

# ISPITIVANJE STROJNOG DIJELA MS.20-DI.41

---

**Sviben, Mihael**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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:190:629796>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-19**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ISPITIVANJE STROJNOG DIJELA MS.20-DI.41**

Rijeka, rujan 2022.

Mihael Sviben  
0035185632



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ISPITIVANJE STROJNOG DIJELA MS.20-DI.41**

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

Rijeka, rujan 2022.

Mihael Sviben  
0035185632

# ORIGINAL ZADATKA

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**

**IZJAVA**

Sukladno članku 9. stavka 1. pravilnika o diplomskom radu i diplomskom ispitu na diplomskim studijima Tehničkog fakulteta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio rad pod naslovom „Ispitivanje strojnog dijela MS.20-DI.41“.

Rad sam izradio prema zadatku povjerenstva za diplomske ispite sveučilišnog studija strojarstva pod vodstvom mentorice izv. prof. dr. sc. Sunčane Smokvina Hanza.

Mihael Sviben

Rijeka, 6. rujna 2022.

---

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	8
2. METODE ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA.....	9
2.1. Vizualni pregled.....	10
2.1.1. Direktan vizualni pregled.....	11
2.1.2. Indirektan vizualni pregled.....	11
2.2. Ispitivanje penetrantima .....	13
2.2.1. Postupak ispitivanja .....	14
2.2.2. Prednosti i nedostaci metode.....	15
2.3. Ispitivanje magnetskim česticama .....	16
2.3.1. Postupak ispitivanja .....	18
2.3.2. Provjera magnetnih čestica i opreme .....	19
2.3.3. Prednosti i nedostaci metode.....	20
2.4. Ultrazvučno ispitivanje .....	21
2.4.1. Tehnike ultrazvučnog ispitivanja.....	22
2.4.2. Prednosti i nedostaci metode.....	23
2.5. Radiografija .....	24
3. KARAKTERISTIČNE GREŠKE U ZAVARENIM SPOJEVIMA .....	26
3.1. Pukotine.....	27
3.1.1. Podjela pukotina u zavarenom spoju prema njihovom obliku i mjestu nastajanja.....	27
3.1.2. Podjela pukotina prema uzroku nastajanja.....	30
3.1.3. Izbjegavanje nastajanja pukotina.....	32
3.2. Šupljine – poroznost .....	33
3.2.1. Uzročnici nastajanja šupljina.....	34
3.2.2. Izbjegavanje nastajanja šupljina .....	34
3.3. Čvrsti uključci.....	35

3.3.1.	Čvrsti uključci kao nemetali.....	35
3.3.2.	Čvrsti uključci kao metali .....	36
3.3.3.	Izbjegavanje nastajanja čvrstih uključaka.....	36
3.4.	Naljepljivanje i nedovoljan provar .....	37
3.4.1.	Uzroci naljepljivanja.....	37
3.4.2.	Uzroci nedovoljnog provara.....	38
3.4.3.	Izbjegavanje pogrešaka naljepljivanja i nedovoljnog provara .....	38
3.5.	Pogreške oblika zavara.....	39
4.	ISPITIVANJE STROJNOG DIJELA RADIOGRAFIJOM .....	41
4.1.	Ispitna oprema i pribor za radiografsko ispitivanje .....	42
4.1.1.	Defektoskop.....	42
4.1.2.	Radioaktivni izotop.....	42
4.1.3.	Daljinski upravljač.....	44
4.1.4.	Vodilica .....	44
4.1.5.	Kolimator .....	45
4.1.6.	Film sustav .....	45
4.1.7.	Olovne oznake .....	46
4.1.8.	Indikatori kvalitete radiograma .....	47
4.1.9.	Sustav za razvijanje .....	47
4.1.10.	Iluminator .....	48
4.1.11.	Denzitometar.....	48
4.2.	Postupak ispitivanja .....	49
4.3.	Rezultati ispitivanja .....	56
5.	ISPITIVANJE STROJNOG DIJELA PENETRANTIMA.....	59
5.1.	Oprema za ispitivanje penetrantima.....	59
5.1.1.	Penetrant.....	59

5.1.2. Čistač.....	60
5.1.3. Razvijlač.....	61
5.2. Postupak ispitivanja .....	62
5.3. Rezultati ispitivanja .....	63
6. ZAKLJUČAK.....	64
LITERATURA .....	65
POPIS SLIKA.....	66
POPIS TABLICA .....	68
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI .....	69
ABSTRACT AND KEYWORDS .....	70
DODATAK .....	71

## 1. UVOD

Ispitivanje bez razaranja – IBR ili kontrola bez razaranja - KBR (eng. Non-Destructive Testing – NDT) je skupina metoda tehničke analize korištena za procjenu svojstva materijala, dijelova ili kompletnih sustava bez oštećivanja ili narušavanja funkcionalnosti ispitivanog dijela. Osim što omogućuje ispitivanje bez oštećivanja tokom i nakon proizvodnje, isto tako omogućuje ispitivanja u eksploataciji što uvelike ubrzava i poboljšava cijeli proces kontrole kvalitete. Upravo iz tog razloga ispitivanje bez razaranja je neizostavni dio provjere funkcionalnosti dijelova u naftnoj i plinskoj industriji, zrakoplovnoj industriji, kod nuklearnih elektrana, posuda pod tlakom ili općenito za provjeru kvalitete zavarenih spojeva i osnovnog materijala u bilo kojoj grani industrije, bilo tokom proizvodnje ili u eksploataciji.

Svrha ovog rada je ispitivanje strojnog dijela MS.20-DI.41 metodama ispitivanja bez razaranja. U prvom dijelu biti će govora općenito o ispitivanju bez razaranja, kao i o nekima od glavnih i najčešće korištenih metoda ispitivanja. Za svaku metodu prikazat će se način ispitivanja, njene specifičnosti, te prednosti i nedostaci pojedinih metoda.

Zatim će se pristupiti analizi pogrešaka koje se mogu pojaviti i detektirati ispitivanjem bez razaranja. Prikazati će se karakteristične pogreške koje se mogu pojaviti u zavarenim spojevima te njihov utjecaj na svojstva zavarenog spoja. Analizirati će se mogući uzroci pojavljivanja zasebnih pogrešaka kao i načini na koje se može izbjeći njihovo nastajanje.

Drugi dio rada odnosi se na praktični dio ispitivanja zadanog strojnog dijela gdje će detaljno biti prikazan i dokumentiran cijeli proces ispitivanja bez razaranja. Radi se o zavaru koji će biti ispitan metodom radiografije i metodom ispitivanja penetrantima.

Za ispitivanje strojnog dijela radiografijom primjeniti će se tehnika klasičnog radiografskog ispitivanja korištenjem filma koji će biti prozračen radioaktivnim izotopom, odnosno  $\gamma$ -zrakama. Detaljno će biti opisana sva oprema korištena za ispitivanja, kao i svi relevantni parametri ispitivanja, te u konačnici analiza rezultata dobivenih ispitivanjem.

Za ispitivanje strojnog dijela penetrantima primijeniti će se tehnika ispitivanja obojenim penetrantima, gdje će također detaljno biti opisana oprema kojom su izvršena ispitivanja. Također će biti prikazani svi parametri ispitivanja, kao i analiza rezultata dobivenih ispitivanjem.

## 2. METODE ISPITIVANJA BEZ RAZARANJA

Metode ispitivanja bez razaranja su skup metoda koje su utemeljene na principima fizike sa svrhom karakterizacije svojstava ispitivanog materijala, te detekcije različitih nepravilnosti pritom ne utječući na funkcionalnost ispitivanog objekta. Pravilnom primjenom ispitivanja bez razaranja značajno se doprinosi smanjenju kvarova kako u proizvodnji tako i u eksploataciji u brojnim granama industrije.

Metode ispitivanja bez razaranja moguće je podijeliti na površinske i volumne metode, što je samo po sebi indikativno, odnosno kod površinskih metoda se promatra i ispituje stanje na površini ili neposredno ispod površine ispitivanog objekta, dok volumne metode obuhvaćaju ispitivanje cijelog volumena ispitivanog objekta.

Neke od najčešćih površinskih metoda ispitivanja bez razaranja su:

- vizualni pregled,
- ispitivanje penetrantima,
- ispitivanje magnetnim česticama.

Najčešće primjenjene volumne metode ispitivanja bez razaranja su:

- radiografija,
- ultrazvučno ispitivanje.



## 2.1. Vizualni pregled

Vizualni pregled je prva i najstarija metoda ispitivanja bez razaranja koja se koristi kao temeljna metoda ispitivanja svih materijala i proizvoda radi svoje jednostavnosti. Vizualni pregled u većini slučajeva prethodi ostalim metodama ispitivanja bez razaranja jer u vrlo kratkom roku daje informacije o stanju ispitivanog materijala, te brzu procjenu o potrebi korištenja drugih metoda ispitivanja.

Svrha vizualnog pregleda je brzo i učinkovito otkrivanje raznih površinskih pogrešaka i nepravilnosti.

Neke od pogrešaka koje je moguće otkriti vizualnim pregledom su:

- površinske pukotine,
- neprovaren korijen kod zavora,
- površinske poroznosti,
- nepravilnosti u obliku i dimenzijama,
- oštećenja prilikom montaže ili transporta.

Vizualni pregled može se podijeliti na dvije tehnike ispitivanja:

- direktan vizualni pregled,
- indirektan vizualni pregled.

Kod provođenja vizualnog pregleda potrebna je čista površina i dovoljno jako osvjetljenje. Na slici 2.1 prikazan je direktan vizualni pregled zavora pomoću povećala.



*Slika 2.1. Vizualni pregled zavora pomoću povećala [1]*

### 2.1.1. Direktan vizualni pregled

Direktan vizualni pregled provodi se golim okom, uz mogućnost korištenja jednostavnih pomagala poput zrcala ili povećala (slika 2.2).



*Slika 2.2. Prikaz pomagala za direktnu vizualnu kontrolu: povećalo(lijevo), zrcalo(desno) [1]*

Postoje određeni uvjeti koji moraju biti ispunjeni kako bi se pristupilo vizualnoj kontroli a to su:

- osvjetljenje ispitne površine koje mora biti minimalno 500 lux,
- udaljenost oka od ispitne površine ne smije prelaziti 600 mm,
- kut promatranja ne smije biti manji od 30°.

### 2.1.2. Indirektan vizualni pregled

U slučaju gdje je potrebno ispitati teško dostupna ili skučena područja koristi se indirektna tehnika vizualnog pregleda. Uređaji koji se koriste kod indirektnog vizualnog pregleda:

- boroskop,
- fibroskop,
- videoskop.

Boroskop (slika 2.3) je optički uređaj koji sadrži krutu cijev sa okularom na jednoj strani, a objektivom na drugoj. Često je opremljen i izvorom svjetla radi ispitivanja u skučenim i neosvjetljenim prostorima. Može se koristiti pri vizualnoj kontroli cjevovoda raznih dimenzija, spremnika ili općenito bilo kakvih objekata koje nije moguće ispitati golim okom.



*Slika 2.3. Prikaz boroskopa [2]*

Fibroskop (slika 2.4) je optički uređaj koji prenosi sliku do oka ispitivača preko savitljive cijevi. Unutar cijevi nalaze se snopovi savitljivih optičkih vlakana koji cijevi daju fleksibilnost. Poput boroskopa, također je često opremljen izvorom svjetlosti.



*Slika 2.4. Prikaz fibroskopa [2]*

Videoskop (slika 2.5) je digitalni optički uređaj koji je u biti boroskop ili fibroskop koji optički signal sa kamere prebacuje u digitalni signal i prikazuje na ekranu. Prednost videoskopa nad prethodnim uređajima je mogućnost pohrane informacija o ispitanom objektu u obliku slike ili videa.



*Slika 2.5. Prikaz videoskopa [2]*

## 2.2. Ispitivanje penetrantima

Ispitivanje penetrantima jedna je od najčešće primjenjivanih metoda ispitivanja bez razaranja. Koristi se za ispitivanje neporoznih materijala. Najčešće se primjenjuje kod ispitivanja metalnih materijala, ali je također moguće ispitivanje nemetalnih materijala poput plastike, keramike, stakla, itd.

Ispitivanje penetrantima koristi se za otkrivanje pogrešaka na površini materijala poput pukotina, poroznosti, uključaka ili bilo kakvih drugih nepravilnosti na površini ispitivanih materijala.

Penetrante je moguće podijeliti na:

- fluorescentne penetrante,
- obojene penetrante.

Fluorescentni penetranti sadrže fluorescentne čestice koje su vidljive pod UV svjetlom. Ispitivanje se provodi pod takvim osvjetljenjem gdje količina bijele svjetlosti ne iznosi više od 50 lux, stoga je potrebna uporaba UV lampe. Pogreške se lakše uočavaju nego kod obojenih penetranta zbog velikog kontrasta koji ultraljubičasta svjetlost daje pri osvjetljavanju ispitane površine.

Obojeni penetranti za razliku od fluorescentnih zahtjevaju osvjetljenje od najmanje 500 lux. Najčešće su crvene boje radi postizanja što većeg kontrasta sa bijelom bojom razvijачa. Na slici 2.6 prikazan je set obojenog penetranta, čistača i razvijачa.



Slika 2.6. Prikaz seta crvenog penetranta, čistača i razvijачa u spreju proizvođača Magnaflix [3]

Penetranti mogu biti pakirani kao sprej ili u tekućem stanju pakirani u kanistre ili boce. Temperatura ispitne površine za standardne penetrante mora biti unutar 10°C do 50°C. Penetrantski materijali koji se koriste moraju biti od istog proizvođača i ne smiju se miješati sa penetrantskim materijalima drugih proizvođača. Razvijači također mogu biti isporučeni kao sprej. Prije uporabe razvijač pakiran kao sprej potrebno je dobro promućkati kako bi se postigla što bolja raspršivost. Kontrast razvijača odlikuje se zadovoljavajućom bijelom bojom. Sve vrste razvijača trebaju biti lako odstranjive sa površine.

### 2.2.1. Postupak ispitivanja

Prije ispitivanja penetrantima površina mora biti suha i čista od korozivskih produkata, oksida, nečistoća, masti, boja i prskotina nastalih zavarivanjem. Mehaničko čišćenje od korozivskih produkata, ljuski, tvrdih naslaga i kapljica zavarivanja provodi se četkanjem, abrazijom ili brušenjem. Kemijsko čišćenje se provodi deterdžentima, organskim otapalima, odstranjivačima boje ili specijalnim sredstvima.

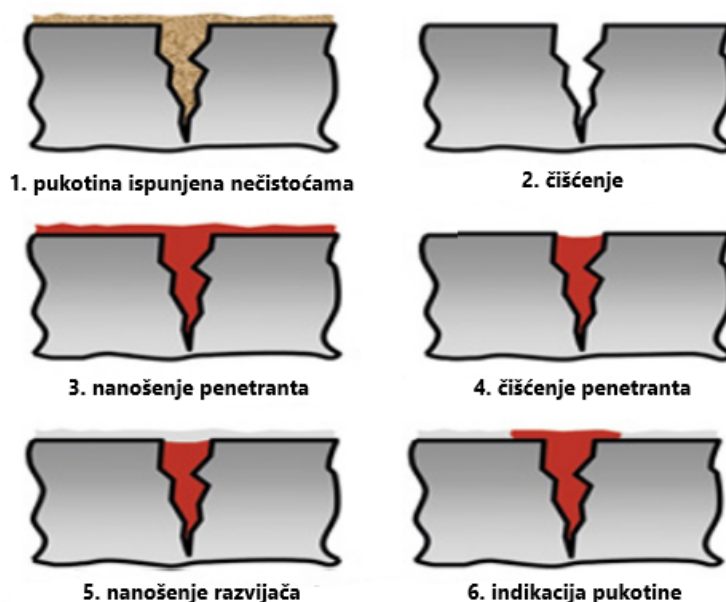
Nakon čišćenja penetrant se nanosi na ispitnu površinu. Ukoliko se ispituje zavareni spoj, penetranti se nanose na sam zavareni spoj i minimalno 10 mm sa svake strane zavarenog spoja. Vrijeme penetriranja penetranta iznosi 20 minuta. Penetrant ostaje na ispitnoj površini tijekom cijelog vremena penetriranja u materijal koji se ispituje.

Nakon isteka vremena penetriranja, otklanja se višak penetranta. Višak penetranta se prvo uklanja čistom suhom krpom, a nakon toga čistom krpom na koju je nanesen čistač (otapalo). Nakon odstranjivanja viška penetranta ispitna površina se suši slobodno na zraku ili u struji toplog zraka maksimalne temperature do 50°C, sa udaljenosti 20-30 cm od ispitne površine.

Neposredno nakon sušenja na ispitnu površinu se nanosi razvijač. Količina nanesenog razvijača mora biti optimalna, kako bi se dobro uočile eventualne indikacije. Promatranje indikacija u vremenskim intervalima obavlja se nakon isteka vremena razvijanja koje iznosi 10-30 minuta.

Za vrijeme nanošenja razvijača potrebno je pomno promatrati ispitnu površinu. Konačna analiza rezultata provodi se nakon isteka vremena razvijanja. Promatrati se može i uz pomoć lupe, a uočene indikacije mogu se snimiti fotografski. Nakon završetka ispitivanja, ispitnu površinu potrebno je očistiti od ostatka penetranta i razvijača.

Postupak ispitivanja penetrantima grafički je prikazan na slici 2.7.



Slika 2.7. Grafički prikaz koraka pri ispitivanju penetrantima [3]

### 2.2.2. Prednosti i nedostaci metode

Prednosti ispitivanja penetrantima su:

- brza i pouzdana detekcija indikacija površinskih pukotina ili poroznosti,
- oprema za ispitivanje (penetrant, razvijaa) je relativno jeftina i vrlo lako prenosiva,
- brzo i jeftino ispitivanje velikih strojnih elemenata i dijelova složene geometrije,
- jasni prikaz indikacija na površini ispitivanog objekta.

Nedostaci metode ispitivanja penetrantima su:

- potreba za temeljitim čišćenjem i odmašćivanjem kako bi se izbjegle lažne indikacije,
- detekcija pogrešaka samo na površini ispitanog objekta,
- nema primjene kod poroznih materijala.

### 2.3. Ispitivanje magnetskim česticama

Ispitivanje magnetskim česticama je metoda ispitivanja bez razaranja koja se upotrebljava za otkrivanje površinskih grešaka ili grešaka koje su tek neznatno ispod površine. Metoda je relativno jednostavna i brza, te ne zahtjeva veliku pripremu ispitne površine.

Kod ispitivanja magnetnim česticama koriste se sitne magnetske čestice kako bi se otkrile nepravilnosti u ispitivanom materijalu. Magnetske čestice moguće je koristiti samo za ispitivanja feromagnetskih materijala što je ujedno i najveće ograničenje metode.

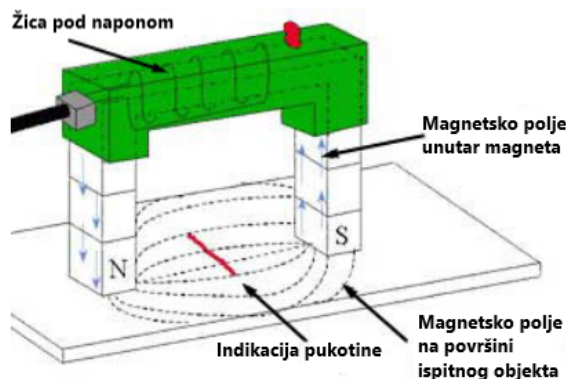
Za magnetiziranje površina koristi se elektromagnetni jaram prikazan slikom 2.8 pomoću kojega se stvara snažno magnetsko polje. Za stvaranje magnetskog polja koristi se žica, odnosno zavojnica koja je omotana oko jezgre feromagnetskog željeza smještenog unutar jarma, kroz koju protječe električna energija.



*Slika 2.8. Prikaz elektromagnetnog jarma proizvođača Magnaflux [4]*

Za magnetiziranje ispitnih površina u zatvorenim prostorima (spremnici i sl.) najčešće se koristi ručni prenosivi elektromagnetni jaram s transformatorom manjeg izlaznog napona i manje struje radi opasnosti od strujnog udara, a u svim ostalim prostorima gdje ne prijete opasnost od strujnog udara, koristi se elektromagnetni jaram bez transformatora (220 V izmjenične struje).

Na slici 2.9 prikazan je princip stvaranja magnetskog polja na ispitivanom materijalu, gdje se prislanjanjem jarma pod naponom stvara snažno magnetsko polje.



Slika 2.9. Prikaz stvaranja magnetskog polja pomoću jarma [4]

Kao ispitno sredstvo koriste se fluorescentne ili crne obojene magnetske čestice. Čestice mogu biti suhe (u obliku praha) ili suspendirane u nekom mediju koji omogućuje bolju pokretljivost. Magnetske čestice koje se upotrebljavaju tijekom jednog ispitivanja moraju biti iste vrste i od istog proizvođača.

Kod ispitivanja fluorescentnim magnetskim česticama potrebno je koristiti ultraljubičasto svjetlo (UV-A). Kod korištenja fluorescentnih magnetskih čestica, potrebno je osigurati dovoljni intenzitet ultraljubičastog svjetla na ispitnoj površini koji je propisan normom, a osvjetljenje bijelim svjetlom smanjiti na normom propisanu vrijednost. Kod korištenja crnih obojenih magnetskih čestica, potrebno je osigurati dovoljni intenzitet bijelog svjetla na ispitnoj površini koji je također propisan normom. UV lampa kakva se koristi za ispitivanje fluorescentnim magnetskim česticama prikazana je slikom 2.10.



Slika 2.10. Prikaz UV lampe proizvođača Magnaflux [4]

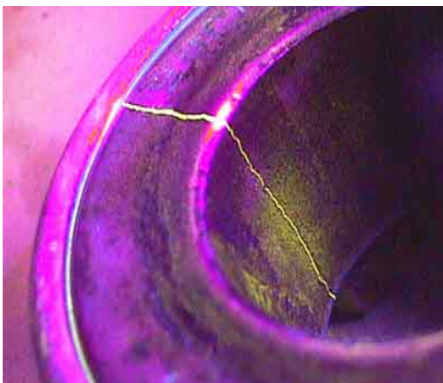


### 2.3.1. Postupak ispitivanja

Kod ispitivanja magnetima ispitna površina je površina između dva pola elektromagnetskog jarma pri čemu se izuzima udaljenost prvih 25 mm od svakog pola magnetskog jarma. Svaki dio površine koji se ispituje mora se magnetizirati u dva približno okomita smjera sa maksimalnim dozvoljenim odstupanjem od 30°. Korak ispitivanja ne smije biti veći od polovice razmaka magnetnih polova jarma.

Ispitna površina mora biti suha i očišćena od ljuški, korozije, kapljica zavarivanja, masnoće, ulja, oksida, nečistoća ili bilo kojeg drugog materijala koji može utjecati na ispitnu osjetljivost ili uočavanje mogućih indikacija. Ispitna površina može imati sloj premaza (nemagnetskih prevlaka) do 50 µm debljine. Ukoliko je površina lošije kvalitete, prije ispitivanja mora se pripremiti brušenjem, četkanjem ili pjeskarenjem. Temperatura ispitne površine ne smije prelaziti 60°C ako se koriste standardna sredstva za ispitivanje. Kod ispitivanja crnim obojenim česticama, da bi se osigurao dovoljan vizualni kontrast između indikacija i ispitne površine, prije nanošenja magnetskih čestica na ispitnu površinu nanosi se tanki jednolični sloj (do 50 µm debljine) podložne bijele kontrastne boje.

Ispitivanje se provodi kontinuiranom tehnikom. Zahtjeva se održavanje magnetnog toka prije i za vrijeme nanošenja magnetnih čestica. Nanošenje fluorescentnih magnetnih čestica i crnih obojenih čestica mora biti prekinuto prije prestanka magnetizacije. Kod magnetnog jarma treba ostvariti dobro nalijeganje između jarma i predmeta ispitivanja pri čemu treba paziti na dozvoljeni razmak kontakata. Nakon nanošenja suspenzije s magnetnim česticama potrebno je izvršiti pregled rasporeda magnetnih čestica, uz osigurano zadovoljavajuće osvjetljenje. Primjer indikacije pukotine pronađene pomoću fluorescentnih magnetnih čestica prikazan je slikom 2.11.



*Slika 2.11. Pukotina pronađena ispitivanjem fluorescentnim magnetskim česticama [5]*

Lažne indikacije se mogu pojaviti iz više razloga npr. zbog promjena u magnetskoj permeabilnosti u području zone utjecaja topline ili uz zavareni spoj. Ukoliko se pojave lažne indikacije, može se primijeniti prikladna zamjenska metoda za otkrivanje nepravilnosti ili se ispitna površina treba obrisati.

Nakon ispitivanja zavara izmjeničnom strujom, zaostala jakost magnetskog polja ispitnog uzorka će biti mala, te se u pravilu ispitni uzorak ne mora demagnetizirati. Ako je zahtjevano, potrebno je provesti demagnetizaciju ispitnog uzorka pri čemu se kontrolira vrijednost zaostale jakosti magnetskog polja, što se utvrđuje magnetoskopom. Demagnetizacija se obavlja udaljavanjem magnetskog jarma od površine koja se želi demagnetizirati, pri čemu je magnetski jaram uključen. Nakon svakog odmicanja magnetskog jarma provjerava se jakost i smjer zaostalog magnetskog polja na površini magnetoskopom. Nakon što se utvrdi da je zaostala jakost magnetskog polja unutar dopuštenih granica, postupak demagnetizacije površine je završen.

### 2.3.2. Provjera magnetnih čestica i opreme

Uređaji se smatraju ispravnim ako pri maksimalnom razmaku magnetnih polova daju dovoljnu jakost tangencijalnog magnetnog polja. Jakost magnetnog polja provjerava se mjernim uređajima na principu Hallovog efekta. Hallova sonda uređaja mora mjeriti jakost tangencijalnog magnetskog polja uz samu ispitnu površinu. Vrijednost jakosti magnetnog polja definirana je normom.

Potrebna je i provjera svake nove šarže magnetnih čestica. Prilikom zaprimanja svake nove šarže tvornički pripremljenih magnetnih čestica provodi se provjera osjetljivosti šarže za što se koriste normom definirani referentni blokovi. Magnetne čestice se nanose na referentni blok koji sadrži ranije napravljena oštećenja. Nakon nanošenja čestica rezultati se uspoređuju sa slikom dobivenom od proizvođača referentnog bloka. Ukoliko rezultati ispitivanja i slika proizvođača odgovaraju, može se reći da šarža magnetnih čestica zadovoljava traženu razinu osjetljivosti.

Također se obavezno provjerava suspendiranje čestica u nekom mediju (voda, petrolej i sl.) zbog bolje pokretljivosti i provjere osjetljivosti, te ukoliko osjetljivost suspenzije zadovoljava, ona se koristi za ispitivanje, a ako ne zadovoljava dorađuje se dok se ne postigne traženi omjer. Provjera koncentracije fluorescentnih magnetnih čestica u suspenziji se provodi pomoću specijalne menzure u koju se ulije suspenzija s magnetnim česticama. Ako koncentracija fluorescentnih magnetnih čestica zadovoljava, onda će volumen taloga magnetnih čestica nakon 30 minuta taloženja biti u vrijednosti koje definiraju

norma i proizvođač. Provjera koncentracije magnetnih čestica u suspenziji se provodi za svaku šaržu zasebno.

### 2.3.3. Prednosti i nedostaci metode

Prednosti ispitivanja magnetskim česticama su:

- jednostavan postupak ispitivanja, relativno niska cijena opreme,
- brzo i lako otkrivanje nepravilnosti na površini ili neposredno ispod površine poput pukotina, poroznosti ili raznih uključaka.

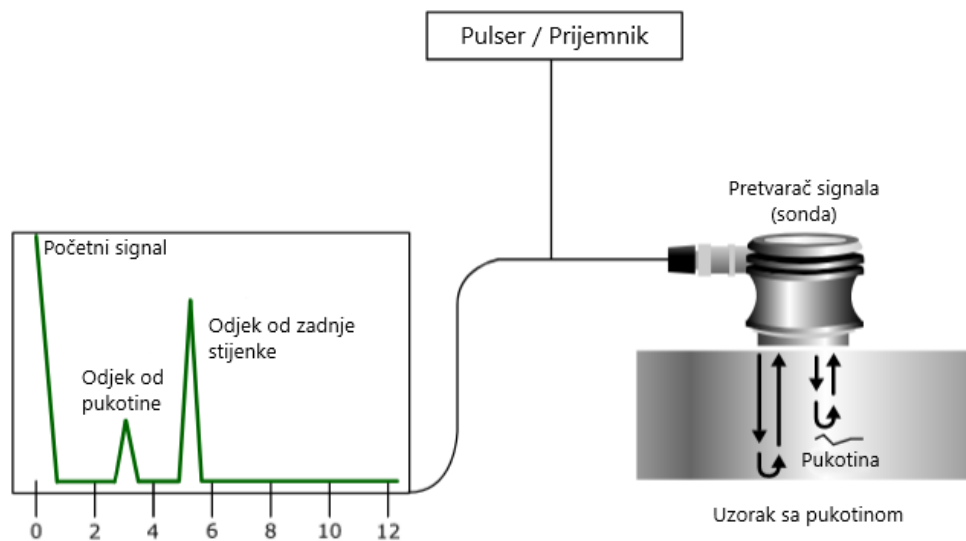
Nedostaci kod ispitivanja magnetskim česticama su:

- nemogućnost pouzdanog određivanja dimenzija nepravilnosti,
- smanjena učinkovitost kod veće dubine nepravilnosti,
- nemogućnost ispitivanja materijala koji nisu feromagnetski,
- česta potreba za demagnetizacijom,
- kod velikih proizvoda potrebna je i veća jakost struje što značajno utječe na cijenu.

## 2.4. Ultrazvučno ispitivanje

Ultrazvučna ispitivanja temeljena su na upotrebi ultrazvuka, što je naziv za zvuk frekvencije iznad područja čujnosti ljudskog uha (frekvencije iznad 20kHz). Ispitivanja se baziraju na principu odbijanja ultrazvučnog vala od bilo kakve nepravilnosti unutar ispitivanog materijala koji se prikazuje kao reflektirana energija u određenom vremenskom intervalu. Na temelju energije reflektiranog vala i samog vremena koje je bilo potrebno da se odbije od nepravilnosti, moguće je odrediti dubinu i poziciju detektirane nepravilnosti u materijalu.

Tipični ultrazvučni ispitni sustav sastoji se od nekoliko funkcionalnih cjelina, kao što su pulser/prijemnik, pretvarač signala te uređaj za prikaz. Pulser/prijemnik je elektronički uređaj koji može proizvesti električne impulse visokog napona. Pokrenut pobudnim impulsom, piezoelektrik u pretvaraču stvara ultrazvučnu energiju visoke frekvencije. Zvučna energija propagira kroz materijale u obliku valova. Kada postoji diskontinuitet (kao što je pukotina) na putu vala, dio energije će se reflektirati natrag s površine nepravilnosti. Reflektirani valni signal pretvara se u električni signal i prikazuje na uređaju za prikaz. Na slici 2.12 prikazana je jačina reflektiranog vala u odnosu na vrijeme od generiranja signala do pojave [1].



Slika 2.12. Prikaz tipičnog ultrazvučnog sustava [1]

Vrijeme putovanja vala izravno je povezano s udaljenošću koju je val prešao. Iz odjeka se mogu dobiti informacije o položaju reflektora, veličini, orijentaciji i drugim značajkama.

Ultrazvučnim ispitivanjem moguće je detektirati razne pogreške poput pukotina, poroznosti, uključaka, naljepljivanja, stanjenje debljine stijenke, ali je također moguće provoditi i mjerenja poput mjerenja debljine stijenke.

#### 2.4.1. Tehnike ultrazvučnog ispitivanja

Kod ultrazvučnog ispitivanja postoje različite tehnike ispitivanja u ovisnosti o samim zahtjevima ispitivanja i ispitivanom objektu. Postoje dvije glavne tehnike:

- tehnika prozvučivanja,
- tehnika odjeka.

Tehnika prozvučivanja temelji se na apsorpciji ultrazvuka koja se događa kad isti naiđe na bilo kakve nehomogenosti u materijalu. Zove se prozvučivanje jer se koriste dvije sonde, od kojih je jedna odašiljač ultrazvučnih valova, a druga prijammnik istih tih valova. Sonda odašiljač s jedne strane ispitnog objekta odašilje ultrazvučne valove kroz objekt, a sonda prijammnik ih s druge strane objekta prima, te mjeri i analizira energiju vala. Ukoliko je objekt homogen, signal na izlaznom prijammniku (sondi) biti će konstantan kroz cijeli ispitivani objekt. Ukoliko se unutar objekta nalazi nehomogenost, dio ultrazvučnog vala će se odbiti upravo od te nehomogenosti te će signal na izlaznom prijammniku biti manji. Ovom tehnikom lako se detektiraju nepravilnosti u materijalu, ali nije moguće pouzdano procijeniti njihovu dubinu i dimenzije.

Tehnika odjeka, za razliku od tehnike prozvučivanja koristi samo jednu sondu koja ima ulogu odašiljanja i prijema ultrazvučnog signala, što se u prethodnoj metodi postizalo sa dvije odvojene sonde. Samim time ispitivanje je olakšano jer se pristupa samo s jedne strane ispitivanog objekta. Ultrazvučni valovi u ispitivani materijal se šalju u impulsima kojima se mjeri vrijeme do odbijanja od pogreške ili stražnje strane ispitivanog predmeta. Uz poznatu brzinu ultrazvuka u pojedinom ispitivanom objektu i poznato vrijeme koje je bilo potrebno da se isti odbije od pogreške, moguće je precizno odrediti na kojoj dubini se nalazi greška. Pouzdanost procjena povećava se baždarenjem ultrazvučnog sustava pomoću etalona ili referentnih uzoraka sa poznatim svim dimezijama i unaprijed napravljenim nepravilnostima sa jasno definiranim dubinama i dimezijama nepravilnosti. Etaloni i referentni uzorci odabiru se u odnosu na objekt koji se ispituje, što znači da dimezije istih moraju biti približne dimezijama ispitnog uzorka kako bi se što pouzdanije odredila dubina i dimezije nepravilnosti tokom ispitivanja.

#### 2.4.2. Prednosti i nedostaci metode

Ultrazvučno ispitivanje je vrlo korisna i svestrana metoda ispitivanja bez razaranja. Neke od prednosti ultrazvučnog ispitivanja su:

- mogućnost otkrivanja volumenskih i površinskih nepravilnosti,
- mogućnost ispitivanja debljih dijelova u odnosu na druge metode,
- kod tehnike odjeka dovoljan pristup sa jedne strane ispitivanog objekta,
- vrlo precizno određivanje položaja, te veličine i oblika nepravilnosti,
- minimalna priprema ispitivanog dijela,
- dobivaju se trenutni rezultati o stanju ispitivanog objekta,
- osim ispitivanja nepravilnosti, moguće i mjerenje debljine.

Kao i kod ostalih metoda ispitivanja bez razaranja, ultrazvučno ispitivanje također ima svoja ograničenja:

- vještina i obuka ispitivača su opsežniji nego kod nekih drugih metoda,
- potrebno je kontaktno sredstvo koje prenosi zvuk u ispitivani objekt,
- vrlo zahtjevno ili nemoguće ispitivanje nepravilnih, grubih, vrlo tankih ili nehomogenih materijala,
- materijale sa grubozrnatom teksturom je vrlo teško ispitati zbog velikog prigušenja zvuka i visokog šuma signala,
- linearne indikacije orijentirane paralelno sa zvučnim signalom mogu ostati neotkrivene,
- za kalibraciju uređaja i opreme potrebni su etaloni i referentni uzorci.

## 2.5. Radiografija

Radiografija je volumna metoda nerazornih ispitivanja koja koristi ionizirajuće zračenje za pregled materijala i komponenti u svrhu lociranja i kvantificiranja nepravilnosti unutar materijala, kao i za detekciju degradacije svojstava materijala koji mogu dovesti do kvara unutar strojnih sustava. Radiografska metoda ima vrlo važnu ulogu u tehnologiji osiguranja kvalitete i pouzdanosti proizvoda. Kod nerazornih ispitivanja radiografijom moguće je koristiti različite izvore ionizirajućeg zračenja, a to su:

- X (rendgenske) zrake,
- $\gamma$  (radioizotopne) zrake.

Glavna razlika između X-zraka i  $\gamma$ -zraka je u porijeklu njihovog nastajanja.

Rendgensko (X) zračenje nastaje u rendgenskoj cijevi na način da se pri djelovanju snažnog električnog polja na katodnu zavojnicu stvaraju elektroni, koje privlači naboj anode. Privučeni nabojem, elektroni ubrzavaju prema metalnoj anodi i naglim zaustavljanjem uzrokuju interakciju sa elektronima anode ili sa jezgrama atoma anode. Učinkovito ubrzavanje elektrona pospješuje se visokim naponom na katodi i visokim vakuumom unutar rendgenske cijevi, kako bi elektroni mogli nesmetano proći od katode do anode. Većina kinetičke energije ubrzanih elektrona pretvara se u toplinsku energiju, dok se samo mali dio pretvara u ionizirajuće rendgensko zračenje.

Gama zračenje, za razliku od rendgenskog zračenja, nastaje prirodnim putem, radioaktivnim raspadanjem izotopa pojedinih elemenata. Jezgra takvih elemenata je nestabilna i prelazi sa više energetske razine ka nižoj, emitirajući  $\gamma$ -zrake. Energiju takvih zraka nije moguće kontrolirati jer ovisi o fizikalnim svojstvima radioaktivne tvari koja se koristi za njeno dobivanje. Za dobivanje  $\gamma$ -zraka u industrijskoj radiografiji, najčešće se koriste radioaktivni izotopi: Ir192, Se75, Co60.

Prolaskom X-zraka ili  $\gamma$ -zraka kroz materijal, ovisno o svojstvima materijala i debljini, zračenje se prigušuje, odnosno zračenje pri izlasku iz materijala ima manju energiju nego početno zračenje koje je ušlo u materijal što znači da je materijal apsorbirao dio energije zračenja. Za svaki materijal poznata je vrijednost apsorpcije zračenja, te ako se u nekom materijalu nalaze nehomogenosti apsorpcija kroz navedene nehomogenosti bit će drugačija nego kroz materijal bez pogrešaka. Upravo ta razlika omogućuje ispitivanje materijala radiografskom metodom.

Kod prozračivanja ispitnog uzorka X ili  $\gamma$  zrakama potrebno je koristiti detektor koji hvata razliku u ranije navedenoj apsorpciji kroz prozračivani materijal u obliku fotona. Za detekciju je moguće koristiti film srebrnog halida, fosforne ploče ili naprednije detektore.

Klasično radiografsko ispitivanje je tehnika veoma raširena u praksi upravo zbog prednosti nad ostalim tehnikama defektoskopije koje su:

- mogućnost dobivanja trajnog zapisa o pogreškama u vidu radiograma,
- moguće je periodički pratiti isti objekt ispitivanja i uspoređivati sa prethodnim nalazima,
- sve nalaze i ocijene nakon ispitivanja može potvrditi i nadzorno tijelo,
- visoka osjetljivost kod detekcije pogrešaka,
- laka identifikacija mjesta pogreške.

Neki od nedostataka klasičnog radiografskog ispitivanja su:

- potreba pristupa ispitivanom objektu sa obje strane,
- potrebna zaštita od zračenja,
- visoka cijena rendgena ili defektoskopa, te visoki troškovi izrade radiograma,
- ograničenje debljine koju je moguće prozračiti različitim izvorima zračenja,
- nije prikladno ispitivanje predmeta sa većim razlikama u debljini stijenke,
- mala vjerojatnost otkrivanja nepravilnosti koje su male debljine i orijentirane poprečno na smjer snopa zračenja.



### 3. KARAKTERISTIČNE GREŠKE U ZAVARENIM SPOJEVIMA

Pogreške u zavarenim spojevima su neizbježne, no mogu se umanjiti pažljivim planiranjem i preciznom izradom spojeva. Također uzroci pojavljivanja pogrešaka mogu biti i u fazama prije proizvodnje, npr. projektiranju, izboru pogrešnog osnovnog materijala, izbor neprikladnog postupka zavarivanja, itd. što naravno utječe na kvalitetu rada zavarivača, na sam zavar te na kvalitetu gotovog sklopa.

Može se reći da je zavareni spoj daleko od savršenstva, upravo zbog toga su čimbenici koji djeluju na kvalitetu zavara, u određenoj mjeri optimizirani. Svaki zavareni spoj mora zadovoljiti zahtjeve kvalitete koji su propisani određenim normama i standardima, tehničkim propisima, zavarivačkom praksom i drugo. Pogreške nastale pri zavarivanju metala izvedenog taljenjem sistematizirane su, obrađene i opisane u normi HRN EN ISO 6520-1 – Zavarivanje i srodni procesi – Razredba geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima – 1.dio: Zavarivanje taljenjem.

Greške u zavarenim spojevima podijeljene su u šest grupa što je prikazano tablicom 3.1.

*Tablica 3.1: Vrste pogrešaka u zavarenim spojevima [5]*

Osnovna grupa	Oznaka grupe	Vrsta pogreške
1	100	Pukotine
2	200	Šupljine - poroznosti
3	300	Čvrsti uključci
4	400	Naljepljivanje i nedovoljni provar
5	500	Pogreške oblika zavara
6	600	Ostale pogreške

### 3.1. Pukotine

Pukotine su najopasnije greške u zavarenom spoju te ih je potrebno svakako izbjegavati. I najmanje pukotine se s vremenom mogu proširiti te dovesti do loma konstrukcije, osobito kod dinamičkog opterećenja (zamor materijala).

#### 3.1.1. Podjela pukotina u zavarenom spoju prema njihovom obliku i mjestu nastajanja

Uzdužne pukotine protežu se uzdužno na zavar, a mogu biti:

- u zavaru,
- na granici pretaljivanja,
- u zoni utjecaja topline (ZUT),
- izvan zone utjecaja topline u osnovnom materijalu [5].

Na slici 3.1 prikazana je uzdužna pukotina u sučeljenom zavarenom spoju.



*Slika 3.1. Uzdužna pukotina u sučeljenom zavarenom spoju [5]*

Poprečne pukotine protežu se poprečno na os zavara, mogu biti:

- u zavaru,
- u zoni utjecaja topline,
- izvan zone utjecaja topline u osnovnom materijalu.

Slikom 3.2 prikazan je primjer poprečne pukotine u zavaru, ZUT-u i osnovnom materijalu.



*Slika 3.2. Poprečna pukotina u zavaru, ZUT-u i osnovnom materijalu [5]*

Pukotine zvjezdastog oblika polaze iz jednog mjesta te se zrakasto rasprostiru, mogu biti:

- u zavaru,
- u zoni utjecaja topline,
- izvan zone utjecaja topline u osnovnom materijalu.

Primjer zvjezdaste pukotine moguće je vidjeti na slici 3.3.



*Slika 3.3. Zvjezdasta pukotina u zavaru [5]*

Pukotine u završenom krateru mogu biti:

- uzdužno u pravcu zavara,
- poprečno na zavar,
- zvjezdastog oblika.



Poprečna pukotina u krateru koja se proteže u ZUT prikazana je slikom 3.4.



*Slika 3.4. Poprečna pukotina u krateru koja se proteže u ZUT [5]*

Pukotine u odvojenim skupinama koje nisu povezne, mogu biti:

- u zavaru,
- u zoni utjecaja topline,
- izvan zone utjecaja topline u zavaru.

Razgranate pukotine su međusobno ovisne te polaze iz jedne zajedničke pukotine, razlikuju se od zvjezdastih i pukotina u odvojenim skupinama, a mogu biti:

- u zavaru,
- u zoni utjecaja topline,
- izvan zone utjecaja topline u zavaru.

Primjer razgranate pukotine u zavaru martenzitnog čelika prikazan je slikom 3.5.



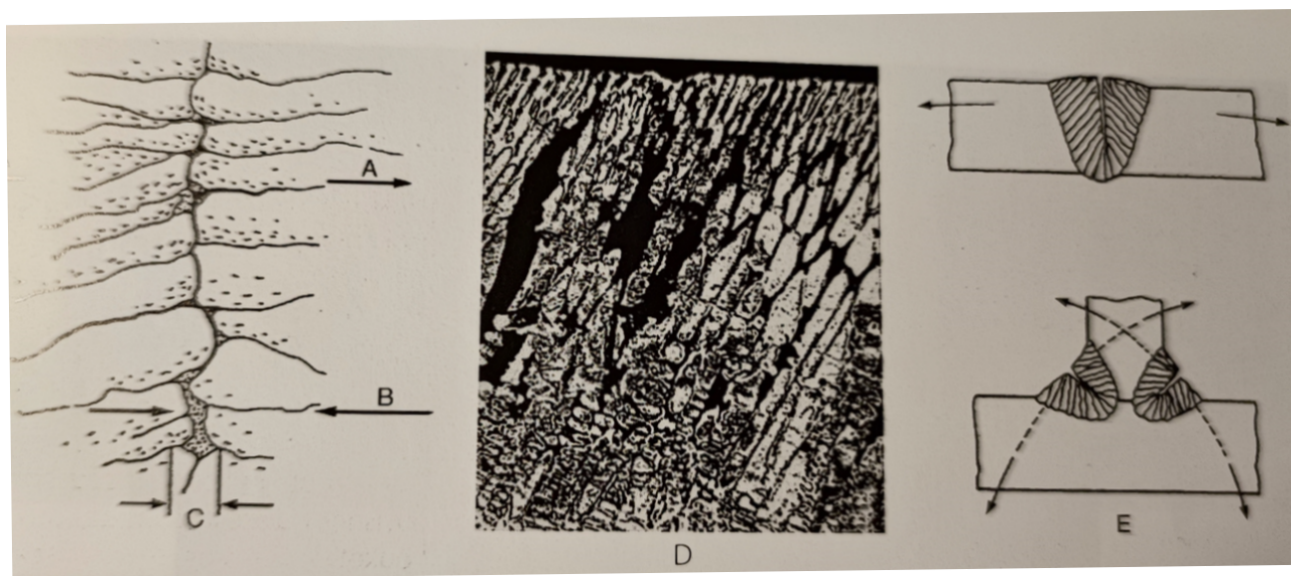
*Slika 3.5. Razgranata pukotina u zavaru martenzitnog čelika [5]*

### 3.1.2. Podjela pukotina prema uzroku nastajanja

Prema uzroku nastajanja pukotine dijele se na tople i hladne pukotine.

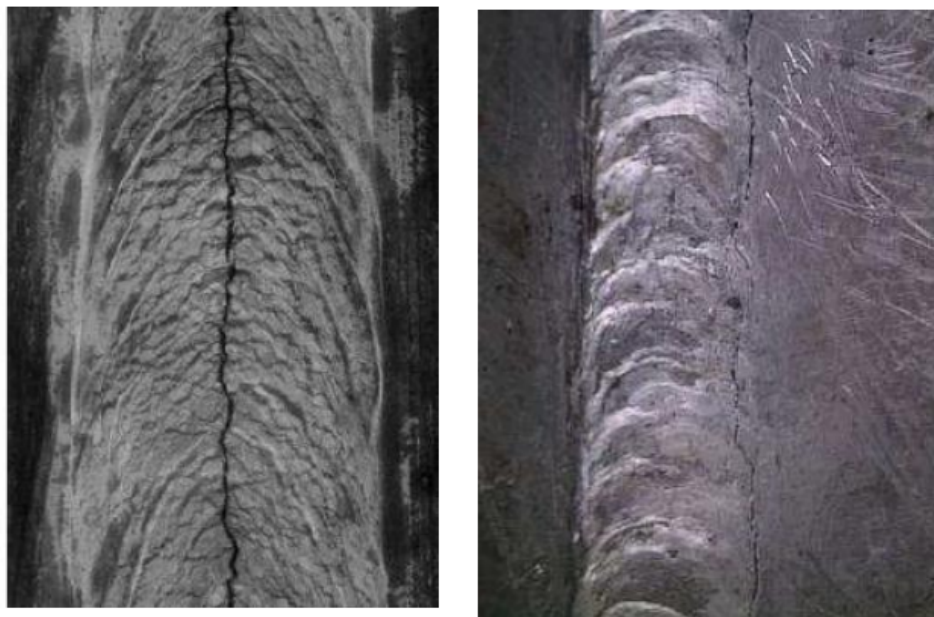
Tople pukotine nastaju na visokim temperaturama pri hlađenju taline do čvrstog stanja. Nastaju zbog nečistoća u materijalu, loših parametara zavarivanja, pogrešnog izbora dodatnog materijala kao i uslijed nepogodnog oblika žlijeba. No i dalje glavni uzrok njihovog nastajanja je nemogućnost metala zavara da podnese naprezanje nastalo skupljanjem u zadnjoj fazi skrućivanja pri visokim temperaturama. Tople pukotine najčešće su smještene duž sredine zavara, no također ih je moguće naći i u zoni utjecaja topline.

Nastajanje toplih pukotina prikazano je na slici 3.6. Skrućivanje počinje od hladnih stranica žlijeba k sredini zavara, gdje talina popunjava razdvojeni dio (B). U zadnjoj fazi skrućivanja ostaje tanki film taline između zrna skrućenog materijala (C). Područje skrućenog materijala stvara velika naprezanja skupljajući se u smjeru suprotnom od pravca skrućivanja (A). Ukoliko u procesu skupljanja i skrućivanja prevlada skupljanje, zrna materijala će ostati razdvojena i pojaviti će se topla pukotina (E).



Slika 3.6. Nastajanje toplih pukotina [5]

Primjer toplih pukotina u zavarenom spoju prikazan je slikom 3.7.



*Slika 3.7. Prikaz toplih pukotina [6]*

Hladne pukotine nastaju nakon zavarivanja pri temperaturi nižoj od 300°C. Glavni uzročnici nastajanja su mikrostrukture metala zavara i ZUT-a koje su vrlo osjetljive na djelovanje vodika, odnosno prisutnost vodika u zavaru. Također uzroci nastajanja hladnih pukotina su i višak naprezanja nastalo skupljanjem zavara ili radi nepovoljnog položaja uključaka u zavaru. Hladne pukotine javljaju se pri zavarivanju čelika visoke i povišene čvrstoće. Zbog njihove strukture pri velikim zaostalim naprezanjima može doći do loma, tj. pojave pukotina. Položene su poprečno i uzdužno na zavar ili se nalaze na prijelazu u osnovni materijal.

Hladne pukotine nastaju difundiranjem vodika u talinu zavara pri visokim temperaturama gdje se nalazi u atomarnom stanju. Hlađenjem vodik prelazi u molekularno stanje te ulazi u materijal na mjestu sitnih pogrešaka, pri čemu se javljaju visoki tlakovi. Vodikova raspodjela zavisi o tipu i količini različitih uključaka, makro i mikro pora te njihovog rasporeda. Pore se pri utjecaju visokog tlaka mogu povezati i stvoriti veću pukotinu, osobito pri dodatnom djelovanju visokih naprezanja nastalih skupljanjem metala zavara.

### 3.1.3. Izbjegavanje nastajanja pukotina

Pukotine se ne mogu izbjeći u potpunosti, no pojedinim mjerama mogu se smanjiti ili čak djelomično otkloniti.

Načini izbjegavanja pukotina su:

- izbor prikladnog postupka zavarivanja,
- prije zavarivanja potrebno je sušenje elektroda i praška,
- ispravan dodatni materijal,
- pravilno pripremiti spoj za zavarivanje; površina uz zavar treba biti obrušena, nije dopuštena vlaga, hrđa, okujina, masnoća
- neophodno je ograničiti unos topline pri procesu zavarivanja,
- primjeniti redosljed zavarivanja koji će osigurati najmanja zaostala naprezanja,
- paziti da se površina materijala ne ošteti primjenom oštih alata,
- ukoliko je potrebno, napraviti predgrijavanje na određenu temperaturu i održavati ju tokom cijelog zavarivanja,
- provođenje višeslojnog zavarivanja vezanim slojevima bez većeg poprečnog nagiba vrha elektrode,
- potrebno je izbjegavati dodatna zavarivanja (privarivanja) pomoćnih sredstava na površinu materijala, no ukoliko ih se ne može izbjeći zavar je potrebno zavariti istom metodom kao i glavni zavar,
- pri zavarivanju debljih materijala potrebno je provesti dodatne kontrole zavarenog spoja nakon odžarivanja [5].



### 3.2. Šupljine – poroznost

Šupljina u metalu zavara predstavlja mjesto ispunjeno stlačenim plinom. Nastajanje šupljina povezano je s mogućnošću da metal zavara u rastaljenom stanju upije velike količine plinova zaostalih tijekom zavarivanja, zbog nečiste površine zavarenog spoja, vlažnog zraka te utjecaja vjetra. Vodik i dušik upijaju se izravno, dok se kisik nalazi u spoju sa ugljikom u obliku ugljičnog monoksida (CO). Ohlađivanjem zavara plinovi naglo izranjaju iz metala u obliku mjehurića. Ukoliko brzina hlađenja metala prelazi brzinu izlučivanja plinova, mjehurići plinova ostaju zarobljeni u zavaru. Iz navedenog je moguće zaključiti da je povoljnije sporije hlađenje zavara.

Pojedinačni mjehurići u sučeljenom spoju nemaju većeg utjecaja na smanjenje čvrstoće zavara. Ukoliko mjehurići izgube kuglasti oblik, tj. ostanu otvoreni prema površini, imaju štetan utjecaj na trajnu čvrstoću zavara.

Šupljine u zavarenom spoju mogu imati štetan utjecaj na dinamički opterećenu konstrukciju, gdje može doći do pojave pukotina povezivanjem pojedinih pora, naročito kada su blizu jedna drugoj. Njihovo popravljanje vrši se žlijebljenjem te ispravnim zavarivanjem.

Primjeri poroznosti u zavarenim spojevima prikazani su slikom 3.8.



Slika 3.8. Primjeri poroznosti u zavarenom spoju [5];  
A- površinska poroznost pri EPP zavarivanju čelika; B – poroznost pri REL zavarivanju Cr-Ni čelika; C- pore pri TIG zavarivanju aluminija; D – pore u korijenu kod MAG zavarivanja čelika



### 3.2.1. Uzročnici nastajanja šupljina

Glavni uzročnici nastajanja šupljina u zavaru su nečistoća i vlaga na mjestima zavarivanja ili u dodatnom materijalu, loša zaštita samog procesa zavarivanja, neispravni parametri i tehnika rada u zavarivanju ili osnovni materijal s visokim sadržajem ugljika.

Vlagu se najčešće može naći u prašku, oblozi elektrode, u zaštitnom plinu i na površini mjesta zavarivanja. Pod najčešće nečistoće ubrajaju se hrđa, okujina, čestice oksida ili opiljci od brušenja u žlijebu te masnoće na površini žlijeba.

Česti uzrok nastajanja šupljina je nepravilno uspostavljanje i prekidanje električnog luka. Ukoliko vrh elektrode dođe u doticaj s materijalom te se odmakne zbog uspostavljanja luka, dolazi do ulaska štetnih atmosferskih plinova koji se upijaju u talinu. Isto se događa i odmicanjem elektrode, nepravilnim prekidanjem električnog luka. Mjesta prekidanja električnog luka moraju se pretaliti ili obrusiti pravilnom tehnikom rada.

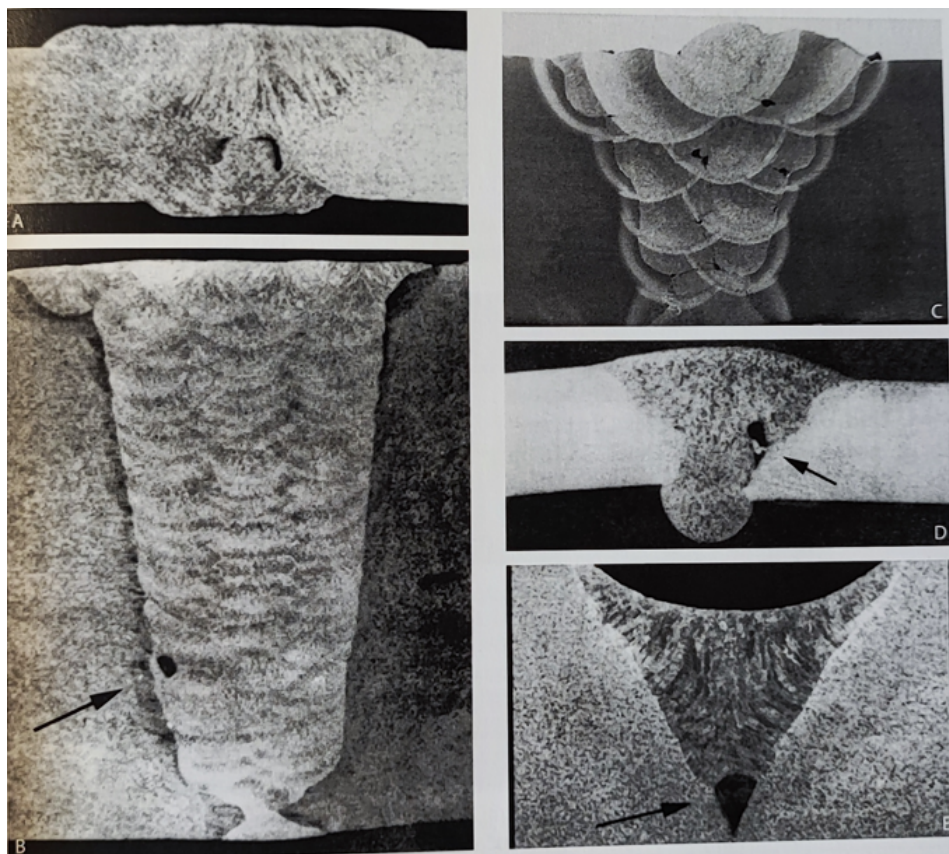
### 3.2.2. Izbjegavanje nastajanja šupljina

U prijašnjem potpoglavlju prikazani su neki od uzročnika nastajanja šupljina, a ovo su neki od načina izbjegavanja:

- mjesto zavarivanja mora biti besprijekorno čisto,
- prije samog zavarivanja nehrđajućih čelika potrebno je odmaščivanje spoja,
- prije samog zavarivanja aluminijskih legura potrebno je uklanjanje oksida,
- prije zavarivanja u hladnijim uvjetima potrebno je osušiti spoj plinskim plamenom,
- tehnika rada mora biti pravilna,
- parametri zavarivanja moraju biti pravilni,
- uređaj za zavarivanje mora biti ispravan,
- količina zaštitnog plina mora biti idealna (ne prevelika ili premala),
- električni luk i napon moraju biti ispravni,
- uspostavljanje te prekidanje električnog luka mora biti pravilno,
- čistoća zaštitnog plina treba biti odgovarajuća,
- prije zavarivanja potrebno je sušenje obloženih elektroda te praška [5].

### 3.3. Čvrsti ukljucci

Čvrsti ukljucci mogu se pojaviti kao nemetali i metali. Kao nemetali mogu biti prašak i troska, dok kao metali mogu biti ukljućak volframa ili spojevi poput oksidne kožice u zavaru aluminija. Primjeri ukljućaka u zavarenim spojevima prikazani su slikom 3.9.



*Slika 3.9. Primjer ukljućaka troske u zavarenom spoju [5]  
 A – kod EPP zavarivanja; B – vrlo debeli materijal; C – kod MAG zavarivanja;  
 D – kod REL zavarivanja; E – kod zavarivanja praškom punjenom žicom*

#### 3.3.1. Čvrsti ukljucci kao nemetali

Ukljucci troske nastaju zbog prljavštine između spojeva zavara "podvlačenjem" taline troske pod talinu metala ili nedovoljne brzine zavarivanja pri čemu talina troske ide ispred električnog luka te se uvlači ispod taline metala. Ponajviše nastaju u oštrim uglovima i dubokim žlijebovima zbog njihovog otežanog čišćenja. Potrebno je da se takva mjesta prvo izbruse pa tek onda zavaruju.

Ukljucci praška nastaju zbog pada praška u oštro dno žlijeba ili nedovoljne brzine zavarivanja gdje talina ne dopušta penetraciju električnog luka do dna pri čemu prašak ostaje nepretaljen.

Nemetalni uključci zbog svoje nehomogenosti smanjuju čvrstoću zavara, naravno ovisno o obliku, količini i veličini uključka. Najviše pukotina javlja se kod uključaka oštih rubova, dok sitni uključci kuglastog oblika nisu opasni i djeluju kao pore.

### 3.3.2. Čvrsti uključci kao metali

Uključci oksidne kožice nastaju zbog lošeg čišćenja oksidne kožice uz žlijeb ili na površini žlijeba koje se treba obaviti neposredno prije zavarivanja. Takvi se uključci karakteriziraju kao grubi te se mogu otkriti prozvučivanjem ili prozračivanjem. Također postoje i sitni uključci, kemijski, a neki od njih su fosfidni, silikatni, nitridni i sulfidni uključci.

Kao i kod nemetalnih uključaka, i metalni zbog svoje nehomogenosti smanjuju čvrstoću zavara. Metalni uključci su maleni, najpoznatiji su volfram kod TIG zavarivanja Al i Al-legura i uključak bakra kod EPP zavarivanja. S njima se postupa kao i s nemetalnim uključcima.

### 3.3.3. Izbjegavanje nastajanja čvrstih uključaka

Neki od načina izbjegavanja čvrstih uključaka u zavaru:

- pravilno pripremljen spoj za zavarivanje,
- temeljito čišćenje troske između sojeva,
- izbrusiti oštre zareze prije zavarivanja,
- ispravna tehnika rada,
- ispravni parametri zavarivanja,
- kod zavarivanja dezoksidiranog i poludezoksidiranog čelika treba upotrijebiti osnovne elektrode, osnovne punjene žice i osnovne praškove,
- pri zavarivanju Al i Al-legura potrebno je otkloniti oksidnu kožicu neposredno prije zavarivanja.

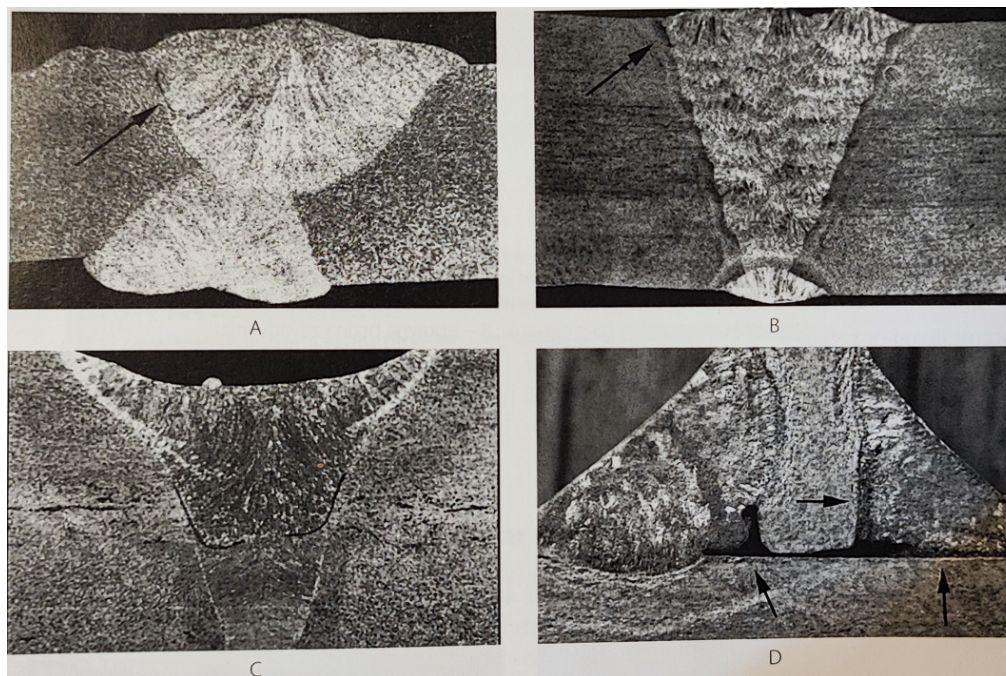
### 3.4. Naljepljivanje i nedovoljan provar

Naljepljivanje je greška izostanka čvrste strukturne veze u zavaru ili navaru. Nastaje taloženjem taline dodatnog materijala na hladnu, pretaljenu površinu spoja ili ranijeg sloja zavara.

Nedovoljni provar se dobiva nedovoljnim protaljivanjem preko cijelog presjeka zavarenog spoja.

#### 3.4.1. Uzroci naljepljivanja

Najčešći uzroci nastanka pogrešaka naljepljivanja su nepravilna priprema spoja za zavarivanje, neispravni parametri zavarivanja ili neispravna tehnika rada. Nepravilna priprema spoja može biti preuzak žlijeb što ne osigurava dovoljno protaljivanje u dnu žlijeba, posebno ako se koristi elektroda prevelikog promjera. Naljepljivanje se najčešće javlja kod zavarivanja MAG postupkom. Pod nesipravnim parametrima smatraju se prevelika brzina zavarivanja, premala jakost struje kod zavarivanja ili premala brzina zavarivanja. Nesipravna tehnika rada podrazumijeva najčešće nepravilno držanje pištolja gdje se električni luk usmjerava samo na jednu stranu žlijeba, te se kao uzrok toga dobiva naljepljivanje na drugoj, nedovoljno zagrijanoj strani [5]. Primjeri pogrešaka naljepljivanja prikazani su slikom 3.10.



Slika 3.10. Primjer pogrešaka naljepljivanja u zavarenom spoju [5]  
A,B – manje pogreške naljepljivanja koje je teško otkriti; C – pogreške naljepljivanja među slojevima; D – pogreške naljepljivanja u kutnim spojevima

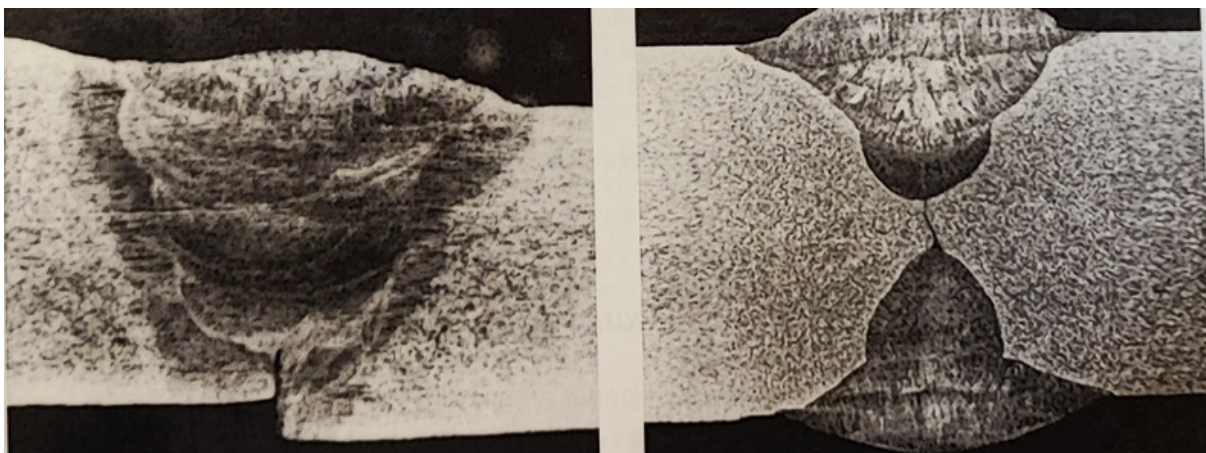


### 3.4.2. Uzroci nedovoljnog provara

Nepotpuni provar zavarenog spoja može biti unutarnja pogreška kod obostranog zavarivanja ili vanjska pogreška kod jednostranog zavarivanja. Vanjska pogreška se najčešće može otkriti vizualnim pregledom, ali ne i u slučaju gdje nije omogućen pristup korijenu zavara.

Najčešći uzroci nedovoljnog provara su nepravilna priprema spoja što obuhvaća premaleni razmak u korijenu, preveliko smaknuće ili prevelika visina grla žlijeba. Drugi od uzroka su neispravni parametri zavarivanja što podrazumijeva premalu struju korištenu kod zavarivanja ili preveliku debljinu žice ili elektrode kojom se zavaruje.

Primjer neprovara zavarenih spojeva dan je slikom 3.11.



*Slika 3.11. Primjeri neprovara zavarenih spojeva; neprovaren korijen (lijevo) i mjestimično provaren korijen X-spoj (desno) [5]*

### 3.4.3. Izbjegavanje pogrešaka naljepljivanja i nedovoljnog provara

Poznavanjem uzroka pogrešaka naljepljivanja dobivene su sljedeće preporuke:

- posebnu pozornost potrebno je obratiti kod MIG/MAG zavarivanja jer se upravo tu događaju pogreške naljepljivanja zbog malog unosa topline pri zavarivanju
- izbjegavati zavarivanje MIG/MAG postupkom kod većih debljina
- izbjegavati zavarivanje prema dolje jer se cijedenjem taline povećava mogućnost pojave naljepljivanja.

Iz uzroka pogrešaka nedovoljnog provara izvedene su sljedeće preporuke:

- najbitnija je kvalitetna obuka zavarivača za zavarivanje korijena zavara
- važna je i priprema spoja, gdje je obavezan jednolik razmak u grlu žlijeba
- preporuča se zavarivanje korijena TIG postupkom, uz odgovarajuću pripremu spoja
- pri zavarivanju velikim jakostima struje (EPP postupak), potrebna je pravilna ocjena potrebne jakosti struje u odnosu na dubinu protaljivanja
- vizualnim pregledom prije zavarivanja potrebno je utvrditi prikladnost žlijeba za zavarivanje korijenskog prolaza.

### 3.5. Pogreške oblika zavara

Kao pogrešku oblika zavara moguće je smatrati svako odstupanje od potrebnog oblika zavara. Pogreške oblika nisu samo estetske pogreške, nego imaju i značajan utjecaj na smanjenje nosivosti zavarenog spoja, pogotovo kod dinamički opterećenih konstrukcija.

Sve pogreške oblika su jasno vidljive i većinom ih je moguće detektirati vizualnim pregledom, te je iz tog razloga njihovo određivanje relativno jednostavno.

Pogreške oblika zavara moguće je podijeliti na:

- zajede uz zavar
- preveliko nadvišenje zavara
- prokapljina u korijenu zavara
- oštar prijelaz zavara
- nesimetričnost zavara
- preveliki preklap zavara
- smaknutost u sučeljavanju stijenki
- odstupanje od pravca
- utonuće zavara
- nedovoljna popuna zavara
- uvučen korijen zavara
- neravnomjerna širina zavara
- neravnomjerna površina zavara
- nepravilno izveden nastavak.

Zajedi uz zavar su oštri zarezi na prijelazu između zavara i osnovnog materijala, a mogu će ih je naći kod sučeljenih i kutnih spojeva. Najčešće nastaju oštećenjima od električnog luka uslijed nepravilne tehnike rada i nepravilnim izborom parametara zavarivanja. Prevelike struje zavarivanja, predugački električni luk ili preveliki napon luka dovode do skupljanja taline na sredini zavara. Skupljanjem taline na sredini zavara, na prijelazu ostaje nedostatak metala i oštećenja, odnosno zajedi.

Preveliko nadvišenje zavara podrazumijeva se kao višak nanesenoga dodatnog materijala. Najčešće se događa uslijed premale brzine zavarivanja ili previsokog nanosa dodatnog materijala.

Prokapljina je ispupčeni višak materijala u korijenu zavara koji se pojavljuje mjestimično. Najčešće nastaje radi loše pripreme spoja, gdje postoji mjestimično veća zračnost u grlu žlijeba. Nastaje nestručnim radom zavarivača uslijed predugoga zaustavljanja na jednom mjestu čine dolazi do procurivanja taline i stvaranja prokapljine. Prokapljinu često prate i druge pogreške poput uključaka, poroznosti ili čak i pukotina.

Oštar prijelaz zavara podrazumijeva nadvišenje zavara sa naglim, oštrim prijelazom na osnovni materijal. Najčešće se javlja radi premalog napona električnog luka ili premale jakosti struje zavarivanja. Zbog oštrog prijeloma, ova pogreška smatra se opasnom radi mogućnosti iniciranja pukotina kod dinamički opterećenih konstrukcija.

Smaknutost je odstupanje od osi pri sučeljavanju dva elementa jednakih debljina kod zavarivanja. Nastaje nepažnjom kod pripreme spoja za zavarivanje ili kod zavarivanja cijevi na koljena radi dimenzijskih odstupanja. Takvom pogreškom čvrstoća zavarenog spoja se smanjuje, čak i kod dobro izvedenih zavara.

Nedovoljna popuna zavara često se dešava u popuni žlijeba gdje nije pravilno procijenjena visina predzadnjeg sloja, pa završni sloj ostaje prenizak ili previsok da bi se položio još jedan sloj.

Uvučen korijen zavara podrazumijeva smanjenu debljinu zavara u korijenu. Nastaje stezanjem metala korijena zavara uslijed hlađenja ili pod utjecajem gravitacije kod nadglavnog zavarivanja.

Nepravilno izveden nastavak je neravnomjernost na licu ili korijenu zavara u obliku ispupčenja ili udubljenja, a nastaje kod prekidanja i ponovnog početka zavarivanja. Osim narušene estetike, na mjestima nepravilno izvedenog nastavka zavar je najslabiji i upravo su na tim mjestima mogući potencijalni počeci loma zavara.

#### 4. ISPITIVANJE STROJNOG DIJELA RADIOGRAFIJOM

Ispitivanje strojnog dijela MS.20-DI.41 odrađeno je u suradnji sa tvrtkom ZIT d.o.o. iz Zagreba koja je ujedno i akreditirani ispitni laboratorij za nerazorna ispitivanja za sve metode navedene u ovom radu. Ispitani strojni dio je „zlatni zavar“ cjevovoda prirodnog plina koji se nalazi na lokaciji Elektrane – toplane (EL-TO) Zagreb. Navedeni zavar je dio projekta zamjene bloka A novim blokom L u EL-TO Zagreb, gdje je u tijeku izgradnja plinske kombi kogeneracijske elektrane i njegova oznaka je Z67C.

„Zlatni zavari“ su oni zavari koji ne podliježu tlačnoj probi, zbog čega ih je potrebno detaljnije ispitati nego zavare koji su dio tlačne probe. Potrebno ih je ispitati s dvije neovisne metode, jednom volumnom i jednom površinskom metodom. Zavar oznake Z67C je ispitivan radiografskom metodom prema HRN EN ISO 17636 i penetrantskom metodom prema HRN EN ISO 3452-1.

Zavar Z67C dimenzija  $\varnothing 219,1 \times 8,18$  mm prikazan na slici 4.1.



*Slika 4.1. Prikaz zavarenog spoja strojnog dijela MS.20-DI.41*



## 4.1. Ispitna oprema i pribor za radiografsko ispitivanje

### 4.1.1. Defektoskop

Za radiografsko ispitivanje korišten je defektoskop proizvođača Nuclear GmbH tipa Teletron SU 50 N prikazan na slici 4.2. Defektoskop je specijalno napravljeno kućište koje sadržava radioaktivni izotop. Takvi tipovi kućišta najčešće su izrađeni od olova ili od osiromašenog uranija kako bi spriječila neželjeno zračenje u okolinu. Unutar kućišta nalazi se radioaktivni izotop smješten u posebnoj kapsuli koja omogućava njegovu pokretljivost i izlazak iz kućišta korištenjem specijalnih alata. Sami defektoskop ima nekoliko sigurnosnih mehanizama kako bi se spriječilo neželjeno izlaženje kapsule sa radioaktivnim izotopom.



*Slika 4.2. Prikaz defektoskopa proizvođača Nuclear GmbH [7]*

### 4.1.2. Radioaktivni izotop

Za prozračivanje strojnog dijela korišten je izotop iridija Ir192. Tvrtnka Nuclear GmbH osigurava transport i dostavu navedenog izotopa tvrtkama koje imaju specijalnu dozvolu za korištenje istih. Na slici 4.3 prikazana je kapsula radioaktivnog izotopa iridija veličine 2,7 x 1,3 mm, serijskog broja DY62, koji je korišten za ispitivanje.



*Slika 4.3. Radioaktivni izotop Ir192*

Na dan ispitivanja, aktivnost izotopa bila je 825,5 GBq (22,31 Ci). Vrijednost aktivnosti radioaktivnog izotopa isčitava se iz tablice dostavljene od proizvođača zajedno sa izotopom prikazanom slikom 4.4.

DECAY CHART FOR IRIDIUM-192								
CAPSULE TYPE			87552					
SERIAL NUMBER			DY62					
ACTIVE DIMENSIONS (mm x mm)			2,7 x 1,3			78910		
EQUIVALENT ACTIVITY / CURIE			58,1					
EQUIVALENT ACTIVITY / GIGA BECQUEREL			2150,8					
CALIBRATION DATE			23.04.22					
NUMBER OF SOURCEHOLDER			E37					
DATE	CURIE	GBq	DATE	CURIE	GBq	DATE	CURIE	GBq
23.04.2022	58,13	2150,8	07.08.2022	21,49	795,1	21.11.2022	7,94	293,9
25.04.2022	57,05	2110,8	09.08.2022	21,09	780,3	23.11.2022	7,80	288,9
27.04.2022	55,99	2071,5	11.08.2022	20,70	765,8	25.11.2022	7,65	283,1
29.04.2022	54,95	2033,0	13.08.2022	20,31	751,6	27.11.2022	7,51	277,9
01.05.2022	53,92	1995,2	15.08.2022	19,93	737,6	29.11.2022	7,37	272,7
03.05.2022	52,92	1958,1	17.08.2022	19,56	723,9	01.12.2022	7,23	267,6
05.05.2022	51,94	1921,6	19.08.2022	19,20	710,4	03.12.2022	7,10	262,6
07.05.2022	50,97	1885,9	21.08.2022	18,84	697,2	05.12.2022	6,97	257,7
09.05.2022	50,02	1850,8	23.08.2022	18,49	684,2	07.12.2022	6,84	252,9
11.05.2022	49,09	1816,4	25.08.2022	18,15	671,5	09.12.2022	6,71	248,2
13.05.2022	48,18	1782,6	27.08.2022	17,81	659,0	11.12.2022	6,58	243,6
15.05.2022	47,28	1749,5	29.08.2022	17,48	646,7	13.12.2022	6,46	239,1
17.05.2022	46,40	1716,9	31.08.2022	17,15	634,7	15.12.2022	6,34	234,6
19.05.2022	45,54	1685,0	02.09.2022	16,84	622,9	17.12.2022	6,22	230,3
21.05.2022	44,69	1653,6	04.09.2022	16,52	611,3	19.12.2022	6,11	226,0
23.05.2022	43,86	1622,9	06.09.2022	16,21	599,9	21.12.2022	5,99	221,9
25.05.2022	43,05	1592,7	08.09.2022	15,91	588,8	23.12.2022	5,88	217,7
27.05.2022	42,25	1563,1	10.09.2022	15,62	577,8	25.12.2022	5,77	213,6
29.05.2022	41,46	1534,0	12.09.2022	15,33	567,1	27.12.2022	5,67	209,6
31.05.2022	40,69	1505,5	14.09.2022	15,04	556,5	29.12.2022	5,56	205,7
02.06.2022	39,93	1477,5	16.09.2022	14,76	546,2	31.12.2022	5,46	201,9
04.06.2022	39,19	1450,0	18.09.2022	14,49	536,0	02.01.2023	5,36	198,2
06.06.2022	38,46	1423,0	20.09.2022	14,22	526,0	04.01.2023	5,26	194,6
08.06.2022	37,74	1396,5	22.09.2022	13,95	516,3	06.01.2023	5,16	190,9
10.06.2022	37,04	1370,6	24.09.2022	13,69	506,7	08.01.2023	5,06	187,3
12.06.2022	36,35	1345,1	26.09.2022	13,44	497,2	10.01.2023	4,97	183,8
14.06.2022	35,68	1320,0	28.09.2022	13,19	488,0	12.01.2023	4,88	180,4
16.06.2022	35,01	1295,5	30.09.2022	12,94	478,9	14.01.2023	4,78	177,0
18.06.2022	34,36	1271,4	02.10.2022	12,70	470,0	16.01.2023	4,70	173,7
20.06.2022	33,72	1247,7	04.10.2022	12,47	461,3	18.01.2023	4,61	170,4
22.06.2022	33,10	1224,5	06.10.2022	12,23	452,7	20.01.2023	4,52	167,2
24.06.2022	32,48	1201,8	08.10.2022	12,01	444,3	22.01.2023	4,44	164,1
26.06.2022	31,88	1179,4	10.10.2022	11,78	436,0	24.01.2023	4,36	161,1
28.06.2022	31,28	1157,5	12.10.2022	11,56	427,9	26.01.2023	4,28	158,2
30.06.2022	30,70	1135,9	14.10.2022	11,35	419,9	28.01.2023	4,20	155,2
02.07.2022	30,13	1114,8	16.10.2022	11,14	412,1	30.01.2023	4,12	152,3
04.07.2022	29,57	1094,1	18.10.2022	10,93	404,5	01.02.2023	4,04	149,5
06.07.2022	29,02	1073,7	20.10.2022	10,73	396,9	03.02.2023	3,97	146,7
08.07.2022	28,48	1053,7	22.10.2022	10,53	389,5	05.02.2023	3,89	144,0
10.07.2022	27,95	1034,1	24.10.2022	10,33	382,3	07.02.2023	3,82	141,3
12.07.2022	27,43	1014,9	26.10.2022	10,14	375,2	09.02.2023	3,75	138,7
14.07.2022	26,92	996,0	28.10.2022	9,95	368,2	11.02.2023	3,68	136,1
16.07.2022	26,42	977,5	30.10.2022	9,77	361,4	13.02.2023	3,61	133,6
18.07.2022	25,93	959,3	01.11.2022	9,58	354,6	15.02.2023	3,54	131,1
20.07.2022	25,45	941,5	03.11.2022	9,41	348,0	17.02.2023	3,48	128,7
22.07.2022	24,97	924,0	05.11.2022	9,23	341,6	19.02.2023	3,41	126,3
24.07.2022	24,51	906,8	07.11.2022	9,06	335,2	21.02.2023	3,35	123,9
26.07.2022	24,05	889,9	09.11.2022	8,89	329,0	23.02.2023	3,29	121,6
28.07.2022	23,60	873,4	11.11.2022	8,73	322,9	25.02.2023	3,23	119,3
30.07.2022	23,17	857,1	13.11.2022	8,56	316,9	27.02.2023	3,17	117,0
01.08.2022	22,73	841,2	15.11.2022	8,40	311,0	01.03.2023	3,11	114,8
03.08.2022	22,31	825,5	17.11.2022	8,25	305,2	03.03.2023	3,05	112,6
05.08.2022	21,90	810,2	19.11.2022	8,09	299,5	05.03.2023	2,99	110,4

Slika 4.4. Tablica radioaktivnog raspada izotopa Ir192

#### 4.1.3. Daljinski upravljač

Jedan od zaštitnih mehanizama kod upravljanja zatvorenim radioaktivnim izvorima je daljinski upravljač, u praksi nazvan i “motalica“ te omogućava ispitivaču da sa sigurne udaljenosti dovede radioaktivni izvor do objekta koji se ispituje. Sastoji se od čelične sajle dugačke deset metara zaštićene polimernom cijevi koja služi sprječavanju bilo kakvih onečišćenja sajle i mehanizma za izbacivanje. Jedan takav daljinski upravljač prikazan je na slici 4.5.



*Slika 4.5. Daljinski upravljač [7]*

#### 4.1.4. Vodilica

Rukovanje radioaktivnim izotopima je opasno i štetno po zdravlje, te se specijalnim vodilicama omogućava dovođenje izotopa do ispitnog objekta koji je potrebno prozračiti. Takve vodilice dolaze u dvije varijante; plastična i čelična, od kojih svaka ima svoje prednosti i nedostatke. U ovom ispitivanju korištena je plastična vodilica duljine 1,5 m prikazana na slici 4.6.



*Slika 4.6. Plastična vodilica proizvođača Nuclear GmbH [7]*

#### 4.1.5. Kolimator

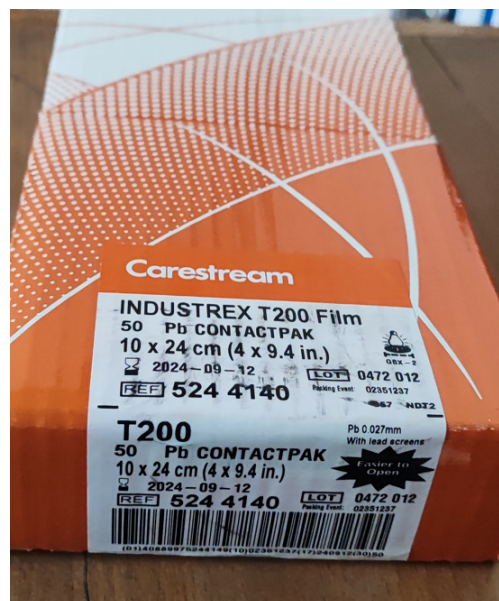
Kolimator je završetak koji se priključuje na vodilicu i njegova je uloga usmjeravanje zračenja prema ispitnom objektu kako bi se smanjilo nepotrebno zračenje u okoliš te smanjilo ozračivanje ispitivača. Najčešće se izrađuju od olova ili od osiromašenog uranija, a ovisno o obliku i tehnici ispitivanja mogu biti fokusirajući ili raspršujući, što znači da ili fokusiraju radioaktivno zračenje ili raspršuju radioaktivno zračenje (slika 4.7).



Slika 4.7. Kolimatori proizvođača Nuclear GmbH [7]

#### 4.1.6. Film sustav

Film sustav korišten pri ispitivanjima je Carestream Industrex T200 film, što odgovara klasi C4, a kutija takvih filmova prikazana je slikom 4.8.



Slika 4.8. Kutija sa radiogramima gdje je prikazan broj šarže i rok valjanosti



Na slici 4.9 moguće je vidjeti jedan neeksponirani film izvađen iz vakuum pakiranja. Sa svake strane filma nalazi se olovna folija koja apsorbira raspršeno zračenje na film u svrhu postizanja bolje kvalitete radiograma.



*Slika 4.9. Neeksponirani film izvađen iz vakuum pakiranja*

#### 4.1.7. Olovne oznake

Kako bi na filmu ostale trajne oznake koje definiraju ispitani zavar, liniju i sve ostale parametre, koriste se olovne oznake u vidu slova i brojeva, koje kod ispitivanja apsorbiraju većinu zračenja, te na filmu ostaju jasno vidljive. Olovne oznake prikazane su slikom 4.10.



*Slika 4.10. Olovna slova i brojevi za označavanje zavora*

#### 4.1.8. Indikatori kvalitete radiograma

Kako bi se dokazalo da je postignuta osjetljivost ispitivanja, koja je definirana normom, koriste se indikatori kvalitete radiograma prikazani slikom 4.11. Za pojedine materijale koriste se različiti indikatori, a najčešće korišteni indikatori su za čelik, aluminij i bakar, te svaki od njih sadrži i oznaku materijala koji se ispituje. Indikatori su napravljeni od nekoliko žica izrađenih od materijala koji se ispituju, sa točno određenim debljinama žice. U ovisnosti o debljini prozračenog materijala, norma propisuje točno koja žica indikatora mora biti vidljiva, što je ujedno i dokaz o postignutoj kvaliteti radiograma.



*Slika 4.11. Indikatori kvalitete radiograma*

#### 4.1.9. Sustav za razvijanje

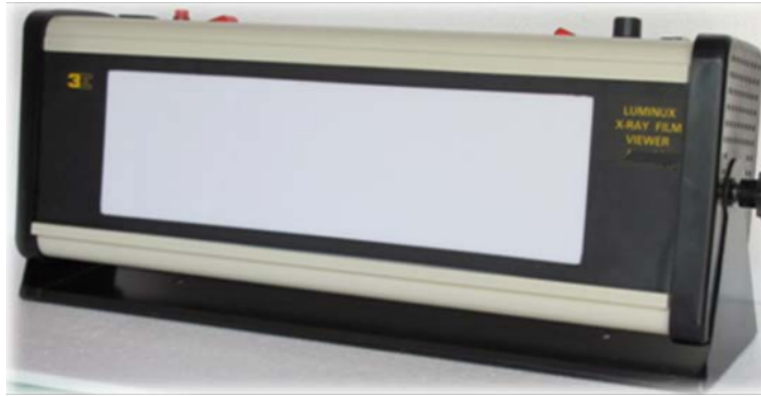
Kako bi latentna slika postala vidljiva, film je potrebno kemijski obraditi. Sustav za obradu ne razlikuje se puno od klasičnog sustava za razvijanje fotografija, a sastoji se od razvijача, fiksira i vode. Za industrijsku radiografiju normom je propisani sustav i način razvijanja prozračenih filmova. Slikom 4.12. prikazana je kada za kemijsku obradu filmova.



*Slika 4.12. Kada za razvijanje filmova [8]*

#### 4.1.10. Iluminator

Nakon razvijanja i sušenja radiograma pristupa se njihovom pregledu. Radiogrami se pregledavaju pomoću iluminatora koji osvjetljavaju radiograme i omogućavaju vizualni prikaz ispitivanih objekata. Iluminator je prikazan slikom 4.13.



*Slika 4.13. Iluminator [9]*

#### 4.1.11. Denzitometar

Svaki radiogram prema normi ima definirani raspon zacrnljenja radiograma koji je potrebno postići. Zacrnljenje radiograma provjerava se uređajem zvanim denzitometar prikazanim na slici 4.14. Zacrnljenje propisano normom mora biti minimalne vrijednosti 2.3, a maksimalne vrijednosti ovisno o vrijednosti osvjetljenja koju postiže iluminator, te je definirano vrstom i tipom iluminatora.



*Slika 4.14. Denzitometar [8]*

## 4.2. Postupak ispitivanja

Prvi korak svakog ispitivanja radiografijom je pravilno ograđivanje prostora u kojem se ispitivanje provodi kako bi se spriječio ulazak ljudi u zonu zračenja. Nakon što su ispunjeni svi parametri sigurnosti pristupa se pripremi za ispitivanje i samom ispitivanju. Pod pripremom za ispitivanje podrazumijeva se postavljanje olovnih oznaka i indikatora kvalitete radiograma na filmove. Zatim se defektoskop namješta na poziciju, te se na jednu stranu defektoskopa spaja vodilica izvora s kolimatorom, a na drugu stranu daljinski upravljač. Kolimator je potrebno pozicionirati uz zavar, a vodilicu na koju je spojen čim manje previjati kako bi se osiguralo pravilno izbacivanje izvora u kolimator.

Za ispitivanje zavarenog spoja Z67C dimenzija  $\text{Ø}219,1 \times 8,18$  mm korištena su četiri filma dimenzija  $240 \times 100$  mm kako bi se pokrio cijeli opseg ispitivanog zavaru. Broj filmova i ekspozicija za takav zavar definiran je normom HRN EN ISO 17636, gdje norma kaže da su potrebne četiri ekspozicije, odnosno četiri filma kako bi se dovoljno kvalitetno ispitao traženi zavar. Oko zavaru se postavlja olovni metar, u slučaju da postoje neprihvatljive pogreške u zavaru, kako bi se znala točna lokacija za popravak. Postavljanje filma na zavar prikazano je slikom 4.15.



*Slika 4.15. Postavljeni film na zavaru*



Nakon što je film postavljen na zavar, pristupa se spajanju daljinskog upravljača na jednu stranu defektoskopa, te spajanju vodilice i kolimatora na vodilicu sa druge strane defektoskopa. Na slici 4.16 prikazan je defektoskop s priključenim daljinskim upravljačem i vodilicom.



*Slika 4.16. Prikaz defektoskopa sa spojenim daljinskim upravljačem (dolje) i vodilicom (gore)*

Kako bi se osigurala udaljenost između ispitivača i radioaktivnog izotopa koji u kapsuli izlazi iz defektoskopa potrebno je pravilno postaviti daljinski upravljač. U praksi se uvijek pokušava postaviti daljinski upravljač što je dalje moguće od defektoskopa, te se skloniti iza objekta koji apsorbira zračenje. U ovom slučaju daljinski upravljač je bio postavljen iza teškog stroja koji je apsorbirao većinu zračenja. Postavljeni daljinski upravljač prikazan je slikom 4.17.



*Slika 4.17. Postavljeni daljinski upravljač*



S druge strane defektoskopa ranije je postavljena vodilica koju je potrebno dovesti do samog zavara. Na kraju vodilice spojen je kolimator koji usmjerava zračenje prema postavljenom filmu, gdje je potrebno izmjeriti jednaku udaljenost od svakog kraja filma, kako bi zračenje padalo centralno na film. Vodilicu je potrebno čim ravnije postaviti kako bi se spriječilo eventualno zapinjanje kapsule sa radioaktivnim izotopom unutar vodilice. Vodilica sa kolimatorom prislonjenim uz zavar prikazana je slikom 4.18.



*Slika 4.18. Vodilica sa kolimatorom prislonjenim uz zavar*

Kada je sve postavljeno pristupa se izračunu vremena ekspozicije. Na vrijeme ekspozicije utječe nekoliko faktora, a to su:

- vrsta radioaktivnog izotopa,
- materijal koji se prozračuje,
- aktivnost radioaktivnog izotopa,
- debljina materijala koji je potrebno prozračiti,
- udaljenost izvora od filma,
- klasa filma,
- željeno zacrnjenje radiograma.

U praksi se koristi jednostavna aplikacija u koju se unesu svi parametri, te aplikacija izračuna vrijeme ekspozicije (slika 4.19). Na dan ispitivanja aktivnost radioaktivnog izotopa (*activity*) iznosila je 22,31 Ci i radi se o vrsti izotopa (*source type*) Ir192 . Promjer cijevi koji se ispituje iznosi Ø219,1 mm, što je ujedno i udaljenost izvora od filma (*SFD – source to film distance*). Debljina same cijevi koja se ispituje iznosi 8,18 mm, ali u ovom slučaju potrebno je prozračiti obje stijenke, stoga se prozračena debljina uzima kao 2 x 8,18 mm, te se još uzima u obzir i samo nadvišenje zavara, koje se procjenjuje na približno 1 mm. Sa svime uzetim u obzir prozračena debljina materijala (*exposure thickness*) uzima se 18 mm. Klasa filma je C4, a za željeno konačno zacrnjenje (*density*) uzima se vrijednost 2,5. Na slici 4.19 prikazana je navedena aplikacija sa svim unesenim parametrima, gdje je dobivena vrijednost ekspozicije (*exposure time*) jednaka 1 min 25 sec.

Parameter	Value
Source Type	Ir192
Material	Carbon Steel
ExposureThk.(mm)	SCH 18
SFD (mm)	219
Activity (Ci)	22
Film	D5
Density	2.5
Edit Factor	1.0
Calculated Exposure Time	0:1:25

Slika 4.19. Aplikacija i parametri korišteni za izračun vremena ekspozicije

Nakon što je sve postavljeno i proračunato je vrijeme ekspozicije, pristupa se samom ispitivanju. Prije ispitivanja potrebno je još otvoriti sigurnosni mehanizam na defektoskopu kako bi se omogućilo izbacivanje izotopa. Ispitivanje počinje na način da ispitivač stane iza daljinskog upravljača i krene okretati ručni mehanizam, što uzrokuje da sajla daljinskog upravljača izbacuje radioaktivni izotop kroz vodilicu do kolimatora. Kada izotop dođe na svoju poziciju u kolimatoru pokreće se štoperica i mjeri se definirano vrijeme ekspozicije. Nakon isteka vremena ekspozicije, ponovno se okretanjem ručke izotop vraća unutar defektoskopa. Kada je izotop unutar defektoskopa, potrebno je zatvoriti sigurnosni mehanizam koji onemogućava nehote izbacivanje izvora i smanjuje zračenje iz defektoskopa.

Pošto je ranije definirano da su potrebna četiri radiograma kako bi pokrili opseg cijelog zavara, cijeli proces zamjene radiograma na zavaru, pomicanja kolimatora, te izbacivanja i uvlačenja izotopa daljinskim upravljačem potrebno je ponoviti još tri puta. Nakon što je proces ponovljen i završen dobivena su četiri eksponirana filma koje je potrebno razviti u tamnoj komori.

Ispitivanja na samoj lokaciji zavara time su završena i može se pristupiti razvijanju filmova u tamnoj komori tvrtke ZIT d.o.o. Razvijanje filmova odvija se u zamračenoj prostoriji pod crvenim svjetlom slabog intenziteta radi neželjenog osvjetljavanja filmova i kako bi nakon razvijanja bilo moguće dobiti zahtijevanu kvalitetu radiograma. Sami tijekom razvijanja izgleda tako da se prvo pod crvenim svjetlom eksponirani filmovi izvlače iz vakuum pakiranja i odstranjuju olovne folije koje se nalaze sa svake strane filma. Potom se filmovi ulažu u posebne metalne okvire napravljene specijalno za kadu u kojoj se nalaze razvijач, voda za prekidnu kupku, fiksir i voda za završno ispiranje. Filmovi postavljeni u metalne okvire se najprije umeću u razvijач temperature 24°C. Filmovi u razvijачu stoje 5 minuta, te se nakon isteklog vremena razvijanja ispiru u prekidnoj kupki vode, kako bi se osiguralo da je sav razvijач uklonjen sa površine filma. U prekidnoj kupki se ispiru otprilike minutu. Nakon prekidne kupke metalni okviri s filmovima prebacuju se u fiksir. Vrijeme fiksiranja filmova iznosi 15 minuta. Nakon isteka vremena fiksiranja filmovi se prebacuju u vodu za završno ispiranje, gdje je uključen lagani mlaz vode kako bi se osiguralo dovoljno kvalitetno ispiranje fiksira. Nakon otprilike 10 minuta radiogrami se smatraju ispranima te ih je potrebno osušiti. Sušenje je moguće izvršiti u stroju za sušenje, gdje struja zraka pospješuje sušenje radiograma, a radiograme je moguće posušiti i jednostavnim vješanjem na špagu, gdje se suše prirodno na zraku.

Jedan takav sustav koji se sastoji od kade za razvijanje i crvenog svjetla koji se nalaze u klimatiziranoj tamnoj komori prikazan je slikom 4.20.



*Slika 4.20. Kada za razvijanje u tamnoj komori tvrtke ZIT d.o.o.*



### 4.3. Rezultati ispitivanja

Nakon što su radiogrami osušeni, spremni su za ocjenjivanje na iluminatoru. Na slici 4.21 prikazani su iluminator i denzitometar u tvrtki ZIT d.o.o. koji su korišteni za ocjenjivanje radiograma.



*Slika 4.21. Iluminator i denzitometar*

Prije ocjenjivanja radiograma potrebno je provjeriti da li zacrtnjenje odgovara zahtjevima norme. Na slici 4.22 prikazana je provjera zacrtnjenja radiograma gdje je jasno vidljiv iznos zacrtnjenja jednak +3,19. Norma HRN EN ISO 17636 definira da zacrtnjenje mora biti  $\geq 2,3$ , što znači da postignuto zacrtnjenje zadovoljava zahtjev norme.

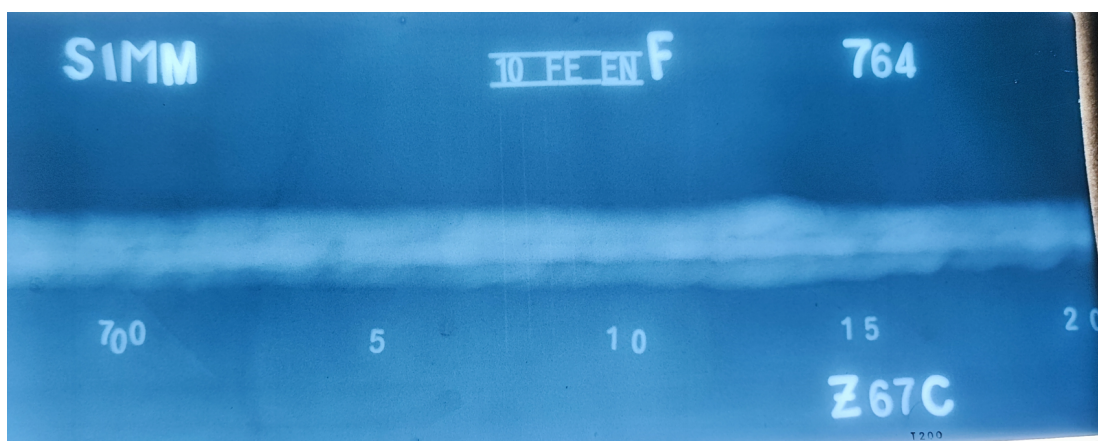


*Slika 4.22. Provjera zacrtnjenja radiograma denzitometrom*

Nakon što je utvrđeno zadovoljavajuće zacrnjenje radiograma pristupa se ocjenjivanju.

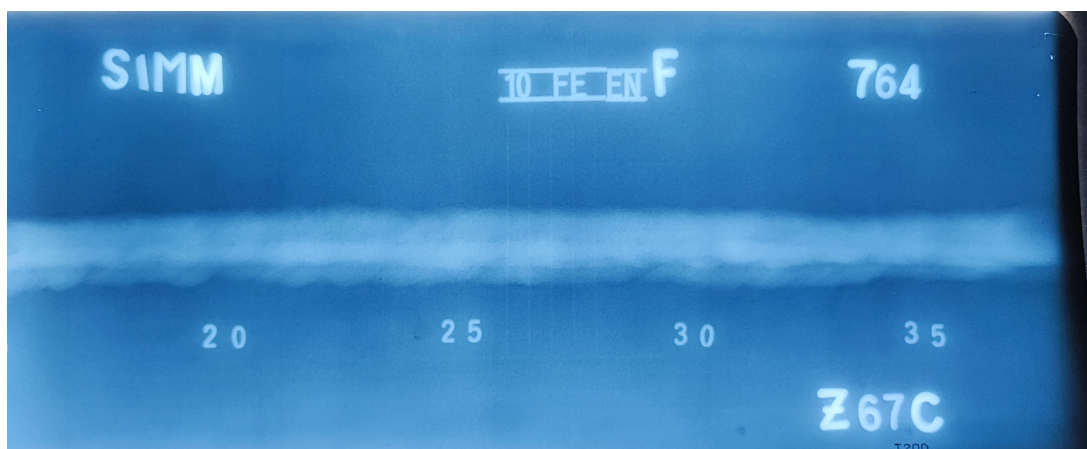
Kriterij prihvatljivosti za ispitani zavar Z67C definiran je normom HRN EN ISO 10675-1, razina prihvatljivost 2 (eng. Acceptance level 2), što odgovara kriteriju prihvatljivosti norme HRN EN ISO 5817, razina prihvatljivosti C. Ocjene pogrešaka u zavarenom spoju su u skladu sa normom HRN EN ISO 6520-1.

Na slici 4.23 prikazan je radiogram zavara Z67C na lokaciji 0-20 cm. Radiogram je ocjenjen prihvatljiv, uz postojeće nepravilnosti: nepravilna površina zavara, oznaka 514 prema HRN EN ISO 6520-1.



*Slika 4.23. Radiogram zavara Z67C na lokaciji 0-20 cm*

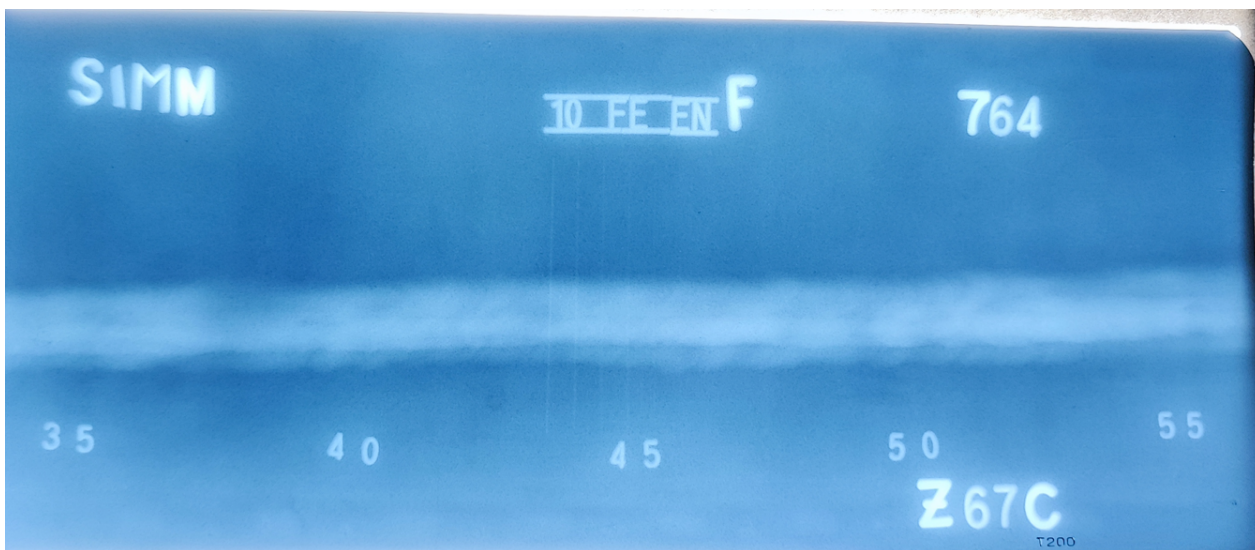
Na slici 4.24 prikazan je radiogram zavara Z67C na lokaciji 20-35 cm. Radiogram je ocjenjen prihvatljivim uz postojeće nepravilnosti: nepravilna površina zavara, oznaka 514 prema HRN EN ISO 6520-1.



*Slika 4.24. Radiogram zavara Z67C na lokaciji 20-35 cm*

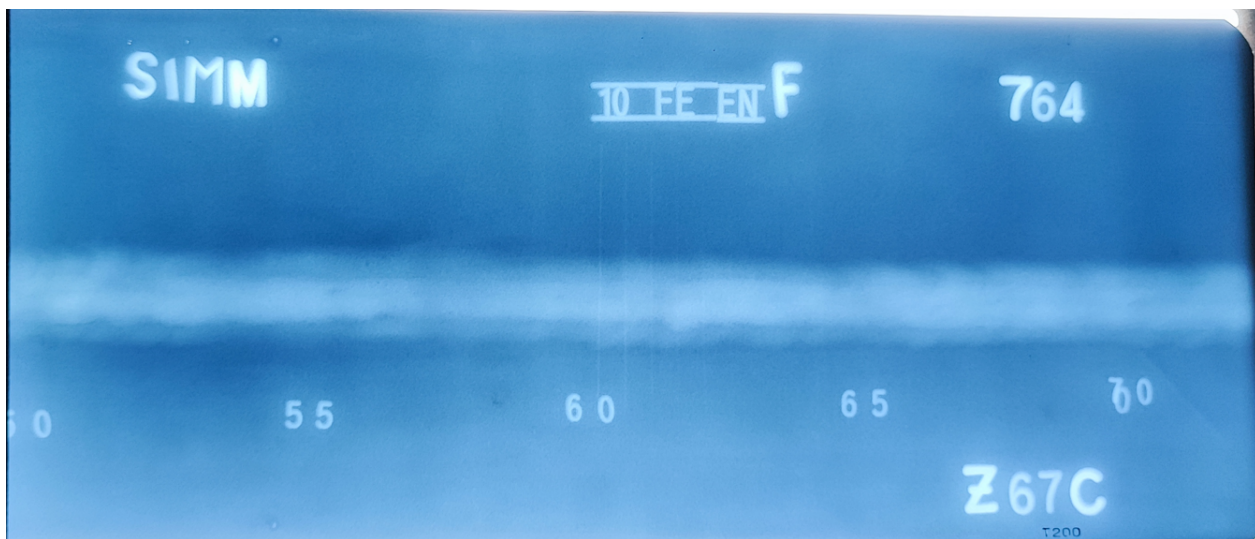


Na slici 4.25 prikazan je radiogram zavara Z67C na lokaciji 35-55 cm. Radiogram je ocjenjen prihvatljivim, te nisu pronađene nepravilnosti u zavarenom spoju.



*Slika 4.25. Radiogram zavara Z67C na lokaciji 35-55 cm*

Na slici 4.26 prikazan je radiogram zavara Z67C na lokaciji 50-0 cm. Radiogram je ocjenjen prihvatljivim, te nisu pronađene nepravilnosti u zavarenom spoju kao ni na prethodnom radiogramu.



*Slika 4.26. Radiogram zavara Z67C na lokaciji 50-0 cm*

Pregledom četiri radiograma zavara Z67C pronađene su sitne geometrijske nepravilnosti koje nemaju značajan utjecaj na čvrstoću navedenog zavara. Takve geometrijske nepravilnosti zadovoljavaju kriterij prihvatljivosti definiran normom HRN EN ISO 5817, razine prihvatljivosti C, te se zavar može klasificirati prihvatljivim.

## 5. ISPITIVANJE STROJNOG DIJELA PENETRANTIMA

Isti zavar oznake Z67C potrebno je ispitati i površinskom metodom, odnosno penetrantima. Penetranti kao površinska metoda služe za brzu i pouzdanu detekciju bilo kakvih površinskih nepravilnosti na zavarenom spoju.

### 5.1. Oprema za ispitivanje penetrantima

Korišteni sustav za ispitivanje penetrantima je od proizvođača Magnaflux koji se sastoji od sprej doza crvenog penetranta, čistača i razvijača.

#### 5.1.1. Penetrant

Za penetriranje je korišten crveni, vodom perivi penetrant proizvođača Magnaflux, oznake SKL-WP2. Prikladan je za ispitivanje velikih i hrapavih površina gdje je višak penetranta teško ukloniti sredstvom za čišćenje ili emulgatorom. Ovaj jarko crveni penetrant dizajniran je na način da ga je lako moguće očistiti s ispitivane površine, čak i na grubim površinama. Brzo ispiranje smanjuje potrošnju vode ili čistača u postupku ispitivanja i omogućava pouzdan proces nerazornog ispitivanja. Ovaj vodom perivi crveni penetrant ispunjava sve uvjete propisane normom za ispitivanje penetrantima u boji i može se koristiti na širokom spektru materijala, uključujući metale i nemetale. Obično se koristi na zavarenim spojevima, otkivcima, odljevcima i posudama pod tlakom, a pogodan je za proizvodno okruženje gdje se mnogi dijelovi svakodnevno provjeravaju. Korišteni penetrant prikazan je slikom 5.1.



Slika 5.1. Prikaz crvenog penetranta oznake SKL-WP2

### 5.1.2. Čistač

Za čišćenje površine prije samog ispitivanja, kao i za uklanjanje viška penetranta s površine korišten je čistač proizvođača Magnaflux, oznake SKC-S. SKC-S je pouzdano otapalo za čišćenje/odstranjivanje nečistoća prije ispitivanja bez razaranja i za uklanjanje viška površinskog penetranta iz područja inspekcije prije nanošenja razvijaača pri ispitivanjima tekućim penetrantima. Ovakav čistač, odnosno otapalo može se koristiti na širokom rasponu podloga u svrhu uklanjanja ulja, masti i drugih onečišćenja. Brzo se suši bez ostavljanja tragova sušenja i ispunjava zahtjeve niske razine tragova sušenja u nerazornim ispitivanjima. Čistač korišten pri ispitivanju prikazan je slikom 5.2.



Slika 5.2. Prikaz čistača oznake SKC-S

### 5.1.3. Razvijač

Za razvijanje je korišten svijetli bijeli razvijač proizvođača Magnaflux, oznake SKD-S2, koji stvara neprozirnu bijelu pozadinu pri ispitivanju penetrantima visokog kontrasta i brzo izvlači penetrant na površinu kako bi ostvarila bolja vidljivost, a samim time i jasnije indikacije za povećanu pouzdanost i osjetljivost pregleda. Kompatibilan je sa specijalnim legurama, kao što su nehrđajući čelik, aluminij, magnezij i titan. Ovaj razvijač na bazi otapala udovoljava zahtjevima zrakoplovne i nuklearne industrije te je u skladu sa svim glavnim zahtjevima normi za penetrantsko ispitivanje. SKD-S2 pomaže ubrzati proces ispitivanja radi brzog sušenja, te samim time i bržeg formiranja indikacija uz minimizaciju potrebe za čišćenjem nakon inspekcije. Idealan je za ispitivanje zavara i primjenu na terenu. Razvijač SKD-S2 korišten pri ispitivanju prikazan je slikom 5.3.



*Slika 5.3. Razvijač oznake SKD-S2 korišten za ispitivanje*



## 5.2. Postupak ispitivanja

Prije ispitivanja penetrantima zavar se čisti suhom krpom, radi smanjenja lažnih indikacija uslijed nečistoća. Nakon čišćenja zavara, nanosi se crveni penetrant na zavar. Nakon što je penetrant nanesen na zavar (slika 5.4) potrebno je pričekati 20 minuta kako bi se sitne penetrantske čestice uvukle u sve eventualne nepravilnosti na zavarenom spoju.



*Slika 5.4. Prikaz nanesenog crvenog penetranta na zavar*

Nakon isteka vremena penetriranja potrebno je ukloniti višak penetranta. Višak penetranta prvo se uklanja čistom suhom krpom, a zatim čistom krpom ovlaženom čistačem u spreju. Nakon odstranjivanja viška penetranta ispitna površina suši se slobodno na zraku.

Neposredno nakon sušenja na ispitnu površinu se nanosi razvijač. Količina nanesenog razvijača mora biti optimalna kako bi se dobro uočile eventualne indikacije. Promatranje indikacija obavlja se nakon isteka vremena razvijanja koje je iznosilo 20 minuta.

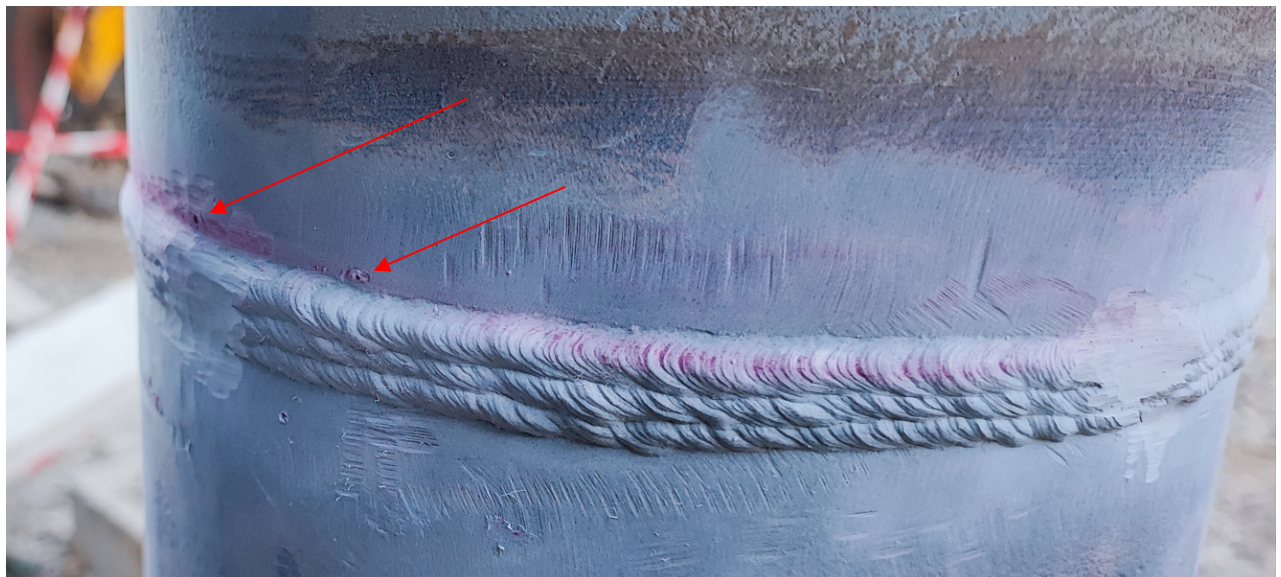
### 5.3. Rezultati ispitivanja

Na slici 5.5 prikazan je razvijač na ispitivanom zavaru nakon isteklog vremena razvijanja. Na navedenoj slici nisu vidljive nikakve indikacije pogrešaka u zavarenom spoju.



*Slika 5.5. Razvijač nakon isteka vremena razvijanja sa prednje strane zavara*

Na slici 5.6 prikazana je druga strana zavara gdje su uočene dvije sitne indikacije, a obje indikacije predstavljaju sitne poroznosti u zoni utjecaja topline, a ne na samom zavarenom spoju. Prema zahtjevanom kriteriju prihvatljivosti takve su poroznosti prihvatljive.



*Slika 5.6. Razvijač nakon isteka vremena razvijanja sa stražnje strane zavara*

## 6. ZAKLJUČAK

Ispitivanje bez razaranja je skupina metoda tehničke analize korištena za procjenu svojstva materijala, dijelova ili kompletnih sustava bez oštećivanja ili narušavanja funkcionalnosti ispitivanog dijela. Omogućuje ispitivanje bez oštećivanja tokom i nakon proizvodnje, ali i u eksploataciji što uvelike ubrzava i poboljšava proces kontrole kvalitete. Upravo iz tog razloga ispitivanje bez razaranja je neizostavni dio provjere kvalitete zavarenih spojeva i osnovnog materijala u bilo kojoj grani industrije, bilo tokom proizvodnje ili u eksploataciji.

Metode ispitivanja bez razaranja moguće je podijeliti na površinske i volumne metode. Neke od najčešćih površinskih metoda ispitivanja bez razaranja su: vizualni pregled, ispitivanje penetrantima i ispitivanje magnetskim česticama, dok su najčešće volumne metode: radiografija te ultrazvučno ispitivanje.

Ispitivanja bez razaranja koriste se za detekciju pogrešaka i nepravilnosti u zavarenim spojevima. Pogreške u zavarenim spojevima su neizbježne, no mogu se umanjiti pažljivim planiranjem i preciznom izradom spojeva. Svaki zavareni spoj mora zadovoljiti zahtjeve kvalitete propisane određenim normama i standardima. Greške u zavarenim spojevima podijeljene su u šest osnovnih grupa: pukotine, šupljine – poroznosti, čvrsti uključci, naljepljivanje i nedovoljni provar, pogreške oblika zavara te ostale pogreške.

Ispitivani strojni dio MS.20-DI.41 je „zlatni zavar“ cjevovoda prirodnog plina oznake Z67C. „Zlatni zavari“ su oni zavari koji ne podliježu tlačnoj probi, zbog čega ih je potrebno detaljnije ispitati nego zavare koji su dio tlačne probe. Potrebno ih je ispitati s dvije neovisne metode, jednom volumnom i jednom površinskom metodom. Zavar oznake Z67C je ispitan radiografskom metodom kao volumnom metodom, tehnikom klasičnog radiografskog ispitivanja korištenjem filma. Za površinsku metodu primjenjeno je ispitivanje penetrantima, tehnikom ispitivanja obojenim penetrantima.

Analizom rezultata ispitivanja radiografijom zaključeno je da zadani strojni dio MS.20-DI.41 kao zavar oznake Z67C, dimenzija  $\varnothing 219,1 \times 8,18$  mm sadrži manje geometrijske nepravilnosti. Analizom rezultata ispitivanja penetrantima utvrđene su dvije nepravilnosti u obliku sitnih poroznosti u ZUT-u. Rezultati ispitivanja radiografijom i penetrantima zadovoljavaju kriterije prihvatljivosti definirane normom HRN EN ISO 5817, razine prihvatljivosti C, te je zavar klasificiran prihvatljivim.



## LITERATURA

- [1] „Nondestructive Evaluation Techniques”, s Interneta, <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/index.xhtml>, 2.6.2022.
- [2] „Bipol Remote Visual Inspection”, s Interneta, <https://www.bipol.fr/Categorie/Remote-Visual-Inspection-3.html>, 14.6.2022.
- [3] „Magnaflux Liquid Penetrant Testing“, s Interneta, <https://magnaflux.eu/en/Products/Liquid-Penetrant-Testing>, 17.6.2022.
- [4] „Magnaflux Magnetic Particle Inspection“, s Interneta <https://magnaflux.eu/en/Products/Magnetic-Particle-Inspection>, 17.6.2022.
- [5] Juraga, I.; Ljubić, K.; Živčić, M.: „Pogreške u zavarenim spojevima“, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2015.
- [6] Davis, J.R.: „ASM Handbook Volume 17 – Nondestructive Evaluation and Quality Control“, ASM International, 1989.
- [7] „Nuclear GmbH”, s Interneta, [http://www.nuclear-gmbh.de/e\\_index.html](http://www.nuclear-gmbh.de/e_index.html), 20.6.2022.
- [8] „Kowopro K”, s Interneta, <https://ndtproducts.forcetechnology.com/product/kowopro-k/>, 20.6.2022.
- [9] „Luminux LH25”, s Interneta, [https://www.3endt.eu/\\_media/luminux-led-film-viewer-led-portable-lh-25-lh-48.pdf](https://www.3endt.eu/_media/luminux-led-film-viewer-led-portable-lh-25-lh-48.pdf), 20.6.2022.
- [10] Charles Hellier, Handbook of nondestructive evaluation, 2003.



**POPIS SLIKA**

Slika 2.1. Vizualni pregled zavora pomoću povećala [1].....	10
Slika 2.2. Prikaz pomagala za direktnu vizualnu kontrolu: povećalo(lijevo), zrcalo(desno) [1] .....	11
Slika 2.3. Prikaz boroskopa [2].....	12
Slika 2.4. Prikaz fibroskopa [2].....	12
Slika 2.5. Prikaz videoskopa [2] .....	12
Slika 2.6. Prikaz seta crvenog penetranta, čistača i razvijača u spreju proizvođača Magnaflux [3] ..	13
Slika 2.7. Grafički prikaz koraka pri ispitivanju penetrantima [3].....	15
Slika 2.8. Prikaz elektromagnetnog jarma proizvođača Magnaflux [4].....	16
Slika 2.9. Prikaz stvaranja magnetskog polja pomoću jarma [4] .....	17
Slika 2.10. Prikaz UV lampe proizvođača Magnaflux [4] .....	17
Slika 2.11. Pukotina pronađena ispitivanjem fluorescentnim magnetskim česticama [5].....	18
Slika 2.12. Prikaz tipičnog ultrazvučnog sustava [1].....	21
Slika 3.1. Uzdužna pukotina u sučeljenom zavarenom spoju [5].....	27
Slika 3.2. Poprečna pukotina u zavaru, ZUT-u i osnovnom materijalu [5] .....	28
Slika 3.3. Zvezdasta pukotina u zavaru [5] .....	28
Slika 3.4. Poprečna pukotina u krateru koja se proteže u ZUT [5].....	29
Slika 3.5. Razgranata pukotina u zavaru martenzitnog čelika [5] .....	29
Slika 3.6. Nastajanje toplih pukotina [5].....	30
Slika 3.7. Prikaz toplih pukotina [6] .....	31
Slika 3.8. Primjeri poroznosti u zavarenom spoju [5]; .....	33
Slika 3.9. Primjer uključaka troske u zavarenom spoju [5].....	35
Slika 3.10. Primjer pogrešaka naljepljivanja u zavarenom spoju [5] .....	37
Slika 3.11. Primjeri neprovara zavarenih spojeva; neprovaren korijen (lijevo) i mjestimično provaren korijen X-spoj (desno) [5] .....	38
Slika 4.1. Prikaz zavarenog spoja strojnog dijela MS.20-DI.41.....	41
Slika 4.2. Prikaz defektoskopa proizvođača Nuclear GmbH [7].....	42
Slika 4.3. Radioaktivni izotop Ir192 .....	42
Slika 4.4. Tablica radioaktivnog raspada izotopa Ir192.....	43
Slika 4.5. Daljinski upravljač [7] .....	44
Slika 4.6. Plastična vodilica proizvođača Nuclear GmbH [7].....	44
	66

Slika 4.7. Kolimatori proizvođača Nuclear GmbH [7] .....	45
Slika 4.8. Kutija sa radiogramima gdje je prikazan broj šarže i rok valjanosti.....	45
Slika 4.9. Neeksponirani film izvađen iz vakuum pakiranja.....	46
Slika 4.10. Olovna slova i brojevi za označavanje zavara .....	46
Slika 4.11. Indikatori kvalitete radiograma .....	47
Slika 4.12. Kada za razvijanje filmova [8].....	47
Slika 4.13. Iluminator [9] .....	48
Slika 4.14. Denzitometar [8] .....	48
Slika 4.15. Postavljeni film na zavaru.....	49
Slika 4.16. Prikaz defektoskopa sa spojenim daljinskim upravljačem (dolje) i vodilicom (gore).....	50
Slika 4.17. Postavljeni daljinski upravljač .....	51
Slika 4.18. Vodilica sa kolimatorom prislonjenim uz zavar .....	52
Slika 4.19. Aplikacija i parametri korišteni za izračun vremena ekspozicije.....	53
Slika 4.20. Kada za razvijanje u tamnoj komori tvrtke ZIT d.o.o. ....	55
Slika 4.21. Iluminator i denzitometar.....	56
Slika 4.22. Provjera zacrnjenja radiograma denzitometrom .....	56
Slika 4.23. Radiogram zavara Z67C na lokaciji 0-20 cm .....	57
Slika 4.24. Radiogram zavara Z67C na lokaciji 20-35 cm .....	57
Slika 4.25. Radiogram zavara Z67C na lokaciji 35-55 cm .....	58
Slika 4.26. Radiogram zavara Z67C na lokaciji 50-0 cm .....	58
Slika 5.1. Prikaz crvenog penetranta oznake SKL-WP2.....	59
Slika 5.2. Prikaz čistača oznake SKC-S.....	60
Slika 5.3. Razvijlač oznake SKD-S2 korišten za ispitivanje.....	61
Slika 5.4. Prikaz nanesenog crvenog penetranta na zavar.....	62
Slika 5.5. Razvijlač nakon isteka vremena razvijanja sa prednje strane zavara.....	63
Slika 5.6. Razvijlač nakon isteka vremena razvijanja sa stražnje strane zavara.....	63

## POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Vrste pogrešaka u zavarenim spojevima [5].....	19
---	----

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Diplomski rad bavi se metodama ispitivanja bez razaranja. U radu su opisane neke od osnovnih i najčešće korištenih metoda ispitivanja bez razaranja. Opisane su i pogreške u zavarenim spojevima koje je moguće detektirati ispitivanjima bez razaranja.

U praktičnom dijelu rada zadani strojni dio je ispitan sa dvije nezavisne metode ispitivanja bez razaranja. Zavar Z67C ispitan je radiografijom kao volumenskom metodom i penetrantima kao površinskom metodom. Analizom rezultata ispitivanja pronađene su manje nepravilnosti stoga je zavar ocjenjen prihvatljivim.

ključne riječi: IBR – ispitivanje bez razaranja, nerazorna ispitivanja, pogreške u zavarenim spojevima, vizualni pregled, ispitivanje penetrantima, ispitivanje magnetskim česticama, ultrazvučno ispitivanje, radiografija

## **ABSTRACT AND KEYWORDS**

The thesis deals with non-destructive testing methods. Some of the basic and most commonly used non-destructive testing methods are described. Defects in welded joints that can be detected by non-destructive testing are also described.

In the practical part of the thesis, the given machine part was tested with two independent non-destructive testing methods. Weld Z67C was tested by radiography as a volumetric testing method and by penetrants as a surface testing method. By analyzing the test results, the weld was rated as acceptable.

keywords: NDT – non destructive testing, defects in welded joints, visual inspection, liquid penetrant inspection, magnetic particle inspection, ultrasonic inspection, radiography

## **DODATAK**

1. Izvještaj radiografskog ispitivanja
2. Izvještaj penetrantskog ispitivanja