</b>								
Tehnika isp. Test type	Tip zavara Type weld	Oblik zavara Weld shape	Dimenzija zavara (mm) Dimensions (mm)		Materijal Material	Postupak zavarivanja Welding procedure	Stanje površine Surface condition					
1	BW	V	300 x 300 x 10		Čelik S355	111 Rel	Očišćen					
Klasa ispitivanja Class tests	Položaj filma Position of the film	Broj ekspozicija No. of exposures	Broj filmova po ekspoziciji No. of films after exposure	Zacrnenje Density	Broj žice Wire No.	Oznaka IQI Mark of IQI	Položaj IQI Position of IQI					
1	B	JS/JS	1	1	+2.4	14	10FE	Na izvoru				
Klasa filma Film class	Oznaka filma Film sign	Proizvođač filma Film manufacturer	Dimenzije filma (mm) Film dimensions (mm)		Debljina prednje folije (mm) Front screen thickness	Debljina zadnje folije (mm) Back screen thickness	Razvijanje filma Processing					
1	C4	D5	AGFA		100 x 240	0.9	/	Ručno				
Izvor zračenja / proizvođač: Source type / producer		Vel. izvora (mm) Source size	Napon cijevi (kV) Tube voltage	Struja cijevi (mA) Tube current	Aktivnost (TBq) Source activity	Vrijeme ekspozicije (min) Exposure time	Udaljenost izvor-objekt Distance source to object	Udaljenost objekti-film Distance object to film				
1		200D	COMET	1 mm	120	6.0	/	4.15"	740	10		
Zavar / Weld				Nalaz ispitivanja / Test results					Ocjenjena razina Evaluation of finding	Napomena Remark		
Zavar br. Weld No.	Dimenzije (mm) Dimensions (mm)	Položaj Position	Šifra Zavarivača Weld No.	Film br. Film No.	Tehnika Test type	Zacrnenje Density	Žica br. Wire No.	Oznaka indikacija - HRN EN ISO 6520-1 Classification of imperfections HRN EN ISO 6520-1				
DP120 (D8)	300 x 300 x 10	/	/		1	2.9	16	513, 2011, 514, 504, 517	A	NA	X	/
Ispitao: Examined by:			Dobrio: Approved by:			Nadzor: Surveyor:			Datum ispitivanja: Date of examination:			
Domagoj Pešut									22/07/2024			

## 11. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu detaljno su istražene i analizirane metode ispitivanje bez razaranja. Ispitivanje bez razaranja je skup metoda za procjenu kvalitete prilikom kojih ne dolazi do oštećenja ili narušavanja funkcionalnosti ispitivanog objekta. Vizualno ispitivanje je najosnovnija metoda kojom se mogu ispitati površinske nepravilnosti. U većini slučajeva ispitivanje se može provesti golim okom, što znači da ne zahtijeva skupu opremu. Za otkrivanje otvorenih nepravilnosti na površini, poput pukotina, poroznosti ili pora koristi se penetrantska metoda ispitivanja. Može se koristiti za ispitivanje gotovo bilo kojeg materijala, pod uvjetom da njegova površina nije izuzetno gruba ili porozna. Za materijale koji se mogu lako magnetizirati koristi se metoda ispitivanja magnetskim česticama. Ova metoda omogućuje lociranje i procjenu nepravilnosti koje se nalaze na površini ili neposredno ispod površine. Kada je potrebno provesti ispitivanje unutrašnjosti materijala tada se odabire ultrazvučna ili radiografska metoda ispitivanja. Kod ultrazvučnog ispitivanja u materijal koji se ispituje, uvode se ultrazvučni valovi visokih frekvencija. Nepravilnost u materijalu određuje se pomoću odjeka koji je prikazan na ultrazvučnom uređaju. Radiografska metoda ispitivanja za pregled unutrašnjosti materijala koristi rendgenske ili gama zrake. Princip ove metode zasniva se na zračenju koje prolazi kroz materijal i stvara sliku na filmu. Film je potrebno kemijski obraditi kako bi se iz latentne slike dobila vidljiva slika s koje se mogu očitati nepravilnosti.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je radiografsko ispitivanje. Atestna ploča na kojoj se nalazi zavar izrađena je od konstrukcijskog čelika S355, čije su dimenzije 300 x 300 x 10 mm. Proveden je cijeli postupak razvijanja radiograma koji je kasnije poslužio za analizu zavara. Analizom radiograma DP120(D5) pronađene su geometrijske nepravilnosti, kao što su neravnomjerna širina zavara, neravnomjerno lice zavara, pojedinačni plinski uključci, preveliko nadvišenje na korjenu i loš nastavak zavara. Rezultati ispitivanja ne zadovoljavaju kriterije prihvatljivosti definirane normom HRN EN ISO 5817, razine prihvatljivosti B zbog toga što razina B zahtijeva gotovo savršeni zavar. Zavar je klasificiran kao neprihvatljiv.

Drugi cilj ovog radiografskog ispitivanja bilo je prikazati utjecaj energije zračenja i vrste filma na kvalitetu radiograma. Ustanovljeno je da promjena napona na cijevi rendgenskog uređaja utječe na energiju rendgenskih zraka i prodiranje kroz materijal, što može utjecati na kontrast i detalje na radiogramu. Kvaliteta filma izravno utječe na razlučivost, kontrast i opću kvalitetu slike. Za postizanje kvalitetnog radiogram potrebno je uskladiti napon na rendgenskoj cijevi, kvalitetu filma, te druge kao parametre ispitivanja.

## LITERATURA

- [1] TRAINING COURSE SERIES No.9 : „Non-destructive Testing: A Guidebook for Industrial Management and Quality Control Personnel“, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 1999.
- [2] Hellier, C. : „Handbook of nondestructive evaluation“, MCGRAW – HILL PROFESSIONAL PUBLISHING, 2001.
- [3] PP Kontroltech : <https://www.ppkontroltech.sk/a/co-je-ndt-a-preco-bez-neho-nemoze-priemysel-existovat>, s interneta, 25.svibnja 2024.
- [4] Format NDT Ltd : <https://www.formatndt.co.uk/advantages-and-disadvantages-of-non-destructive-testing/>, s interneta, 26.svibnja 2024.
- [5] HT NDT : <https://hitechndt.com/visual-inspection.html>, s interneta, 02.lipnja 2024.
- [6] Raj, B., Jayakumar, T., Thavasimuthu, M. : „Practical Non-destructive testing“, WOODHEAD PUBLISHING, 2002.
- [7] Pallakki : <https://www.pallakkindt.com/visual.php> , s interneta, 12.lipnja 2024.
- [8] Sai Group of Companies : <https://www.sisnde.com/asiaseservices.html>, s internet, 29. kolovoza 2024.
- [9] VOLIRO : <https://voliro.com/blog/visual-inspection/>, s interneta, 12.lipnja 2024.
- [10] Medium : <https://masrath-sultana.medium.com/non-destructive-testing-using-liquid-penetrant-inspection-d104edaa5d3c> , s interneta, 25.lipnja 2024.
- [11] KSK NDT ENGINEERS : <https://www.kskndtengineers.com/post/asnt-ndt-level-2-liquid-penetrant-testing-course>, s interneta, 26.lipnja 2024.
- [12] IOWA STATE UNIVERSITY : <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/PenetrantTest/PTMaterials/ptmaterials.xhtml>, s interneta, 26.lipnja 2024.
- [13] VIM : <https://www.vimts.co.th/liquid-penetrant-testing/>, s interneta, 28.lipnja 2024.
- [14] INTREPID Aerospace : <http://www.intrepidaerospace.com/index.php/services/accesories>, s interneta, 28.lipnja 2024.
- [15] NDTKITS : <https://ndt-kits.com/ultrasonic-testing/>, s interneta, 02.srpnja 2024.
- [16] EUROLAB : <https://www.laboratuar.com/hr/testler/mekanik-testleri/iso-5577-tahribatsiz-muayene---ultrasonik-muayene---sozlu/> , s interneta, 02.srpnja 2024.
- [17] TRAINING COURSE SERIES No.10 : „Ultrasonic Testing of Materials at Level 2“, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna, 1999.

- [18] ResearchGate : [https://www.researchgate.net/figure/Longitudinal-and-shear-wave-propagation-116\\_fig4\\_242385010](https://www.researchgate.net/figure/Longitudinal-and-shear-wave-propagation-116_fig4_242385010) , s interneta, 05.srpnja 2024.
- [19] ResearchGate : [https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-ultrasonic-through-transmission-testing\\_fig4\\_368781136](https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-ultrasonic-through-transmission-testing_fig4_368781136) , s interneta, 05.srpnja 2024.
- [20] ResearchGate : [https://www.researchgate.net/figure/a-A-Scan-plot-b-Typical-Ultrasonic-pulse-echo-system-9\\_fig9\\_309858589](https://www.researchgate.net/figure/a-A-Scan-plot-b-Typical-Ultrasonic-pulse-echo-system-9_fig9_309858589) , s interneta, 06.srpnja 2024.
- [21] Constrofacilitator: <https://constrofacilitator.com/what-is-the-history-of-ultrasonic-testing/> , s interneta, 31.kolovoza 2024.
- [22] IOWA STATE UNIVERSITY : <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/PenetrantTest/Principles/prosandcons.xhtml> , s interneta, 08.srpnja 2024.
- [23] Medium : <https://medium.com/@saaswriter/the-advantages-and-limitations-of-ultrasonic-testing-68021dafd4f> , s interneta, 11.srpnja 2024.
- [24] BES Group : <https://besgroup.com/services/testing/non-destructive-testing/magnetic-particle-inspection/> , s interneta, 17.srpnja 2024.
- [25] Pinterest : <https://www.pinterest.com/pin/eletro-magnetism--287808232412655573/> , s interneta, 17.srpnja 2024.
- [26] Fushun Special Steel: <https://www.fushunspecialsteel.com/magnetic-particle-inspection-mpi/> , s interneta, 18.srpnja 2024.
- [27] C. E. Betz : „Principles of magnetic particle testing“, MAGNAFLUX CORPORATION, 1967.
- [28] Paul E.Mix : „Introduction to nondestructive testing“ Second Edition, WILEY-INTERSCIENCE, 2005.
- [29] Smokvina Hanza, S.: : „NERAZORNA ISPITIVANJA: ISPITIVANJE MAGNETSKIM ČESTICAMA“, Tehnički fakultet, Rijeka, 2021.
- [30] SIMS : <https://simsndt.com/Wet-Horizontal-MPI-Unit-manufacturer-in-india.html> , s interneta, 21.srpnja 2024.
- [31] Halmshaw, R. : „Industrial Radiology Theory and practice“, Springer, 1995.
- [32] Smokvina Hanza, S.: : „NERAZORNA ISPITIVANJA: RADIOGRAFSKO ISPITIVANJE“, Tehnički fakultet, Rijeka, 2021.
- [33] Kemija 1: <https://edutorij-admin-api.carnet.hr/storage/extracted/e78bfca5-654d-4dcc-b431-7b505feb6fa4/kemija-1/m02/j03/index.html> , s interneta, 25.srpnja 2024.
- [34] de Raad, J.A., Kuiper, G.A.: „Industrial Radiography: Image forming techniques“, GE Inspection Technologies, 2008.



- [35] Radiology Cafe: <https://www.radiologycafe.com/frcr-physics-notes/x-ray-imaging/production-of-x-rays/>, s interneta, 26.srpnja 2024.
- [36] What is piping : <https://whatispiping.com/radiographic-testing/>, s Internet, 30.srpnja 2024.
- [37] NDT. : <https://www.ndt.com.au/ndt-radiography-applications-tools-accurate-testing/>, s interneta, 3.kolovoza 2024
- [38] NDT Group : <https://www.ndtgroup.co.uk/latest-news/radiographic-testing-adv-disadv/>, s interneta, 4.kolovoza 2024.
- [39] Slideshare : <https://www.slideshare.net/slideshow/radiography-testing-pdf/259178917>, 11.kolovoza 2024.
- [40] ALLGAS : <https://allgas.us/b/what-are-welding-defects--types-causes-and-remedies> , s interneta 16.kolovoza 2024.
- [41] Welding Value by KEMPPI: <https://weldingvalue.com/2024/02/common-welding-defects/#1c064e40>, s interneta, 16.kolovoza 2024.
- [42] Universal tehcnical institute: <https://www.uti.edu/blog/welding/what-is-porosity-in-welding>, s interneta, 16.kolovoza 2024.
- [43] EZIIL: <https://eziil.com/weld-porosity/>, s interneta, 18.kolovoza 2024.
- [44] Juraga, I., Ljubić, K., Živčić, M. : „Pogreške u zavarenim spojevima“, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2001.
- [45] Welding tech: <https://weldingtech.net/incomplete-joint-penetration/>, s interneta, 19.kolovoza 2024.
- [46] PrimeWeld: <https://primeweld.com/blogs/news/what-is-slag-inclusion-in-welding>, s interneta 20.kolovoza 2024.
- [47] CISION PRWeb: <https://www.prweb.com/releases/eddyfi-technologies-acquires-ndt-robotics-leader-inuktun-821339736.html>, s interneta, 29.kolovoza 2024.
- [48] ONESTOP NDT: <https://www.onestopndt.com/ndt-articles/future-of-ndt>, s interneta, 29.kolovoza 2024.
- [49] MPM: <https://www.mpmproducts.com/comet-portable-x-ray-systems.html>, s interneta, 22.srpnja 2024.
- [50] INTECH NDE: <https://www.intechnde.com/product/film/>, s interneta, 22.srpnja 2024.
- [51] LINGTEC: <https://lingtec.net/product/penetrameter/>, s interneta, 22.srpnja 2024.
- [52] FORCE Technology: <https://ndtproducts.forcetechnology.com/product-category/x-ray-testing/equipment-x-ray-testing/>, s interneta, 22.srpnja 2024.

[53] Wright – Patterson AFB : <https://www.wpafb.af.mil/News/Photos/igphoto/2001954810/>, s interneta, 02.rujna 2024.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Najčešće korištene NDT metode .....	3
Slika 3.1. Vizualna metoda ispitivanja .....	6
Slika 3.2. Vizualno ispitivanje pomoću oka .....	7
Slika 3.3. Oprema za vizualno ispitivanje .....	8
Slika 4.1. Ispitivanje tekućim penetrantima .....	10
Slika 4.2. Postupak ispitivanja tekućim penetrantima .....	12
Slika 4.3. Ispitivanje pomoću obojenog penetranta .....	13
Slika 4.4. Ispitivanje pomoću fluorescentnog penetranta .....	13
Slika 5.1. Ultrazvučno ispitivanje .....	16
Slika 5.2. Longitudinalni i transverzalni valovi .....	17
Slika 5.3. Princip ispitivanja tehnikom prozvučavanja .....	18
Slika 5.4. Tipični ultrazvučni sustav odjeka pulsa .....	19
Slika 5.5. A-prikaz .....	20
Slika 5.6. B-prikaz (bočni pogled) .....	20
Slika 5.7. C-prikaz (pogled iz ravnine) .....	21
Slika 5.8. Oprema za ultrazvučno ispitivanje .....	21
Slika 6.1. Ispitivanje magnetskim česticama .....	25
Slika 6.2. Prikaz magnetskog polja .....	26
Slika 6.3. Primjena magnetskih čestica na ispitivanoj površini .....	27
Slika 6.4. Uređaj za demagnetizaciju .....	28
Slika 6.5. Stacionarni stol s opremom za magnetiziranje .....	29
Slika 6.6. Magnetski jaram .....	30
Slika 6.7. UV lampa .....	30
Slika 7.1. Radiografski sustav .....	32
Slika 7.2. Spektar elektromagnetskog zračenja .....	33
Slika 7.3. Shema rendgenske cijevi .....	34
Slika 7.4. Energetski spektri pri različitim naponima cijevi .....	35
Slika 7.5. Energetski spektri pri različitim vrijednostima struje cijevi .....	35
Slika 7.6. Radioizotopi sa karakteristikama .....	36
Slika 7.7. Struktura radiografskog filma .....	37
Slika 8.1. Pukotina u zavarenom spoju .....	43

Slika 8.2. Poroznost u zavarenom spoju .....	43
Slika 8.3. Pojava troske kod zavarenog spoja .....	44
Slika 9.1. Ispitivanje cijevi uz pomoć robota .....	46
Slika 9.2. Ispitivanje objekta uz pomoć virtualne stvarnosti (VR) .....	47
Slika 10.1. Atestna ploča .....	48
Slika 10.2. Prikaz rendgenskog uređaja proizvođača Comet AG .....	49
Slika 10.3. Prikaz upravljačke jedinice za Comet 200D .....	49
Slika 10.4. Kutije u kojima se nalaze radiografski filmovi proizvođača AGFA .....	50
Slika 10.5. Žičani indikator kvalitete radiograma .....	50
Slika 10.6. Prikaz sustava za razvijanje filma proizvođača KOWOTEST .....	51
Slika 10.7. Prikaz iluminatora proizvođača KOWOTEST .....	52
Slika 10.8. Prikaz denzitometra proizvođača KOWOTEST .....	52
Slika 10.9. Priprema rendgenskog uređaja za ispitivanje.....	53
Slika 10.10. Postavljanje olovnih oznaka i IKR na radiografski film.....	54
Slika 10.11. Izračunavanje vremena ekspozicije za unesene parametre .....	55
Slika 10.12. Sustav za obradu filma.....	56
Slika 10.13. Radiogram zavora DP120(D5).....	58
Slika 10.14. Radiogram zavora DP120(D7).....	58
Slika 10.15. Radiogram zavora DP140(D7).....	59
Slika 10.16. Radiogram zavora DP90(D7).....	59
Slika 10.17. Nepravilnosti u zavaru .....	60

## POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Ključni događaji u razvoju NDT-a .....	4
Tablica 10.1. Zahtjevi norme HRN EN ISO 17636-1 .....	57
Tablica 10.2. Detaljan prikaz analize radiograma .....	60

## SAŽETAK

Ovaj diplomski rad na temu „Nerazorna ispitivanja zavarenih spojeva“ sastoji se od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu rada objašnjene su metode ispitivanja bez razaranja, detaljno su prikazane njihove primjene, te prednosti i nedostaci. Posebna pažnja posvećena je radiografskom ispitivanju zbog njegove primjene u eksperimentalnom dijelu rada. Navedene su karakteristične greške koje se mogu pojaviti u zavarenim spojevima i utjecati na čvrstoću i funkcionalnost elemenata. Svaka grupa grešaka detaljno je opisana, te su navedeni uzroci njihovog nastajanja. Također su navedeni trendovi razvoja koji su donijeli značajnu transformaciju u NDT području, s ciljem poboljšanja učinkovitosti, točnosti i sigurnosti.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je radiografsko ispitivanje na konkretnoj atestnoj ploči izrađenoj od konstrukcijskog čelika S355. Ispitivanje je imalo dva cilja: pokazati ispravnost zavara na atestnoj ploči i prikazati utjecaj energije zračenja i vrste filma na kvalitetu radiograma. Detaljno je opisan postupak radiografskog ispitivanja, te na temelju razvijenih radiograma dana je analiza uočenih nepravilnosti. Analizom radiograma utvrđeno je da pronađene nepravilnosti na zavaru utječu na njegovu kvalitetu i funkcionalnost.

Ključne riječi: ispitivanje bez razaranja, radiografsko ispitivanje, greške u zavarenim spojevima

## **SUMMARY**

This thesis on the topic of "Nondestructive Testing of Welded Joints" consists of a theoretical and an experimental part. The theoretical part of the thesis explains the methods of nondestructive testing, provides a detailed overview of their applications, and discusses their advantages and disadvantages. Special attention is given to radiographic testing due to its application in the experimental part of the thesis. The characteristic defects that may occur in welded joints and affect the strength and functionality of the components are listed. Each group of defects is described in detail, along with the causes of their occurrence. Additionally, trends in development that have brought significant transformations to the NDT field are presented, aiming to improve efficiency, accuracy, and safety.

In the experimental part of the thesis, radiographic testing was conducted on a specific test plate made of structural steel S355. The testing had two objectives: to demonstrate the soundness of the weld on the test plate and to show the impact of radiation energy and film type on the quality of the radiogram. The procedure for radiographic testing is described in detail, and an analysis of the observed irregularities is provided based on the developed radiograms. The analysis of the radiograms determined that the detected irregularities in the weld affect its quality and functionality.

Keywords: nondestructive testing, radiographic testing, defects in welded joints.