

Ispitivanje strojnog dijela OT.24-SI.50

Šimunović, Nikolina

Undergraduate thesis / Završni 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:190:961572>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

ISPITIVANJE STROJNOG DIJELA OT.24-SI.50

Rijeka, svibanj 2024.

Nikolina Šimunović

0069083122

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

ISPITIVANJE STROJNOG DIJELA OT.24-SI.50

Mentor: izv. pro. dr. sc. Dario Ilkić

Rijeka, svibanj 2024.

Nikolina Šimunović

0069083122

Ispis iz ISVU

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Rijeka, 15.03.2024.

Zavod: Zavod za inženjerstvo materijala
Predmet: Materijali

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Nikolina Šimunović (0069083122)**
Studij: Stručni prijediplomski studij strojarstva (1050)

Zadatak: **Ispitivanje strojnog dijela OT.24-SI.50 / Testing of workpiece OT.24-SI.50**

Opis zadatka:

Potrebno je proanalizirati postupak ispitivanja strojnog dijela OT.24-SI.50. Potrebno je teorijski opisati odabranu metodu ispitivanja i navesti rizike primjene predložene metode. Nadalje, potrebno je ispitati strojni dio OT.24-SI.50 i opisati opremu za ispitivanje. Potrebno je definirati prednosti i nedostatke predložene metode ispitivanja. Potrebno je proanalizirati rezultate ispitivanja i donijeti 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. Dario Iljkić

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:
izv. prof. dr. sc. Samir Žic

Izjava studentice

Ja, Nikolina Šimunović, studentica završne godine preddiplomskog stručnog studija strojarstva na Tehničkom fakultetu u Rijeci, izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći navedenu literaturu

Nikolina Šimunović

Zahvala

Prvo bih se zahvalila svom mentoru izv. prof. dr. sc. Dariu Iljkiću što je pristao biti moj mentor i na svoj pruženoj pomoći tokom pisanja ovog završnog rada.

Zatim bi se zahvalila svojim roditeljima što su mi omogućili studiranje u drugom gradu i bili velika podrška tokom cijelog studiranja.

Zahvaljujem svojim sestrama, prijateljima i kolegama koji su mi pružili jedno nezaboravno iskustvo tokom studiranja.

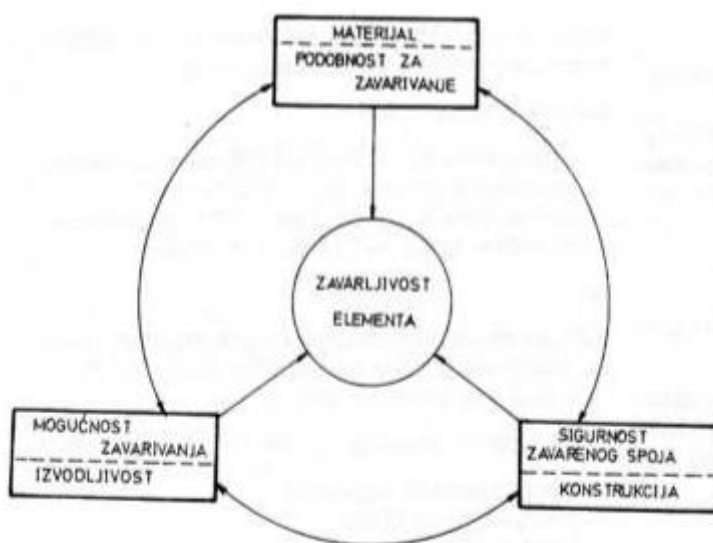
I na kraju se zahvaljujem svome suprugu koji me gurao naprijed i uvijek bio velika podrška.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. METODE KONTROLE BEZ RAZARANJA	3
2.1. Radiografsko ispitivanje	16
2.1.1. Ispitivanje rendgenskim „X“ zrakama	17
2.1.2. Ispitivanje gama (γ) zrakama	19
2.1.3. Ispitivanje betatronima i linearnim akceleratorima.....	19
2.2. Ispitivanje ultrazvukom (metoda prozvučivanja)	19
2.3. Ispitivanje magnetskim i elektromagnetskim (induktivnim) metodama	21
2.4. Penetrantsko ispitivanje.....	24
2.5. Ispitivanje vrtložnim strujama.....	26
2.6. Vizualno ispitivanje uz pomoć pomagala (povećalo, endoskop).	27
3. OSOBLJE KOJE PROVODI ISPITIVANJE	29
4. POUZDANOST METODE KONTROLE BEZ RAZARANJA	31
4.1. Osjetljivost metoda kontrole bez razaranja	31
4.2. Vjerojatnost detekcije greške i interpretacije rezultata.....	32
5. ISPITIVANJE DIJELA OT.24-SI.50	35
5.1. Radiografsko ispitivanje	35
5.2. Ispitivanje tekućim penetrantima	40
6. ZAKLJUČAK.....	43
7. LITERATURA.....	45
POPIS SLIKA.....	48
POPIS TABLICA	49
SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	50
SUMMARY AND KEYWORDS.....	51

1. UVOD

Zavarivanje je postupak spajanja dva ili više, istorodnih ili raznorodnih materijala postupkom taljenja ili pod pritiskom uz ili bez dodavanja dodatnog materijala uslijed čega nastaje homogeni zavareni spoj [1]. Pod zavarivanje se smatra i spajanje metala pritiskom bez dovođenja topline – postupak hladnog vrenja. Zavarivanje spada među najprikladnije načine spajanja dijelova metalne konstrukcije jer su ovi spojevi u odnosu na lijevane ili kovane i do 50% lakši, ali imaju jednaku čvrstoću i krutost, a oblikovanje je jednostavnije [2]. Konstrukcijske metale karakteriziraju određena kemijska, mehanička, tehnološka i fizikalna svojstva (npr. gustoća, temperatura taljenja, električna i toplinska vodljivost). Među važnijim tehnološkim svojstvima spada obradivost materijala, žilavost, kovnost i zavarljivost. Sposobnost materijala da uz osiguranje određenih uvjeta zavarivanja osigura kontinuirani zavareni spoj naziva se zavarljivost te svojim svojstvima zadovoljava predviđene uvjete i vijek eksploatacije [1]. Pri tome valja naglasiti kako je zavarljivost komparativno svojstvo a obzirom da se uspoređuje više vrsta materijala uz primjenu tehnologija zavarivanja koje mogu biti različite. Kod zavarljivost, materijal, konstrukcija i tehnologija su međusobno ovisni [3]. Slika 1.1. prikazuje povezanost faktora utjecaja o kojima ovisi zavarljivost materijala.



Slika 1.1. Utjecajni čimbenici na zavarljivost i njihova međusobna ovisnost [4]

Kvaliteta zavarenog spoja se iskazuje uspoređivanjem svojstava osnovnog materijala koji je prošao postupak zavarivanja i zavarenog spoja te na tom mjestu se pojavljuje razlika u svojstvima ta dva materijala. Što je zavarljivost manja, razlika u svojstvima je veća. Prema ISO 581 standardu, neki materijal se smatra zavarljivim određenim postupkom kada se metalni kontinuitet može postići zavarivanjem primjenom odgovarajućeg postupka zavarivanja, a zavar mora imati svojstva

koja zadovoljavaju metalurške i mehaničke zahtjeve te je u stanju podnijeti utjecaj na konstrukciju s kojom čini sastavni dio [5]. Ovisno o svom kemijskom sastavu, svaki metal ima svoju namjenu, te prema Međunarodnoj organizaciji za normizaciju (eng. *International Organization for Standardization*), materijal određene namjene je zavarljiv nekim postupkom zavarivanja ukoliko je moguće postići homogenost spoja. Homogenost spoja se smatra narušenom ukoliko se pojave pukotine, nemetalni uključci i poroznost. Zavarljivost se može ocjenjivati kvalitativnom (zadovoljava ili ne zadovoljava) i kvantitativnom metodom (u datim okolnostima postoji dovoljno podataka o svojstvima zavarenog spoja i svojstvima osnovnog materijala koji su dobiveni eksperimentalno u odnosu na dominantni otkaz zavarenog spoja) [1] ili jednadžbama za ekvivalent ugljik na temelju udjela ugljika i legirnih elemenata u kemijskom sastavu materijala. Zavarljivost materijala najviše ovisi o njegovom kemijskom sastavu, primjesama, veličini zrna, prethodno primijenjenoj toplinskoj obradi, veličini i obliku komada, konstrukciji koja se izrađuje.

Kao jedan od mogućih načina definiranja kvalitete zavarenog spoja ili zavarljivosti materijala jest veličina razlike svojstava osnovnog materijala i zavarenog spoja. Do smanjenja zavarljivosti nekog materijala dolazi uslijed povećanja debljine osnovnog materijala i povećanja složenosti konstrukcije [3]. S obzirom da postoji mnoštvo faktora koji imaju utjecaj na zavarljivost materijala, ne postoji jedinstvena definicija zavarljivosti. Slijedom takvih okolnosti provodi se niz aktivnosti koje će osigurati kvalitetnu tehnologiju zavarivanja koja će proizvesti kvalitetan i pouzdan spoj u predviđenim uvjetima i eksploataciji. Prilikom ispitivanja zavarljivosti nekog materijala, radi postizanja ujednačenosti kvalitete, standardom su propisane osnovne aktivnosti, odnosno ispitivanje sklonosti različitim vrstama pukotina, transformacijskom otvrdnjavanju, smanjenju žilavosti i slično. Kvaliteta zavarenog spoja uvjetovana je čitavim nizom čimbenika te je nužno nakon završetka zavarivanja, provjeriti homogenost i kvalitetu zavarenog spoja [6].

Provjera zavarenog spoja se može vršiti razornom i nerazornom metodom. Metode bez razaranja (dalje KBR) koje se danas koriste i propisani standardi daju zadovoljavajuće rezultate u pogledu kvalitete, najčešće se primjenjuju KBR. Za potrebe ovog rada, izvršena je kontrola zavarenog spoja OT.24-SI.50 radi utvrđivanja homogenosti. Korištena je radiografska metoda upotrebom X zraka i ispitivanje penetrantima.

2. METODE KONTROLE BEZ RAZARANJA

Kontrola bez razaranja (KBR) ili defektoskopija (eng. *Nondestructive testing* – NDT) je skup metoda utemeljen na principima fizike kako bi se utvrdila svojstva materijala ili komponenata sustava te otkrivanje različitih vrsta grešaka pri čemu se ne utječe na funkcionalnost ispitivanog materijala. Na ovaj način se utvrđuje kvaliteta i usklađenost osnovnog materijala i zavarenih spojeva sa zahtjevima tehničkih specifikacija i standarda. Kontrola zavara se provodi radi smanjenja vjerojatnosti oštećenja postrojenja na dopuštenu razinu uz minimalne troškove, a čije posljedice mogu imati daleko veće posljedice u vidu ljudskih žrtava, direktnih i indirektnih materijalnih gubitaka, zagađenje okoliša. Pri izradi zavarenih spojeva, pogreške mogu nastati tijekom izrade i tijekom eksploatacije. Tijekom izrade zavarenih spojeva, greške se mogu podijeliti s obzirom na nekoliko kriterija [7]:

- Uzrok nastajanja
 - Konstrukcijske greške – nastaju zbog lošeg konstrukcijskog oblikovanja zavarene konstrukcije (npr. zavarivanje u skućenom prostoru, loše oblikovani detalji)
 - Metalurške greške – vezane su uz metalurške, termodinamičke i hidrodinamičke pojave koje prate proces taljenja materijala, kristalizacije i hlađenja zavarenog spoja (pukotine, pore, uključci, troska, prezakaljena struktura)
 - Tehnološke greške – posljedica loše tehnologije zavarivanja ili da se propisana tehnologija zavarivanja ne provodi u potpunosti (zajedi, naljepljivanje, nedostatak provara, prokapljivanje i sl.)
- Vrsta greške
 - Plinski uključci
 - Učljučci u čvrstom stanju
 - Naljepljivanje
 - Nedostatak provara
 - Pukotine
 - Greške oblika i dimenzija
- Prema položaju
 - Unutarnje greške
 - Površinske i podpovršinske greške
 - Greške po cijelom presjeku
- Prema veličini
 - Male greške
 - Greške srednje veličine
 - Velike greške

- Prema položaju
- Kompaktne greške
 - Izdužene greške
 - Oštre greške (jako izraženo zarezno djelovanje)
 - Zaobljene greške (manje izraženo zarezno djelovanje)
 - Ravninske greške (može se zanemariti treća dimenzija)
 - Prostorne greške (u obzir se uzimaju sve tri dimenzije)
- Prema brojnosti
- Pojedinačne greške
 - Učestale greške
 - Gnijezdo grešaka

Osim gore navedene podjele, pogreške koje nastaju pri zavarivanju grubo se mogu podijeliti i u tri osnovne skupine [8]:

1. Loša mehanička svojstva kao čvrstoća, niska ili previsoka tvrdoća ili u vidu niske ili previsoke granice tečenja, niska žilavost, mala istezljivost, nedovoljna otpornost na koroziju.
2. Površinske greške: loša priprema zavarenog spoja, neispravne veličine zavara i oblika, odstupanje u dimenzijama uslijed deformacija, površinska nehomogenost (izdužene i zaobljene greške)
3. Unutarnje greške: nemetalni uključci, nedovoljan provar, poroznost, pukotine, nepotpuno staljivanje.

Prema normi HRN EN ISO 6520-1:2008, pogreške u zavarenim spojevima dijele se u šest osnovnih grupa koje su prikazane u tablici 2.1

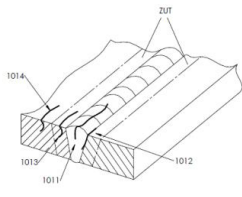
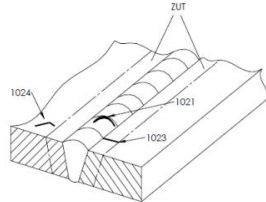
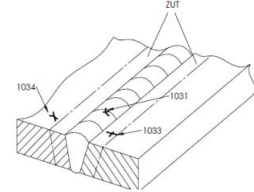
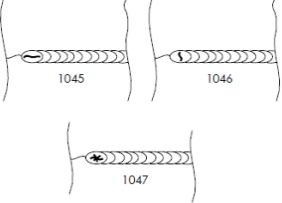
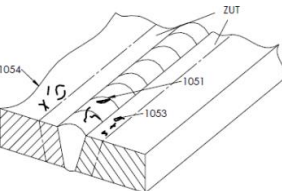
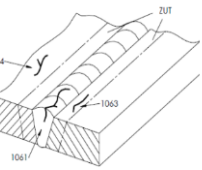
Tablica 2.1. Razredba nepravilnosti u zavarenim spojevima [9]

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

Pukotine predstavljaju najopasnije greške prilikom izrade zavarenih konstrukcija, a riječ je o nepravilnostima koje nastaju lokalnim lomom u čvrstom stanju, a mogu nastati zbog učinaka hlađenja ili naprezanja. Nastankom pukotina dolazi do smanjenja čvrstoće i smanjenja presjeka zavarenog spoja te su samo uvjetno dopuštene. Pukotine nastaju uslijed hlađenja zavarenog spoja

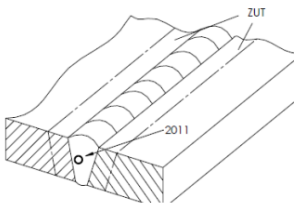
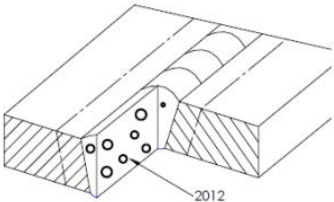
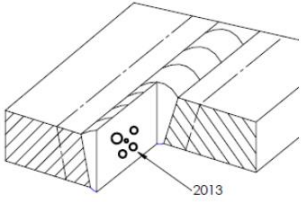
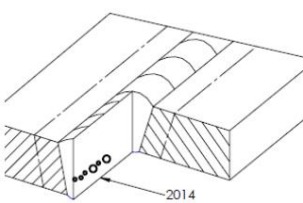
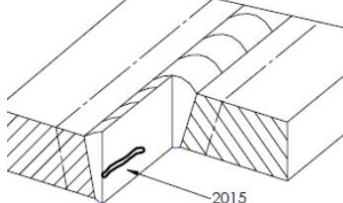
te dodatnih naprezanja uslijed djelovanja naprezanja zbog topline koja se unosi tijekom zavarivanja. Tijekom izrade zavarenih spojeva najčešće se pojavljuju hladne pukotine [10]. U slijedećoj tablici prikazane su pukotine u zavarenom spoju klasificirane prema HRN EN ISO 6520-1:2008.

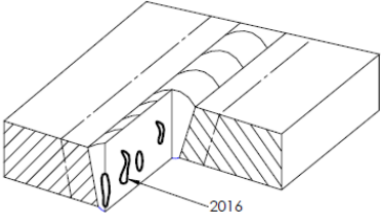
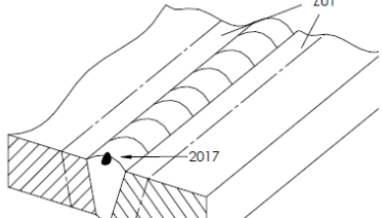
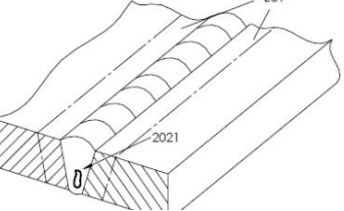
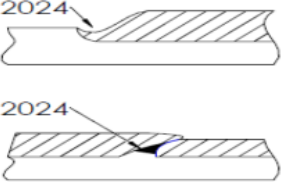
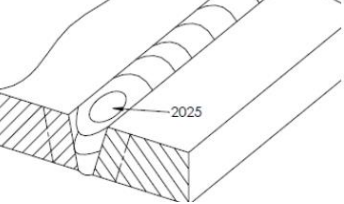
Tablica 2.2. Klasifikacija pukotina prema HRN EN ISO 6520-1:2008. [9]

Referentni broj	Opis i objašnjenje	Ilustracija
100	Pukotina	
1001	Mikropukotina – vidljiva samo pod mikroskopom	
101 1011 1012 1013 1014	Uzdužna pukotina Može se nalaziti: u metalu zavara, u zoni staljivanja, u zoni utjecaja topline (ZUT) i u osnovnom materijalu	
102 1021 1023 1024	Poprečna pukotina Može se nalaziti u metalu zavara u zoni utjecaja topline u osnovnom materijalu	
103 1031 1033 1034	Zrakaste pukotine Može se nalaziti: u metalu zavara u zoni utjecaja topline u osnovnom materijalu	
104 1045 1046 1047	Kraterska pukotina uzdužna poprečna zrakasta (zvjezdasta)	
105 1051 1053 1054	Skupina nepovezanih pukotina Može se nalaziti u metalu zavara u zoni utjecaja topline u osnovnom materijalu	
106 1061 1063 1064	Razgranata pukotina Može se nalaziti u metalu zavara u zoni utjecaja topline u osnovnom materijalu	

Poroznost nastaje uslijed šupljina unutar zavara koje su ispunjene plinom. Nastaju uslijed zaostalog plina u zavaru ili kao posljedica nečistoća na površini i lošeg zavarivanja. U šupljinama zaostaju zarobljeni plinovi, najčešće je riječ o dušiku i vodik u s obzirom da ta dva plina imaju manju topivost u čvrstom materijalu nego u rastaljenom. Šupljine imaju različit utjecaj na čvrstoću zavarenog spoja. Kao glavni uzroci poroznosti u zavarenom spoju su ulje, korozija, boja na mjestu zavara, vremenski uvjeti kao jak vjetar ili prisutnog vlage tijekom hladnijeg vremena, potom vlaga u dodatnom materijalu, loša zaštita procesa zavarivanja, krivi parametri za izvođenje zavarivanja (velika brzina, prevelika duljina luka) [11]. Greške poroznosti su prikazane detaljno u tablici 2.3.

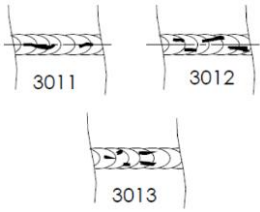
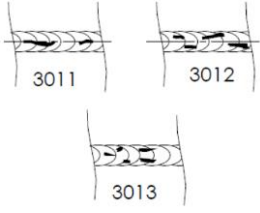
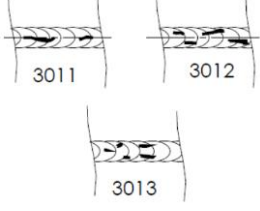
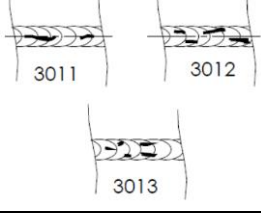
Tablica 2.3. Klasifikacija šupljina prema HRN EN ISO 6520-1:2008. [9]

Referentni broj	Opis i objašnjenje	Ilustracija
200	Šupljine	
201	Plinski uključak – šupljina nastala uslijed zarobljenosti plina	
2011	Plinska pora – plinom prouzročena šupljina sfernog oblika	
2012	Jednoliko raspodijeljena poroznost – brojne plinske pore jednoliko raspodijeljene u metalu zavara, nisu isto što i pore u nizu	
2013	Gnijezdo pora – skupina plinskih pora slučajne geometrijske raspodjele	
2014	Pore u nizu – niz plinskih pora smještenih usporedno s osi zavara	
2015	Izduljena šupljina – velika, nesferna šupljina čija veća dimenzija je približno usporedna s osi zavara	

2016	<p>Crvolika pora – prouzročena je izlaskom plina, a oblik i položaj je određen načinom skrućivanja i izvorima plina. Nalaze se u gnijezdima i raspoređuju se u obliku riblje kosti</p>	
2017	<p>Površinska pora – plinska pora nastala na površini zavara</p>	
2018	<p>Površinska poroznost – pojedine ili višestruke šupljine uzrokovane plinom na površini zavara</p>	
202	<p>Šupljina (lunker) prouzročen skupljanjem – šupljina nastala skupljanjem tijekom skrućivanja zavara</p>	
2021	<p>Međudendritska makrošupljina – izdužena šupljina prouzročena skupljanjem koja može zadržavati zarobljeni plin, nastala između dendrita tijekom hlađenja. Obično je okomito na lice zavara.</p>	
2024	<p>Kratersko udubljenje – udubljenje zbog skupljanja na završetku prolaza zavara koje nije uklonjeno prije ili tijekom izvođenja slijedećeg prolaza</p>	
2025	<p>Udubljenje u završnom krateru – udubljenje u otvorenom krateru koje smanjuje poprečni presjek zavara</p>	
203	<p>Mikrošupljina prouzročena skupljanjem – šupljina nastala skupljanjem, vidljiva samo mikroskopom</p>	
2031	<p>Međudendritska mikrošupljina – izduljena šupljina nastala tijekom hlađenja uzduž granice zrna između dendrita</p>	
2032	<p>Transkristalna šupljina – izduljena šupljina nastala mikroskupljanjem tijekom skrućivanja koja presijeca zrna</p>	

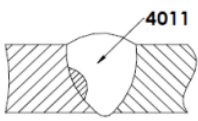
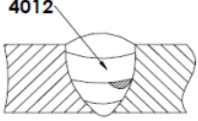
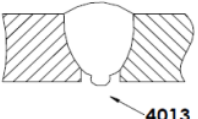
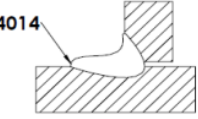
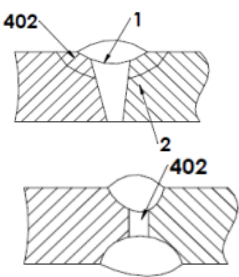
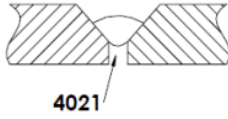
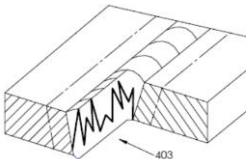
Čvrsti uključci su kruta strana tijela zarobljena u metalu zavara pri čemu mogu biti uključci troske (u nizu, pojedinačni, u obliku gnijezda), uključci oksida, oksidna prevlaka, metalni uključak (volfram, bakar, ostali metali). Uključci troske proizlaze iz pogrešne tehnike zavarivanja, nepravilnog pristupa spoju ili oboje. Oštri zarezni na granicama spojeva ili između prolaza zavara potiču zadržavanje troske. S pravilnom tehnikom, uključci troske se dižu na površinu rastaljenog metala zavara. Uključci volframa su čestice volframa zarobljene u metalu zavara nanesenog TIG postupkom. Umakanje volframove elektrode u rastaljeni metal zavara ili korištenje prejake struje koja topi volfram može uzrokovati inkluzije [12]. Uključci, neovisno kojeg su podrijetla, isto kao i šupljine imaju negativan utjecaj na čvrstoću zavara jer na tim mjestima je povećana koncentracija naprezanja. Uključci pri zavarivanju uglavnom nastaju radi neodgovarajućih parametara zavarivanja, slabo očišćene troske tijekom prijašnjih prolaza ili uslijed neispravne tehnike rada. U tablici 2.4. prikazani su čvrsti uključci u zavarenim spojevima.

Tablica 2.4. Klasifikacija čvrstih uključaka prema HRN EN ISO 6520-1:2008. [9]

Referentni broj	Opis i objašnjenje	Ilustracija
300	Čvrsti uključci -kruta strana tvar zarobljena u metalu zavara	
301 3011 3012 3013	Uključak troske Uključci troske mogu biti - u nizu - pojedinačni - u obliku gnijezda	
302 3021 3022 3023	Uključak praška Uključci praška mogu biti - u nizu - pojedinačni - u obliku gnijezda	
303 3031 3032 3033	Uključak oksida Oksidni uključak može biti - u nizu - pojedinačni - u obliku gnijezda	
304 3041 3042 3043	Metalni uključak Metalni uključci mogu biti - u nizu - pojedinačni - u obliku gnijezda	


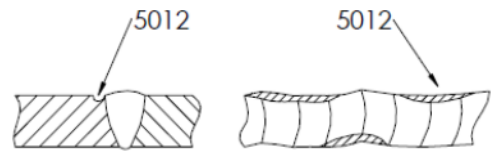
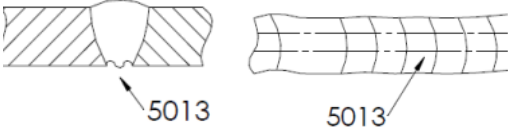
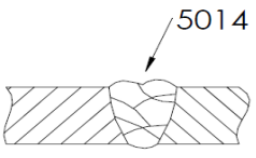
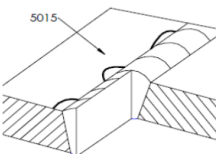
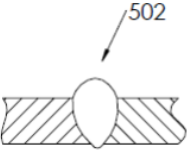
Nedostatci spajanja i nepotpune penetracije predstavljaju dvije podgrupacije grešaka. Nedostatak spajanja nastaje uslijed nedovoljne veze između metala zavara i osnovnog materijala ili između slojeva metala zavara. Mogu nastati uslijed nedostatka spajanja na bočnim stjenkama, između slojeva zavara, nedostatak spajanja u korijenu ili mikronedostatak spajanja. Nepotpuna penetracija nastaje uslijed razlike između stvarne i nominalne penetracije. Po vrsti može biti nepotpuna penetracija korijena ili zupčasti provar. Među opasne pogreške, posebice kod konstrukcija koje imaju dinamičko opterećenje su pogreške nedovoljnog provara i pogreške naljepljivanja. Glavni uzroci pojave ova dva tipa pogreški su kriva tehnika rada (pogrešan nagib pištolja i elektrone), prevelika brzina zavarivanja, premala jakost struje, prisutnost nečistoća na površini materijala. U slijedećoj tablici prikazana je klasifikacija grešaka nastalih nedovoljnim spajanjem i nepotpunom penetracijom.

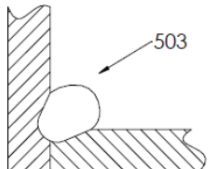
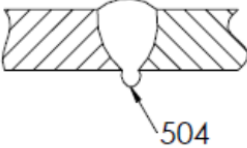
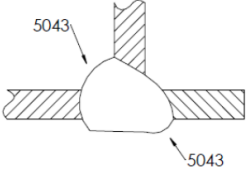
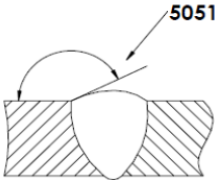
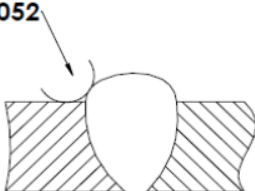
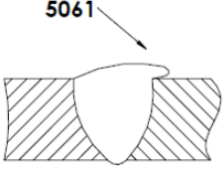
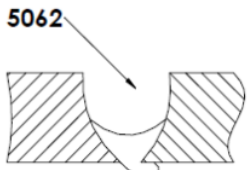
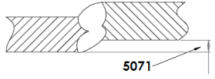
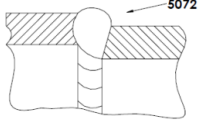
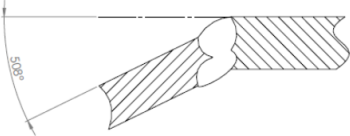
Tablica 2.5. Klasifikacija grešaka uslijed nedovoljnog spajanja i nepotpune penetracije prema HRN EN ISO 6520-1:2008. [9]

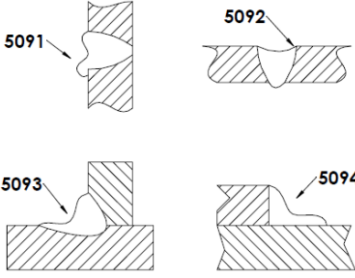
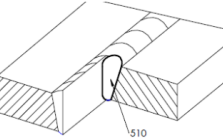
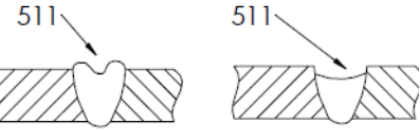
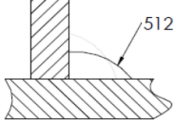
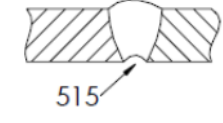
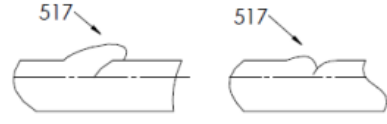
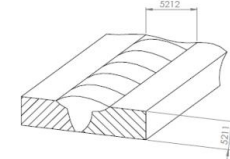
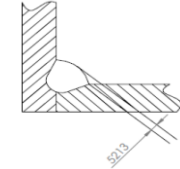
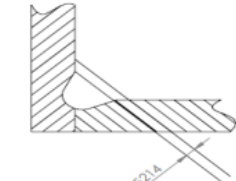
Referentni broj	Opis i objašnjenje	Ilustracija
400	Nedostatak spajanja i nepotpuna penetracija	
401	Nedostatak spajanja – nedovoljna veza između metala zavara i osnovnog materijala ili između slojeva metala zavara. Može biti:	
4011	- nedostatak spajanja na bočnim stjenkama	
4012	- nedostatak spajanja između slojeva zavara	
4013	- nedostatak spajanja u korijenu	
4014	- mikronedostatak spajanja	
402	Nepotpuna penetracija	
4021	Nepotpuna penetracija korijena	
403	Zupčasti provar	

Nepravilnosti oblika čini petu skupinu grešaka koja se očituje u nepravilnom obliku i dimenzijama kao što je nepravilan oblik, zajed, višak metala zavara, preveliko ispupčenje, prevelika penetracija, preklop, linearna smaknutost, kutna smaknutost, prekomjerna zakrivljenost, utonuće zavara, progaranje, nedovoljna popunjenost žlijeba, nepravilna širina zavara, udubljenost korijena, prekomjerna asimetrija kutnog zavara, nepravilna površina zavara, poroznost korijena, loš nastavak, nepravilne dimenzije zavara.

Tablica 2.6. Klasifikacija pogrešaka oblika zavara prema HRN EN ISO 6520-1:2008. [9]

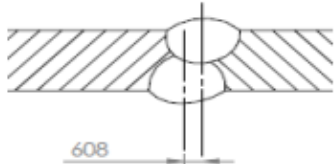
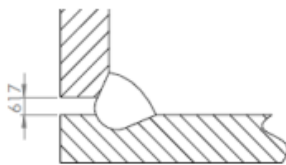
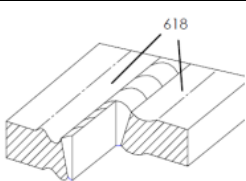
Referentni broj	Opis i objašnjenje	Ilustracija
500	Nepravilan oblik vanjskih površina ili geometrijskog oblika spoja	
501	Zajed, ugorine u zavaru – rubni zajed u osnovnom materijalu ili prethodno nanesenome metalu zavara	
5011	Kontinuirani zajed – zajed znatne duljine bez prekida	
5012	Isprekidani zajed – zajed male duljine, mjestimično uzduž zavara	
5013	Zajed zbog skupljanja u korijenu	
5014	Zajed između prolaza	
5015	Lokalni isprekidani zajed – kratki zajedi nepravilno raspoređeni na strani ili na površini prolaza	
502	Višak metala zavara – preveliko nadvišenje lica sučeonog zavara	

<p>503</p>	<p>Preveliko ispupčenje – preveliko ispupčenje kutnog zavora</p>	
<p>504 5041 5042</p>	<p>Prevelika penetracija – višak materijala je prošao kroz korijen zavora. Može biti: - lokalna prevelika penetracija - kontinuirana prevelika penetracija</p>	
<p>5043</p>	<p>Prokapljina</p>	
<p>505 5051 5052</p>	<p>Nepravilan prijelaz zavora – premali kut između ravnine osnovnog materijala i ravnine koja tangira površinu zavora na rubu lica zavora Nepravilan kut na rubu lica zavora – premalen kut između ravnine osnovnog materijala i ravnine koja tangira površinu zavora na rubu lica zavora Nepravilan polumjer ruba lica zavora – premali polumjer ruba lica zavora</p>	 
<p>506 5061 5062</p>	<p>Preklop – prekomjerni metal zavora koji prekriva površinu osnovnog materijala, ali nije s njim staljen. Može biti_ - preklop na licu zavora - preklop u korijenu zavora</p>	 
<p>507</p>	<p>Linearna smaknutost – smaknutost između dva zavarena komada. Može biti: - linearna smaknutost između ploča - linearna smaknutost između cijevi</p>	 
<p>508</p>	<p>Kutna smaknutost</p>	

<p>509</p> <p>5091 5092 5093 5094</p>	<p>Utonuće zavara uslijed gravitacije. Može biti:</p> <ul style="list-style-type: none"> - utonuće u zidnom ležaju - utonuće u vodoravnom ili nadlgavnom položaju - utonuće u kutnom zavaru - utonuće zbog taljenja na rubu zavara 	
<p>510</p>	<p>Progaranje</p>	
<p>5011</p>	<p>Nedovoljna popunjenost žlijeba</p>	
<p>512</p>	<p>Prekomjerna asimetrija kutnog zavara</p>	
<p>513</p>	<p>Neppravilna širina zavara</p>	
<p>514</p>	<p>Neppravilna površina zavara</p>	
<p>515</p>	<p>Udubljenost korijena</p>	
<p>516</p>	<p>Poroznost korijena</p>	
<p>517</p>	<p>Loš nastavak</p>	
<p>520</p>	<p>Prekomjerna iskrivljenost</p>	
<p>521</p>	<p>Neppravilne dimenzije zavara</p>	
<p>5211</p>	<p>Prekomjerna debljina zavara</p>	
<p>5212</p>	<p>Prekomjerna širina zavara</p>	
<p>5213</p>	<p>Nedovoljna debljina kutnog zavara</p>	
<p>5214</p>	<p>Prekomjerna debljina kutnog zavara</p>	

Posljednja skupina grešaka u kategoriji ostalih nepravilnosti su oštećenja električnim lukom, prskanje kapljica metala, površinska oštećenja, trag od brušenja i prekomjerno brušenje, trag od dijeta, , nepravilan pripojni zavar, promjena boja, smaknutost dvostrano izvedenog zavara, izgorena površina, ostatak praška, ostatak troske, nepravilan razmak u korijenu iznad kutnih zavara, nabiranje [9]. U tablici u nastavku su prikazane su ostale nepravilnosti kako su klasificirane normom.

Tablica 2.7. Klasifikacija ostalih pogrešaka prema HRN EN ISO 6520-1:2008. [9]

Referentni broj	Opis i objašnjenje	Ilustracija
600	Ostale nepravilnosti	
601	Oštećenje električnim lukom	
602	Prskanje kapljica metala	
6021	Prskanje volframom	
603	Površinsko oštećenje	
604	Trag od brušenja	
605	Trag od dijeta	
606	Prekomjerno brušenje	
607 6071 6072	Nepravilan pripojni zavar - prekid prolaza ili nedostatak penetracije - zavar izveden preko nepravilnog pripoja	
608	Smaknutost dvostrano izvedenog zavara	
610	Promjena boja Obojenost	
613	Izgorena površina (okuina)	
614	Ostatak praška	
615	Ostatak troske	
617	Nepravilan razmak u korijenu kod kutnog zavara	
618	Nabiranje	

U tablici 2.8. prikazane su metode i postupci za provjeru nepravilnosti u zavarenim spojevima.

Tablica 2.8. Metode ispitivanja nepravilnosti u zavarenim spojevima [8]

Greška	Metoda ispitivanja
Loša mehanička svojstva	Kontrola postupcima razaranja uz primjenu standardnih proba i postupaka
Površinske greške	Kontrola postupcima bez razaranja: vizualna, magnetska, kontrola penetrantima
Unutarnje greške	Kontrola postupcima bez razaranja: ultrazvučna, radiografska kontrola

Metoda kontrole postupcima bez i sa razaranjem imaju svojih prednosti i nedostataka, a obje služe za osiguranje potrebne kvalitete proizvoda. Uspoređujući metodu s razaranjem i metodu bez razaranja, u tablici 2.9. su prikazane osnovne prednosti i nedostaci metode bez razaranja.

Tablica 2.9. Prednosti i nedostaci metoda nerazornog ispitivanja [13]

Prednosti	Nedostaci
Ispitivanje je moguće provesti izravno na proizvodu ili konstrukciji	Mjerenje svojstava i kvalitete objekata mjeri se indirektno te se o kvaliteti zaključuje na osnovu toga što ne postoje pogreške ili odstupanja unaprijed zadanih fizikalnih veličina izvan zadanih parametara kvalitete.
Moguće je provoditi 100% kontrolu	Određene metode iziskuju pojačano korištenje sredstava i materijala zaštite na radu.
Uzorak za ispitivanje je reprezentativan	Oprema je uvozna i skupa
Ispitivanje objekta je moguće pomoću više metoda i više puta.	Interpretacija rezultata često je složena te zahtijeva školovano osoblje
Tijekom eksploatacije objekta moguće je provoditi kontrolu.	
Kontrolu je moguće provoditi često i bez zaustavljanja proizvodnje	
Praćenje kumulativnog učinka grešaka ili radnih uvjeta na stanje objekta je moguće pratiti	
Praćenje pojave ili širenja loma je moguće i time se omogućava stjecanje iskustva o konstrukciji te razrada kriterija kvalitete kao i određivanje lomne žilavosti materijala.	
Većina opreme je prijenosnog tipa i moguć je rad na terenu	

Metode kontrole bez razaranja koje se najčešće koriste su [6]:

- Radiografija – ispitivanje korištenjem ionizirajućeg zračenja
- Ispitivanje ultrazvukom
- Ispitivanje magnetskim česticama
- Ispitivanje tekućim penetrantima
- Ispitivanje vrtložnim strujama

- Vizualno ispitivanje uz pomoć pomagala (povećalo, endoskop).

Kontrola metodom bez razaranja otkrivaju se podpovršinske pogreške u zavarenim spojevima. U tablici 2.10. prikazane su mogućnosti primjene svake od gore navedenih metoda u odnosu na skupine pogrešaka koje se mogu detektirati, a sve u skladu s normom HRN EN ISO 6520-1:1999.

Tablica 2.10. Mogućnost primjene metoda bez razaranja za otkrivanje pogrešaka zavara [10, p. 90]

Vrsta pogreške		Ispitivanje bez razaranja				
		Vizualna kontrola	Prozračivanje	Prozvučivanje	Magnetska	Penetrantska
Pukotine	Manje površinske	(+)	-	(+)	+	+
	Veće površinske	+	(+)	+	+	
	Potpovršinske	-	(+)	+	(+)	-
Poroznost	Površinska	+	+	(-)	+	(+)
	U zavaru	-	+	+	-	-
Čvrsti ključci		-	+	+	-	-
Naljepljivanje		-	-	+	-	-
Nedovoljan provar	Vanjski	+	+	(+)	+	+
	U zavaru	-	+	+	(-)	-
Pogreške oblika		+	(-)	(-)	-	-
Ostale pogreške		+	-	-	(-)	(-)

Pojašnjenje simbola: + dobra mogućnost određivanja; (+) uvjetovana mogućnost; (-) ograničena i nelogična primjena; - neprimjenjivost metode

Da bi proces osiguranja pouzdanosti rezultata kontrole kvalitete bio djelotvoran potrebno je definirati slijedeće elemente [13]:

1. Kriterij kvalitete ili prihvatljivosti (ukoliko se radi o ispitivanju kriterija prihvatljivosti, proračunavaju se parametri kritične pogreške odnosno mjerljivih pokazatelja postignute kvalitete, a kod kriterija kvalitete pretežno se oslanja na iskustvo)
2. Postupak kontrole – na temelju kvalitete ili kriterija prihvatljivosti te u skladu s tehničkom dokumentacijom definira se metoda kontrole.
3. Program kontrole – s obzirom na kriterije kvalitete i kriterij prihvatljivosti, propisan postupak kontrole i tehničku dokumentaciju, definira se postupak provođenja kontrole.
4. Procjenu prihvatljivosti – na temelju kriterija kvalitete ili prihvatljivosti definira se prihvatljivost objekta koji se ispituje.
5. Tehniku ispitivanja – propisuje način pripreme objekta i sustava za ispitivanje na osnovu prethodno propisanih metoda i obujma kontrole kao i pozicija koje se kontroliraju.

6. Interpretacija rezultata – s obzirom na primijenjene metode i tehnike kontrole, opreme i referentnih normi, opisan je način na koji se obrađuju rezultati ispitivanja te sadržaj izvještaja o mjerenju i ispitivanju kao i izvješća o rezultatima kontrole.
7. Specifikacija opreme – opisani su potrebni uređaji, etaloni, referentni uzorci i pribor koji su prethodno definirani u postupku kontrole i programu kontrole kvalitete.
8. Provjera opreme – opisuje postupak provjere parametara opreme kojom se vrši provjera te je uključena u sustav kontrole kvalitete ili preko normi za karakterizaciju sustava.

S obzirom da je za potrebe ovog rada vršena kontrola zavarenog spoja radiografijom i tekućim penetrantima, samo će te dvije metode biti detaljno opisane.

2.1. Radiografsko ispitivanje

Radiografija, kontrola radiografijom ili radiografsko ispitivanje spada u nerazornu metodu ispitivanja kvalitete zavarenog spoja u kojem se koristi ionizirajuće zračenje. Ionizirajuća elektromagnetska zračenja X i γ se koriste za dobivanje slike na mediju (radiogramu) koja prikazuje unutrašnjost zavarenih spojeva. Na ovaj način moguće je otkriti eventualno prisutne greške zavarenih spojeva kao što su uključci troske, poroznost, neprovareni korijen, pukotine i slično. Radiografija jako dobro otkriva volumenske – trodimenzionalne greške zavarenih spojeva, ali dosta teže one plošne kao što su pukotine, greške vezanja. Samo pukotine koje su položene u smjeru zračenja daju indicaciju na radiogramu, dok one okomite ili kose nisu vidljive jer ne predstavljaju razliku u debljini. S obzirom da ultrazvuk dobro otkriva plošne greške, radiografija se obično smatra komplementarnom metodom nerazornog ispitivanja s ultrazvukom, a jedna drugu ne mogu zamijeniti. Na slici 2.1. je prikazan zapis radiografskog snimanja zavarenog spoja.



Slika 2.1. Radiografska snimka mjesta zavarenog spoja cijevi i postupak ispitivanja radiografijom [14]

Kako ionizirajuće zračenje može uzrokovati neželjene i štetne posljedice po ljudsko zdravlje i ostali živi svijet, potrebno je prilikom provođenja ispitivanja radiografijom koristiti zaštitne mjere za osobu koja rukuje izvorom, ali i za okolinu. Količina energije koja se apsorbira se mjeri kao ekvivalent doza koja u sebi sadržava različite korekcijske faktore. Jedinica ekvivalent doze za biološki učinak je jedan svert ($Sv=J/kg$). Prema važećim zakonima o radu i zaštiti na radu, maksimalno dozvoljena godišnja doza zračenja iznosi 20 mSv [15]. Mjerenje se vrši različitim dozimetrima, kao što je osobni dozimeter pomoću kojeg se ocjenjuje primljena godišnja količina zračenja. Osobe koje provode radiografsko ispitivanje zavarenog spoja moraju bit educirane, aktivno provoditi mjere pri radu s ionizirajućim zračenjem kao i pri transportu i skladištenju radioaktivnih materijala.

Snimanje radiograma se vrši tako da se film prisloni na stjenku uzorka na način da on bude prslonjen na suprotnu stranu od mjesta ulaza zračenja. Prilikom ocjenjivanja radiograma, prije nego se uoče greške zavara, provjerava se kvaliteta snimljenog filma. Provjeravaju se slijedeće komponente:

- Zacrtnjenje – mjerenje se vrši densitometrom i ono se mora kretati između 1,5 do 4,0.
- Kontrast slike
- Neoštrina slike – unutrašnja (ovisi o primijenjenim folijama i zrnatosti filma) i geometrijska (što je manja udaljenost predmeta od filma, što je veća udaljenost fokus-film te što je manji fokus, odnosno promjer izvora zračenja, to će geometrijska neoštrina biti manja).

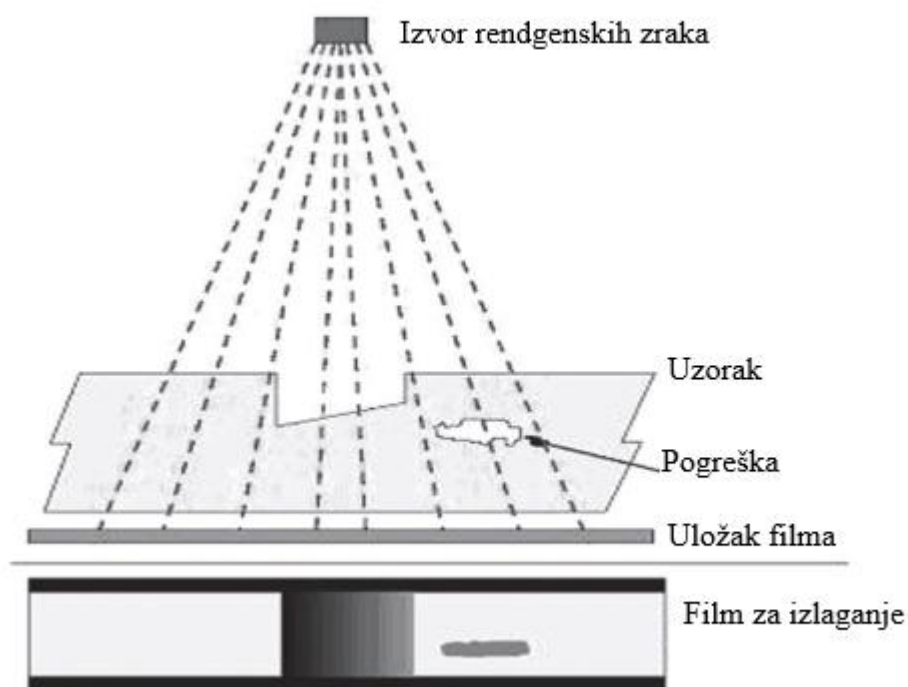
Radiografijom se dobije projekcija zavarenog spoja u jednoj dimenziji, a spoj s eventualnim greškama je u tri dimenzije, ponekad se snimanje vrši iz različitih kutova kako bi se osiguralo što više projekcija koje će omogućiti detekciju grešaka.

Gledajući u globalu, radiografija i ultrazvuk spadaju u volumne metode ispitivanja i upotrebljavaju se za otkrivanje nepravilnosti u materijali i nisu otvorene prema površini. Niti jedna od te dvije metode nije ograničenja na otkrivanje specifičnih volumnih nepravilnosti, ali radiografija pokazuje veću sposobnost detekcije neplanarnih nepravilnosti, a ultrazvuk nešto bolje detektira planarne nepravilnosti [16]. U nastavku su prikazane norme koje se primjenjuju prilikom provjere kvalitete radiografijom [17].

2.1.1. Ispitivanje rendgenskim „X“ zrakama

Kao izvor zračenja kod rendgenskog ispitivanja se koristi rendgenska cijev s vakuumom. Cijev se priključuje na visoki istosmjerni napon do 400kv radi prozračivanja čeličnih predmeta do 70 mm

debljine. Iz zagrijane katode elektroni putuju električnim poljem i ubrzavaju prema anodi pri čemu dolazi do povećanja kinetičke energije. Nakon što se elektron zaustavi na anodi, njegova kinetička energija uzbuđuje elektrone metala anode koji potom skaču na višu energetska razinu – ljusku i pri povratku nazad predaju energiju zračenja. Kako su X zrake slične zrakama svjetlosti, šire se u pravcu i pri tome bacaju sjenu na fotografski materijal (film, ploču) te na nekim materijalima izazivaju fluorescenciju. Zrake s najkraćim valnim duljinama zalaze u područje gama zraka, dok najdulje se pokrivaju s valnim duljinama ultraljubičastog područja elektromagnetskog spektra. X zrake nastaju kočenjem brzih elektrona ili u prijelazima u elektronskom plaštu. U rendgenskoj cijevi zrake nastaju sudarom katodnih zraka, odnosno elektrona velikih brzina s čvrstim tijelom – anodom. Intenzitet zračenja X zraka je proporcionalan jačini struje (I), odnosno broju elektrona. Jačina struje je proporcionalna struji žarenja žarne niti katode koja se zagrijava posebnim strujnim krugom niskog napona. Prolazom zračenja kroz materijal debljine d , intenzitet I na izlazu iz materijala je oslabljen u odnosu na ulazni intenzitet zračenja. Uslijed ove pojave, na mjestu greške u zavarenom spoju je manje slabljenje intenziteta zračenja pa će se na radiogramu (filmu) vidjeti jače zatamnjenje. Umjesto korištenja slike na filmu, u industriji pa tako i metalurgiji, koristi se elektronički pretvarač-pojačivač od frekvencije X zračenja u vidljivi dio spektra zračenja, kao na uređaju za medicinsku dijagnostiku pa se slika unutrašnjosti zavarenog spoja može izravno promatrati golim okom. Ovi uređaji – radioskopi, rjeđe se koriste, ali imaju niz prednosti [6]. Na slijedećoj slici prikazan je prijenosni uređaj za stvaranje rendgenskih zraka.



Slika 2.2. Princip rada radiografskog snimanja [18, p. 18]

2.1.2. Ispitivanje gama (γ) zrakama

Izvor gama (γ) zračenja su industrijski izotopi, a najčešće se koriste tri izotopa koja su navedena u tablici 2.11. Jezgra atoma se obično nalazi u neutralnom – ravnotežnom stanju te dovođenjem energije u jezgru atoma moguće je postići uzbuđenje atoma i stanje više energetske razine. Tako pobuđen atom (bombardiranjem termičkim česticama ili u nuklearnim reaktorima kao posljedica raspada) proizvodi radioaktivne izotope. Odavanje – emisija energije u okolinu odvija se elektromagnetskim zračenjem jer jezgra zrači karakterističnu, diskretnu energiju određene frekvencije koja je specifična za svaki kemijski element. Izotopi navedeni u tablici 2.11. odgovaraju frekvencijama zračenja, pa tako iridij ima najmanju frekvenciju, dok bakar ima najvišu frekvenciju koja je ujedno i najproduktivnija. Kvaliteta radiograma – kontrast slika je bolja kod nižih frekvencija gama zračenja. Najkvalitetniji radiogrami se dobivaju primjenom iridijevih izotopa.

Tablica 2.11 Najčešće korišteni izotopi za gama zračenje [6]

Izotop	Primjena za debljinu čelika
Ir 192	5 – 100 mm
Cs 137	20 – 70 mm
Co 60	50 – 120 mm

2.1.3. Ispitivanje betatronima i linearnim akceleratorima

Čelični materijali čija debljina je veća od 50 mm, a manja od 150 mm, kvaliteta zavarenog spoja ionizirajućim zračenjem se provodi pomoću betatrona, dok kod debljina čelika do 450 mm se koriste linearni akceleratori. Betatron je uređaj u kojem dolazi do ubrzanja elektrona u električnom polju 10-100 kV na putanji koja je dugačka oko 1000 km. Brzine elektrona dosežu i do brzine svjetlosti prilikom udara u anodu, dok je jačina struje u μA . Energija doseže vrijednost od 15 do 30 MeV, a dobiveno zračenje je visoke frekvencije i prodornosti. Linearni akcelerator ima energiju zračenja od 4 do 18 MeV.

2.2. Ispitivanje ultrazvukom (metoda prozvučivanja)

Odašiljanjem zvučnih valova određenog spektra frekvencije kroz neki materijal moguće je detektirati greške u materijalu ili zavarenom spoju. Ultrazvuk je elastomehaničko titranje nekog medija frekvencijom iznad područja čujnosti, a za potrebe ultrazvučne defektoskopije koriste se frekvencije u području od 0,5 do 6,0 MHz. Ultrazvučni valovi u krutim tijelima, ovisno o obliku i smjeru ulaza, pretvaraju se i prostiru u mnogo izvedenih oblika titranja, a najčešće se koriste

transverzalni valovi. Vrlo bitan čimbenik prilikom kretanja ultrazvuka kroz materijal je akustična impedancija (dinamički otpor medija) koja je jedinstvena za svaki materijal. Razlika akustične impedancije je značajna pri na spojevima metala i zraka te prilikom nailaska vala na to područje odbija se natrag u metal i time otkriva prepreku – razdjelnu plohu. Ali valja napomenuti da ultrazvučna defektoskopija ne služi za otkrivanje pogrešaka u izravnom smislu već se njome određuje položaj, veličina i orijentacija razdjelne plohe materijala i pogreške. Za daljnje tumačenje rezultata ispitivanja potrebno je znanje o načinu prostiranja valova i pretvorbi, mogućim oblicima i položajima ploha koje omeđuju pogrešku, ali i o svojstvima i dometima metode. Pri ultrazvučnoj defektoskopiji se prvenstveno koristi A-slika – iskaz nalaza reflektora na zaslonu katodne cijevi u obliku vertikalnog impulsa. Uz poznavanje svojstava materijala i brzine širenja zvuka kroz taj materijal moguće je odrediti udaljenost reflektora od izvora i prijemnika te samim time i položaj greške u odnosu na izvor. Visina odjeka iskazuje podatak o veličini reflektora pa samim time i veličini pogreške. Kod zavarenih spojeva najčešće se koristi tehnika „impuls-odjek“, a za odašiljanje i prijem ultrazvučnih impulsa upotrebljavaju se kose ili kutne glave različitih kutova upada impulsa koje su priključene na izvor impulsa te obrađuje podatke primljenih reflektiranih impulsa [10]. Slijedeća tablica prikazuje prednosti i nedostatke ultrazvučne defektoskopije, dok na slici 2.3. se vidi uređaj za ultrazvučnu defektoskopiju.

Tablica 2.12. Prednosti i nedostaci ultrazvučne defektoskopije [10, p. 102], [19, p. 192]

Prednosti	Nedostaci
Područje debljina ispitivanog materijala je neograničeno	Nakon provođenja kontrole ne ostaje nikakav izravan i vjerodostojan trag za naknadnu provjeru
Dovoljan je pristup samo s jedne strane predmeta koji se ispituje	Interpretacija dobivenih rezultata isključivo ovisi o znanju i savjesnosti provoditelja ispitivanja
Postupak provođenja kontrole nema opasnosti te ne zahtijeva dodatnu i značajniju zaštitnu opremu	Pogrešku je moguće pouzdano detektirati isključivo ako se pristupa predmetu s više strana što često nije moguće i zahtijeva više vremena
Pribor i uređaji koji se koriste tijekom ispitivanja su lagani, prenosivi te malih veličina.	Edukacija i obuka ispitivača, posebice za složena ispitivanja su dugotrajne i skupe
Osjetljivost metode je relativno visoka i pronalaženje grešaka je relativno jednostavno	Složeni oblici konstrukcije nepogodne su za provedbu ultrazvučne defektoskopije
Metoda je pogodna za obradu podataka elektroničkim putem	Slaba mogućnost otkrivanja potpovršinskih grešaka i grešaka u predmetima kompliciranih oblika
Relativna neosjetljivost na vanjske uvjete okoline (vlaga, vjetrovitost, temperatura)	Poželjno je da površina upada i odraza zvuka predmeta koji se ispituje bude paralelna i glatka

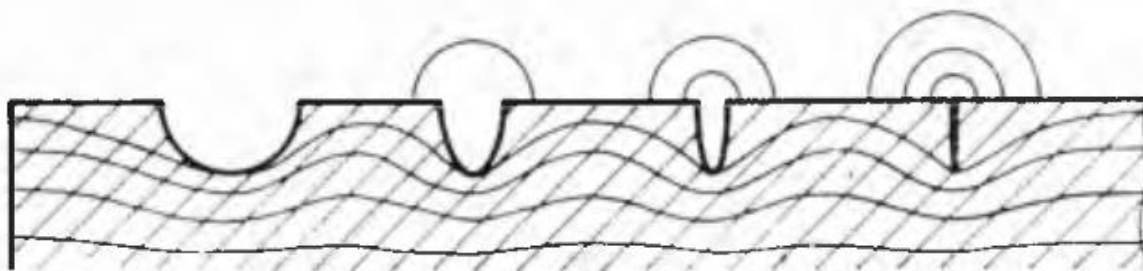


Slika 2.3. SUM Go ultrazvučni defektoskop [20]

2.3. Ispitivanje magnetskim i elektromagnetskim (induktivnim) metodama

Ispitivanje magnetskim i elektromagnetskim metodama, kao jedna od najraširenijih metoda ispitivanja u praski, zasnovana je na osnovnim svojstvima materijala ili magnetskih polja (električna provodljivost, permeabilitet i korektivna sila). Metoda je uvelike zastupljena radi jednostavnosti i relativno niskoj cijeni uređaja za ispitivanje te se najčešće koristi u velikoserijskoj i masovnoj proizvodnji. Metoda se dijeli u dvije osnovne skupine: a) kontrola feromagnetskih materijala i b) kontrola neferomagnetskim metala i nemetala. S obzirom na svojstva materijala i veličine izradaka koji se ispituju, postoji mnoštvo tehnika kontrole.

Tijekom prolaska struje kroz vodič stvara se oko njega koncentrično magnetsko polje čija jakost ovisi o jačini struje u vodiču. Magnetske silnice pri prolasku kroz presjek magnetskog vodiča stvaraju gustoću polja. Sposobnost vođenja magnetskih silnica (permeabilnost) ovisi o vrsti materijala. U slučaju da u materijalu postoji diskontinuitet (greška) dolazi do ugibanja magnetskih silnica, njihove koncentracije i povećanja jakosti polja u različitom rasponu. Ova pojava čini osnovu magnetskog ispitivanja feromagnetskih materijala te je prikazana na slici 2.4. Ukoliko se vodič nalazi u izmjeničnom magnetskom polju koje stvara zavojnica, u njemu se inducira izmjenična struja koja stvara svoje polje. Mjerenje novonastalog izmjeničnog polja koje ovisi o diskontinuitetu materijala vodiča, osnovica je induktivnih metoda defektoskopije.



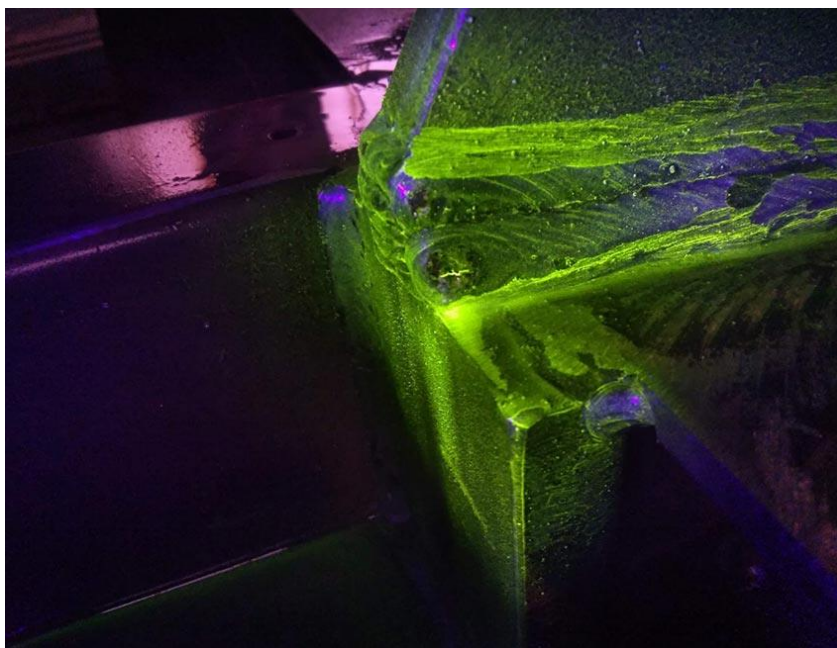
Slika 2.4. Utjecaj površinski vezanog zarez (pukotine) na stvaranje rasipnog magnetskog polja [19, p. 193]

U sljedećoj tablici prikazane su prednosti i nedostaci magnetskih metoda ispitivanja.

Tablica 2.13. Prednosti i nedostaci magnetske defektoskopije, [19, pp. 193-194]

Prednosti	Nedostaci
Jednostavnost principa i niska cijena uređaja	Ustanovljava se postojanje greške, ali ne i njezina geometrija
Lako i jednostavno rukovanje uređajem	Dubinske greške se teško otkrivaju i identificiraju (dubina pouzdanog otkrivanja je nekoliko mm)
Dobra osjetljivost na otkrivanje površinskih i potpovršinskih grešaka, posebice pukotina	Osim pri kontroli proizvoda masovne proizvodnje, metoda je spora
Interpretacija rezultata ne zahtijeva naročitu stručnost	Interpretacija rezultata ovisi o stanju površine ispitivanog materijala
Mogućnost primjene na proizvode složenih oblika i s velikim razlikama u debljini stjenke	

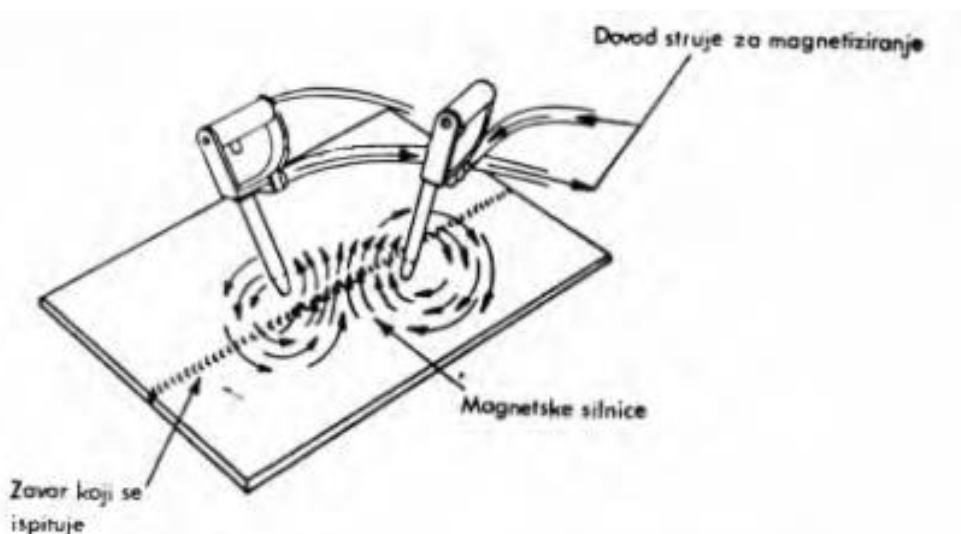
Osnovni oblik magnetske metode su tehnike rada koje upotrebljavaju magnetske čestice dijele se na mokru i suhu tehniku. Neovisno o kojoj tehnici je riječ, mokroj ili suhoj, koristi se isti medij. Riječ je o feromagnetnom prašku feri-oksida čija veličina zrna ne prelazi 1 μm . Posipanjem praška po predmetu ispitivanja dolazi do taloženja praha na mjestima gdje je jače izraženo rasipanje magnetskog polja koje nastaje na magnetiziranim predmetima iznad mjesta pogreške te se gomila prateći konturu pogreške. Da bi se osigurala bolja vidljivost, upotrebljavani prašak je vrlo često obojen kontrastnom bojom u odnosu na površinu koja se kontrolira ili se površina premaže tankim slojem kontrastne boje prije kontrole. Najveća osjetljivost je fluorescirajućeg magnetskog praška, a nalazi se očitavaju ultraljubičastim svjetlom te je jedan takav primjer prikazan na slici 2.5.



Slika 2.5. Ispitivanje fluorescirajućim magnetskim praškom [21]

Tijekom ispitivanja magnetskim česticama, koriste se dvije osnovne tehnike [10]:

- Tehnika strujnog prolaza (feroflux) – provodi se propuštanjem izmjenične ili istosmjerne struje niskog napona i visoke jakosti kroz presjek uslijed čega se materijal ponaša kao vodič i oko njega nastaje magnetsko polje. Princip rada ove metode prikazan je na slici 2.6. Tehnika je jednostavna, a koristi se i na neferomagnetnim materijalima. Ogroman nedostatak ove tehnike jest što na mjestu dodira pipalica s materijalom je teško izbjeći iskrenje i lokalno oštećenje materijala.
- Tehnika posredne magnetizacije (magnetski jaram) – tehnika je moguća samo na feromagnetnim materijalima jer koristi namagnetizirane jarmove koji se polože na mjesto kontrole i s materijalom zatvaraju magnetski krug i magnetizira materijal.



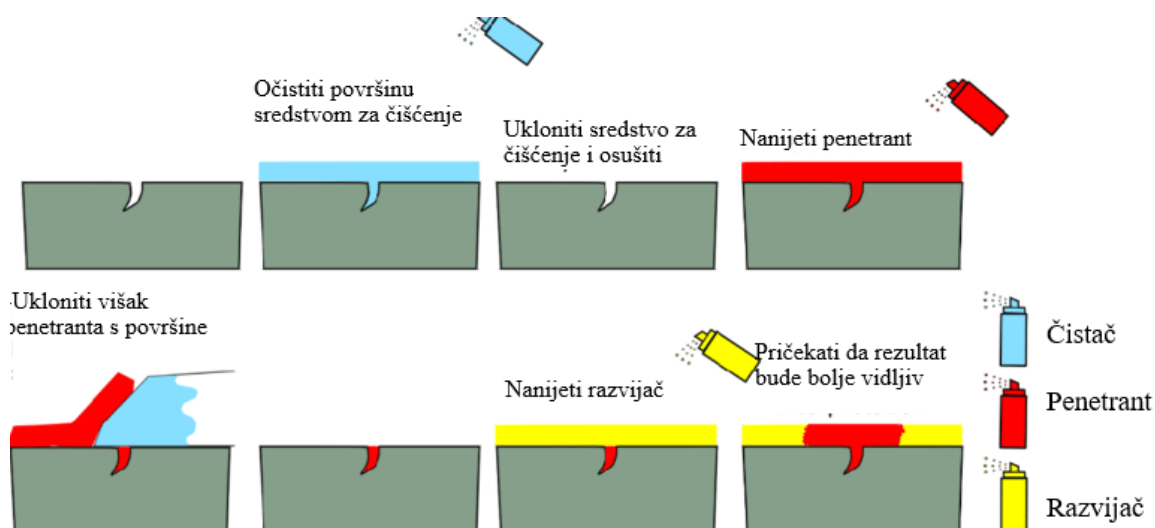
Slika 2.6. Princip djelovanja ferofluks aparata [19, p. 194]

2.4. Penetrantsko ispitivanje

Ispitivanje tekućim penetrantima spada u najstarije metode nerazornog ispitivanja te je osuvremenjena za industrijsku kontrolu nepropusnosti. Cjelokupna metoda je zasnovana na svojstvu kapilarnosti odnosno svojstvu tekućine (lako ulje) da prodire i popunjava slobodan prostor u vidu šupljina i pukotina. Ovom metodom moguće je detektirati površinske mikro i makro pukotine, propusnost stijenki, šupljine u zavarenim spojevima. Svaki penetrantski sustav je zasnovan na nekoliko elemenata, a to su [22]:

- Penetrant – kroz svojstvo kapilarnosti prodire u šupljine i tako povećava uočljivost
- Razvijlač – omogućava stvaranje kontrasta spajanjem s penetrantom te u nekoliko minuta se razvija i omogućava lociranje pukotine.
- Odstranjivač – omogućava odstranjivanje penetranta nakon detekcije pukotine.
- Čistač – služi za čišćenje površine od penetranta i razvijlača pri čemu je neagresivan spram površine i elementa koji se ispituje.
- Emulgator – sredstvo za povremeno korištenje koje služi za odstranjivanje prekomjerno nanesenog penetranta.

Najvažniji korak prilikom upotrebe ove metode jest priprema površine koja mora biti dobro očišćena od svih mogućih zaprljanja kako bi se omogućila penetracija. Potom se penetrant nanosi na plohu i kroz određeno vremensko razdoblje (ovisno o specifikaciji proizvođača penetranta) se on ostavlja da djeluje. Po isteku vremena uklanja se penetrant prikladnim sredstvima pri čemu se pazi da on ostane unutar šupljina te se nanosi razvijlač pomoću kojeg penetrant intenzivnije izlazi iz pukotina i na taj način razvija indikaciju. Sve uočene indikacije se bilježe te se potom čisti predmet [10]. Na slici 2.7. je prikazan postupak ispitivanja tekućim penetrantima, dok na slici 2.8. je prikazana površina na koju je nanesen penetrant i prikazana je indikacija.



Slika 2.7. Postupak ispitivanja penetrantima [obrada autorice prema [18, p. 7]

Penetranti se dijele u dvije osnovne skupine: prema načinu nanošenja i prema načinu pregleda nalaza. Prma načinu nanošenja, penetranti mogu biti:

- Vodoperivi – uklanjaju se vodom ili spužvom
- Penetranti s naknadnim emulgiranjem – uklanjaju se posebnim tekućinama.

A prema načinu pregleda nalaza, mogu biti:

- Obojeni penetranti za dnevno svjetlo
- Fluorescirajući penetranti za pregled pod ultraljubičastim svjetlom.

Danas se najčešće koriste penetranti i čistači i razvijajući koji su pakovani u bočice od tlakom (sprejevi). U slijedećoj tablici prikazane su prednosti i nedostaci ove metode.

Tablica 2.14. Prednosti i nedostaci penetrantske metode ispitivanja zavara [10]

Prednosti	Nedostaci
Jednostavnost primjene	Kvaliteta nalaza uvelike ovisi o stanju površine koja se ispituje.
Pojačana vidljivost šupljina na površini uz primjenu prikladnog penetranta.	Upotrebljivost samo u ograničenom temperaturnom opsegu
Ukoliko nema potrebe za dodatnom većom pripremom površine, relativno niska cijena.	Ograničena primjena na otvorenom ukoliko se ne primjenjuje zaštita od atmosferskih utjecaja.
Nema potrebe za većom stručnosti kontrolora	Moguće je detektirati samo one pogreške koje su izravno povezane s površinom koja se kontrolira.
Vrlo lako dokumentiranje nalaza pomoću fotografije.	Nemogućnost primjene na površini koja je prethodno bila očišćena
Sposobnost primjene na svim materijalima	



Slika 2.8. Ispitivanje zavara penetrantima [23]

2.5. Ispitivanje vrtložnim strujama

Ispitivanje kvalitete vrtložnim strujama spada u površinsko volumetrijsku metodu pri čemu materijal mora biti električno vodljiv, neovisno je li feromagnetičan (feritni čelici) ili neferomagnetičan (Al, Ni, Cu i njihove legure). Električni kontakt s predmetom ispitivanja nije nužan, premda je poželjan. Ispitivanje i metoda je zasnovana na strujama koje se induciraju pomoću kalema-sonde u predmetu koji se ispituje. Struje stvaraju drugo magnetsko polje čiji smjer je suprotan od smjera magnetskog polja koje ga je uzrokovalo. Promjene induciranog polja prima prijemni kalem-sonda i registrira promjene polja uzrokovane promjenama zbog geometrije predmeta, pukotina, strukture ili kemijskog sastava. Kontrola se provodi mjerenjem impedance sustava kalem-materijala. Uređaji su računalni, a jedinice često robotizirane, a operatori moraju biti školovani za rukovanje uređajima, vršenje ispitivanja i analizu dobivenih rezultata te moraju imati akreditacije i certifikate od za to ovlaštenih ustanova. Metoda se najčešće koristi za detekciju i mjerenje pukotina, poroznosti i uključaka, mjerenje debljine električki nevodljivog sloja u vodljivom materijalu ili debljine nemagnetičnog sloja na feromagnetnom materijalu, za sortiranje materijala po kemijskom sastavu, strukturi i tvrdoći te mjerenje električne vodljivosti, magnetne permeabilnosti, zrnatosti strukture, materijala, kvalitete toplinske obrade i dimenzije materijala. Glavna svrha je provjera homogenosti i svojstava proizvoda u proizvodnji, montaži ili eksploataciji. Na slici 2.9. je prikazan uređaj za ispitivanje vrtložnim strujama.



Slika 2.9. Uređaj za ispitivanje vrtložnim strujama [24]

2.6. Vizualno ispitivanje uz pomoć pomagala (povećalo, endoskop).

Tijekom izrade zavarenog spoja najvažnija i najbitnija je vizualna kontrola. Metoda omogućava uočavanje i predviđanje mjesta na kojem će nastati pogreške kao i sam uzrok nastajanja pogrešaka te na osnovu toga donositi odluke u svim fazama izrade zavara. Kako je vidljivo iz tablice 2.4. Znatan dio pogrešaka je moguće predvidjeti vizualnom kontrolom te savjesnom izradom izbjeći. Upravo iz tog razloga vizualna kontrola ima prednost nad ostalim metodama ispitivanja. Osnovni element vizualne kontrole je ljudsko oko te u kombinaciji s iskustvom i analitičkom prosudbom koji ne može nadmašiti niti jedan sofisticirani računalni sustav. Kao ispomoć oku se upotrebljavaju tehnička pomagala, jednostavna i složena. Na slici 2.10. je prikazan boroskop za vizualni pregled, a tehnička pomagala se dijele u četiri skupine [10, pp. 91-94]:

- Pomagala za površine – omogućava povećanje sposobnosti oka i pristup nepristupačnim površinama predmeta. U ovoj kategoriji su povećala i zrcala. Danas se koriste endoskopi i boreskopi ili videoskopi koji još poboljšavaju pristup i pregled.
- Pomagala za mjere – mjerne trake, pomična mjerila, dubinomjeri ili posebno izrađene šablone. Danas se za mjerenje debljina materijala i zavarenog spoja koriste i ultrazvučni mjerači debljine kojima je ujedno moguće otkriti i jednostavnije greške, posebice kod dvoslojnih materijala.
- Pomagala za električno mjerenje – mjerači polja, „amper kliješta“, mjerači temperature, mjerači debljine zaštitnih premaza.
- Ostala pomagala – termometri, manometri, infracrvene termokamere, termokrede, analizatori mješavine zaštitnih plinova, mjerači vlage.



Slika 2.10. Boroskop za pregled zavarenih spojeva [25]

U slijedećoj tablici prikazane su prednosti i nedostaci vizualnog ispitivanja zavarenih spojeva.

Tablica 2.15. Prednosti i nedostaci vizualne kontrole zavarenog spoja [26]

Prednosti	Nedostaci
Ispitivanje je jednostavno i učinkovito	Nedovoljno posvećivanje pozornosti na obuku ispitivača
Ne zahtijeva skupu opremu	Potpuno oslanjanje na ljudski faktor
Ispitivači s iskustvom i napredna oprema omogućavaju da vizualna kontrola kao alat bude jako osjetljiva	Nepравilnosti ispod površine nisu vidljive
Vrijeme obuke i stjecanja iskustva može biti relativno kratko	
Sve komponente je moguće ispitati bilo gdje na površini	
Moguće je pronaći različite nepravilnosti	

3. OSOBLJE KOJE PROVODI ISPITIVANJE

Tijekom provjere kvalitete zavarenog spoja metodama bez razaranja jedan od ključnih faktora za pouzdanost rezultata ispitivanja jest osposobljenost osoblja koje vrši kontrolu. S time da valja naglasiti, što je stupanj automatizacije manji, ovaj faktor je izraženiji. Norme propisuju uvjete obrazovanja i osposobljavanja osoblja, kako za osobe tako i za centre koji vrše obrazovanje i certifikaciju. Osobe koje će obavljati ispitivanja kvalitete osposobljavaju se na tečajima koji imaju propisane programe i sadržaje, a provjera stečenog znanja i vještina se obavlja ispitima. Strogom kontrolom obrazovanja i osposobljenosti osoblja koje vrši provjeru kvalitete, stvoreni su uvjeti za stjecanje međunarodnog ovlaštenja za provjeru kvalitete proizvoda. Centri za obrazovanje i certifikaciju djeluju pri nacionalnim znanstveno-strukovnim udruženjima koja se bave provjerom kvalitete metodama bez razaranja, a sve mora biti provedeno u skladu s HRN EN ISO 9712:2022 Nerazorno ispitivanje -- Kvalifikacija i certifikacija NDT osoblja (ISO 9712:2021; EN ISO 9712:2022). Navedenom normom propisano je tri razine certifikata za osoblje [27]:

1. Stupanj pojedinačno ovlaštenje pojedinca za NDT ispitivanja kvalitete u skladu s pisanim uputama i pod nadzorom osoblja s 2. ili 3. stupnjem. Osoblje može instalirati NDT opremu, provoditi ispitivanja, bilježiti i klasificirati rezultate ispitivanja u skladu s propisanim kriterijima i sastavljati izvještaje s rezultatima. Osoblje prve razine nije odgovorno za odabir metode ispitivanja ili tehnike koja će biti korištena niti za interpretaciju dobivenih rezultata.
2. Stupanj – pojedinačno ovlaštenje pojedinca za provođenje kontrole kvalitete NDT metodama u skladu s NDT procedurama i uputama. U sklopu kompetencija, osoblje ima ovlaštenje odabrati NDT metodu koja će se koristiti, definirati ograničenja primijenjene metode ispitivanja, prevoditi NDT kodove, standarde, specifikacije, postavljati i provjeravati opremu, provoditi i nadzirati ispitivanje, interpretirati i ocjenjivati dobivene rezultate u skladu s primjenjivim standardima, provoditi i nadzirati sve zadaće iz razine 2, voditi i mentorirati te nadzirati osoblje ispod 2. razine te sastavljati izvještaje NDT ispitivanja kvalitete.
3. Stupanj – pojedinac je osposobljen provoditi i upravljati NDT operacijama za koje su ovlašteni te mogu procjenjivati i interpretirati rezultate u skladu sa standardima, imaju dovoljno praktičnog znanja o primjenjivim materijalima, procesima i tehnologiji proizvodnje da odaberu NDT metodu ispitivanja kvalitete, definiraju NDT tehnike i pomažu u postavljanju prihvatljivih kriterija te su generalno upoznati s ostalim NDT metodama.

U sljedećoj tablici prikazane su djelatnosti osoblja ovisno o njihovoj razini osposobljenosti.

Tablica 3.1. Zadaci i ovlaštenja osoblja ovisno o razini osposobljenosti [27]

	I. STUPANJ	II. STUPANJ	III. STUPANJ
Nepravilnosti Greške Stanje materijala	Otkriti područja na kojima se javljaju nepravilnosti	Procijeniti parametre nepravilnosti Ocijeniti vrstu greške Utvrđiti postojanje greške	Definirati kriterije kvalitete ili podobnosti Ocijeniti prihvatljivosti objekta
Ispitivanje Mjerenje	Provoditi ispitivanje prema pisanoj uputi ili postupku	Izrada i razrada uputa za ispitivanje Organizirati rad	Definirati uvjete ispitivanja Razraditi ili provjeriti postupke
Laboratorij Oprema Pribor	Održavati	Provjeravati opremu Pripremati sustav za ispitivanje	Organizirati rad laboratorija Provesti izbor opreme
Zaštita na radu	Provoditi zaštitu na radu	Pripremati i nadzirati Izvještavati	Organizirati sustav zaštite Izraditi dokumentaciju

4. POUZDANOST METODE KONTROLE BEZ RAZARANJA

Točnost rezultata i pouzdanost metode ispitivanja kvalitete bez razaranja ovisi o mnogobrojnim čimbenicima. Sama pouzdanost rezultata lako se utvrđuje nakon što je definirana osjetljivost same metode kontrole kvalitete, kao i vjerojatnost otkrivanja pogreške i vjerojatnost interpretacije rezultata ispitivanja.

4.1. Osjetljivost metoda kontrole bez razaranja

Najznačajniji parametar ispitivanja kvalitete metodom bez razaranja je osjetljivost te ona mora biti propisana unaprijed za svako ispitivanje koje se provodi. U slučaju ispitivanja kvalitete, osjetljivost je definirana veličinom najmanje greške ili indikacijom neke mjerene veličine koja se nakon primjene određene metode ispitivanja može izdvojiti. Pri tome, valja naglasiti da je nužno razlikovati nekoliko parametara [28]:

- Osjetljivost metode – izravno je definirana najmanjom mogućom nepravilnosti koju ta metoda može detektirati ili najmanjom veličinom koju neka metoda može izmjeriti ukoliko se metoda koristi za mjerenje. Osjetljivost se najčešće definira iskustveno ili iz literature, a daje parametre za doseg osjetljivost neke tehnike ili metode ispitivanja kvalitete. Ukratko rečeno, osjetljivost metode je maksimalni domet koji je do sada postignut nekom metodom mjerenja kvalitete. Tako ako promatramo ispitivanje penetrantima, najveća očekivana osjetljivost sustava pri detekciji pukotina su pukotine koje imaju širinu $> 0,1 \mu\text{m}$, dubinu $\sim 1 \mu\text{m}$ te duljine $> 1 \text{mm}$.
- Uvjetna osjetljivost sustava – definira osjetljivost sustava pomoću parametara referentnih grešaka izrađenih u uzorcima i etalonima. Ovisna je o izboru sustava za ispitivanje kvalitete, a propisuje u kolikoj mjeri neki sustav ima uvjete za postizanje potrebne osjetljivosti. Ova vrijednost je uvijek manja ili jednaka osjetljivosti metode.
- Granična osjetljivost – definira potrebnu osjetljivost koju je potrebno osigurati da bi postojala dovoljna rezerva osjetljivosti za provođenje ispitivanja.
- Radna osjetljivost – prisutna je u procesu provođenja ispitivanja i najčešće je manja od uvjetne ili ekvivalentne osjetljivosti, ovisno o izboru osjetljivosti za rad i uvjetima rada. S obzirom na ovisnost o ova dva parametra, radnu osjetljivost se provjerava tijekom ispitivanja jer je podložna promjeni.
- Ekvivalentna osjetljivost – definira i mjeri osjetljivost sustava na realne greške u osnovnom materijalu ili na standardne u etalonu, kada nije moguće izgraditi odgovarajući referentni uzroka s referentnim greškama definiranih parametara s obzirom na kritičnu grešku. Naziv

dolazi od činjenice da sustav za ispitivanje određenom metodom kontrole detektira i procjenjuje greške u ispitnom uzorku ekvivalentne po odzivu.

Promatrajući stalnost vrijednosti uvjetne osjetljivosti sustava, ekvivalentne osjetljivosti i granične osjetljivosti sustava mijenjaju vrijednost u nekom vremenu, a sve ovisno o karakteristikama pojedinog sustava i opremi koja se upotrebljava u tom sustavu.

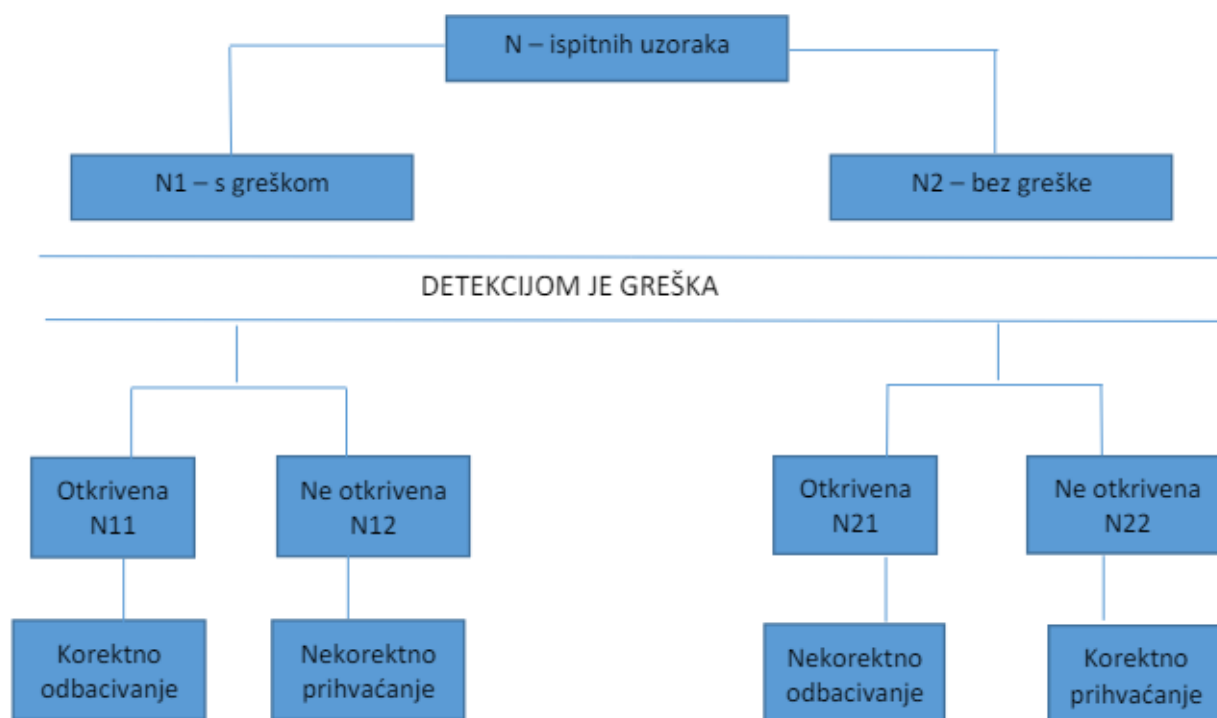
Sama osjetljivost neke metode za ispitivanje kvalitete može se povećati poboljšanjem sustava ili tehnika rada. Osjetljivost nekog sustava se definira parametrima greške, ali navedene parametre u razradi postupka se preslikava u parametre za odabranu metodu na različite načine. Kod ultrazvučne kontrole amplituda signala koji je moguće postići odjekom ultrazvuka na ispitivanom reflektoru definira osjetljivost. Kod radiografskog ispitivanja, snimak jasno prepoznatljivog etalona i zacrnjena polja u zadanim granicama definira osjetljivost te bez toga nije moguće kvalificirati radiogram za interpretaciju [28].

4.2. Vjerojatnost detekcije greške i interpretacije rezultata

Ispitivanje kvalitete metodom bez razaranja ovisi o nizu utjecajnih faktora te se odvija u četiri moguća ishoda. Kombinacijom osjetljivosti ispitnog sustava i primijenjene metode ovisi vjerojatnost otkrivanja ili ne otkrivanja greški kritične veličine. U slučaju kada se kombinira visoka osjetljivost ispitnog sustava i primijenjene metode, vrlo vjerojatno će se detektirati greške kritične veličine, dok ukoliko je metoda ispitivanja visoke osjetljivosti, dolazi do otežanog interpretiranja rezultata. Primjenjujući ovo u praksi, npr. na metodi ispitivanja ultrazvukom, ukoliko je osjetljivost sustava visoka, rezultati ispitivanja će dati ogroman broj signala koji nužno ne moraju biti uzrokovani greškom već su odraz ultrazvuka o kutove, bridove i sam povrat zvuka kroz materijal uzorka čime će nalaz obilovati lažnim greškama. Pod lažne greške se misli na sve indikacije koje ukazuju da greška postoji, a nije uzrokovana stvarnom greškom. Tijekom razrade postupka kontrole uvijek se mora predvidjeti mogućnost pojave lažnih greški. Na ovaj način se sprečava mogućnost da tijekom postupka interpretacije rezultata lažne greške budu proglašene stvarnim greškama čime bi neopravdano nastao škart proizvod.

Moguća četiri ishoda kontrole bez razaranja mogu se prikazati i interpretirati najlakše ukoliko ih se predstavi pomoću skupa od N ispitnih uzoraka pri čemu je postignut rezultat ispitivanja kako je prikazano na slici 4.1. Drugi i treći ishod će odvesti do krivog zaključka, tj. Prihvatiti će se objekt s greškom, a odbaciti objekt bez greške. Ovakve situacije je potrebno reducirati ili dati prednost jednoj od njih. U slučaju da se usvoji stroži kriterij kvalitete, veća osjetljivosti i veći opseg kontrole, dolazi do znatnog uvećavanja pogreške nepotrebnog odbacivanja. Kad je riječ o

proizvodnji elemenata ili objekata čija havarija bi mogla imati znatne negativne posljedice (npr. nuklearna elektrana, zrakoplov, petrokemijsko postrojenje) odabire se povećanje škart proizvoda jer se povećava pogrešno odbacivanje te se na taj način smanjuje rizik pojavljivanja predmeta s neotkrivenim greškama u eksploataciji. Prije samog provođenja ispitivanja u velikoj mjeri se definiraju i određuju vjerojatnost detekcije pogreške i interpretacije nalaza kao pogreške.



vjerojatnost detekcije $POD=N11/N1$
 vjerojatnost interpretacije $POR=N22/N2$

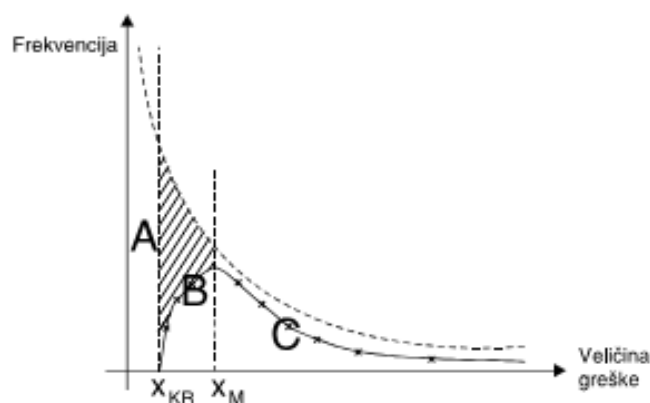
Slika 4.1. Shematski prikaz ishoda ispitivanja [8]

Neku grešku će se smatrati otkrivenom ukoliko se utvrde oni parametri greške koji su propisanom metodom kontrole kvalitete trebali biti utvrđeni. Riječ je o slijedećim parametrima:

- Veličina
- Položaj
- Učestalost ili brojnost
- Usmjerenost.

Svaki od parametara karakterizira jedna ili više dimenzija. Položaj greške se određuje u tri dimenzije, kao i veličina (duljina, širina, dubina). Neovisno o kojem parametru je riječi, nužno je da je moguće kvantitativno procijeniti tražene parametre greške te da je poznata nepreciznost

mjernog sustava. Sama vjerojatnost detekcije greške je omjer otkrivenih i postojećih grešaka u nekom objektu i njezina vrijednost je uvijek manja od jedan (ne postoji savršena metoda, sustav niti objekt). Kad je riječ o subjektivnom utjecaju kontrolora i ispitnog sustava, ove utjecaje je potrebno svesti na što je manju moguću mjeru. Provođenjem kontrole u praksi, detektira se samo jedan dio grešaka, a povećanjem osjetljivosti i moći razlučivanja te boljom organizacijom interpretacije, dolazi do veće podudarnosti distribucije otkrivenih grešaka sa realnom distribucijom grešaka na uzroku koji se ispituje. U slučaju kada dođe do nekorektnog prihvatanja objekta (slučaj N12 sa slike 4.1), govorimo o najkritičnijem ishodu kontrole kvalitete. Upravo iz tog razloga se pouzdanost povezuje s detektibilnošću greške na predmetu ili objektu. Premda je stvarna distribucija nepoznata, inženjerskom logikom je moguće doći do zaključka da s obzirom na veličinu grešaka, postojeće greške će biti raspoređene nalik na krivulju distribucije grešaka koja je prikazana na slici 4.2. Područja unutar kojih metoda može ili ne može detektirati grešku obično bude istaknuta ispod krivulje dok je broj grešaka proporcionalan površini ispod krivulje [28].



Slika 4.2. Distribucija i detektibilnost grešaka [8]

Na slici 4.2 prikazano je područje na kojem je moguća detekcija greške te je ono podijeljeno na tri karakteristična segmenta. Prvi dio, dio A, predstavlja onaj skup grešaka koje je moguće otkriti kada metoda ispitivanja ima graničnu osjetljivost. U ovom slučaju otkrivaju se greške mikroveličine, a granica detektibilnosti ovisi o metodi kontrole. Područje označeno slovom B podrazumijeva greške koje veličinom prelaze prag osjetljivosti metode ispitivanja te ih je moguće detektirati, ali kako se približava pragu osjetljivosti povećava se vjerojatnost da takve greške ne budu otkrivene. Greške smještene u području B su one greške koje uzrokuju smanjivanje pouzdanosti metode ispitivanja, a broj tih grešaka je moguće izračunati i na taj način odrediti pouzdanost pri ispitivanju. Područje C je područje s visokom vjerojatnošću detekcije, odnosno biti će otkrivene sve greške koje su s obzirom na svoju veličinu svrstane u ovo područje [28].

5. ISPITIVANJE DIJELA OT.24-SI.50

Ispitivani strojni dio OT.24-SI.50 je zavareni spoj. Postupak zavarivanja je elektrolučno zavarivanje volframovom elektrodom u atmosferi inertnog plina-TIG, a oznaka ovog postupka je 141. Materijal cijevi je nelegirani čelik s visokim temperaturnim svojstvima oznake 16Mo3. Na slici 5.1. je prikazan zavareni spoj strojnog dijela OT.24-SI.50. Zavar je ispitan na dva načina volumnom i površinskom metodom. Zavar se ispituje metodom radiografije prema normi HRN EN ISO 17636-1 i penetratskom metodom prema HRN EN ISO 3452-1.

Zavar dimenzija $\text{Ø}60,3 \times 5,6$ mm prikazan na slici 5.1.



Slika 5.1. Prikaz zavarenog spoja strojnog dijela OT.24-SI.50

5.1. Radiografsko ispitivanje

Omogućava nam da vidimo unutrašnjost zavarenog spoja, pruža nam preciznu sliku na kojoj možemo brzo otkriti nepravilnosti kao što su korozija, pukotine, šupljine itd. Snimanje je obavljeno u prostoriji firme namijenjenoj za radiografska ispitivanja tako da nije bilo opasnosti od ulaska ljudi u zonu zračenja. Za ispitivanje zavarenog spoja dimenzija $\text{Ø}60,3 \times 5,6$ mm koristimo dva filma D4 dimenzija 100×240 mm. Sve debljine stijenke do 6,3 mm idu na filmove D4 a one iznad 6,3 mm idu na D5 filmove. Proizvođač filmova koji su korišteni za ovo ispitivanje je AGFA. Broj filmova i ekspozicija definiran je normom HRN EN ISO 17636 u ovom slučaju su to dvije ekspozicije odnosno 2 filma.

Prvi korak je očistiti zavar i pripremiti ga za snimanje, potom postaviti film na stražnju stranu dijela koji se testira te zatim dovesti izvor zračenja. U ovom slučaju korišten je uređaj proizvođača SEIFERT model ERESKO 42 MF koji je prikazan na slici 5.2.



Slika 5.2 Rendgen uređaj korišten pri ispitivanju.

Normom HRN EN ISO 17636-1 (vidi slika 5.3.) su propisane udaljenosti od izvora do objekta ovisno o debljini stjenke ispitivanog uzorka te u ovom slučaju udaljenost iznosi 639 mm, a od objekta do filma 61 mm. Nakon što je sve postavljeno prostorija se napušta i odlazi se do upravljačke ploče rendgena na kojoj se postavlja napon cijevi, struja i vrijeme ekspozicije prema vrsti materijala i debljini stijenke. U ovom slučaju napon je postavljen na 180 kV, struja na 4,5 mA a vrijeme ekspozicije na 1 minutu i potom se pokreće radijacija.

PROMJER CIJEVI (mm) TUBE DIMETER (mm)		DEBLJINA STIJENKE (mm) WALL THICKNESS (mm)		MIN UDALJENOST IZVOR – OBJEKT - f_{min} MIN DISTANCE SOURCE - TUBE SURFACE - f_{min}		DOZVOLJENI MAKSIMALNI NAPON RENDGENSKE CIJEVI I ZAHTJEVANA KLASA FILMA			
				KLASA A / CLASS A $f_{min} = 7,5 \text{ dB}^{2/3}$ ($b=1,1D_s, d=3,0 \text{ mm}$)	KLASA B / CLASS B $f_{min} = 15 \text{ dB}^{2/3}$ ($b=1,1D_s, d=3,0 \text{ mm}$)	t (mm)	U_{MAX} (kV)	FILM klasa oznaka	
2 EKSPOZICIJE ZAMAKNUTE ZA 90°	13,5	1,6	3 (ILI VIŠE) EKSPOZICIJA ZAMAKNUTE ZA 60° (ILI MANJE)	135	270	3,2	150	C3 D4/MX125	
	17,2	2,0		160	320	4,0	160	C3 D4/MX125	
	21,3	2,5		185	370	4,5	165	C3 D4/MX125	
	25,0	3,0		205	410	5,0	170	C3 D4/MX125	
	31,8	3,8		240	480	5,6	180	C3 D4/MX125	
	38,0	4,5		270	540	6,3	180	C4 D5/T200	
	44,5	5,3		300	600	7,1	185	C4 D5/T200	
	57,0	6,8		355	710	8,0	190	C4 D5/T200	
	63,5	7,6		380	760	- U_{MAX} se određuje prema većoj od dvije debljine u spoju - U_{MAX} se određuje prema izmjerenoj debljini ako je ona veća od nominalne - U_{MAX} za kladiranih cijevi i panele se uzima za $t+2 \text{ mm}$			
	70,0	8,0		410	820				
	76,1	8,0		430	860				
	88,9	8,0		480	960				

Slika 5.3: Norma HRN EN ISO 17636-1



Slika 5.4. Upravljačka ploča rendgena

Na slici 5.4. je prikazana upravljačka ploča uređaja za radijaciju pomoću koje se vrši upravljanje procesom ispitivanja. Nakon što je isključen uređaj za radijaciju odnosno rendgen skida se film i nosi na razvijanje u tamnu komoru gdje je upaljeno samo malo infracrveno svjetlo zbog toga da ne dođe do oštećenja filmova, filmovi se ubacuju u uređaj za izradu filmova i nakon 8 minuta razvijanja s druge strane uređaja izlaze gotovi filmovi.



Slika 5.5. Prikaz uređaja za izradu filmova

Na slici 5.5. je prikazan uređaj za izradu filmova nakon završenog snimanja. Kada su radiogrami spremni stavljaju se na iluminator. Prvo je potrebno provjeriti odgovara li zacrtnjenje zahtjevima norme HRN EN ISO 17636 koja definira da zacrtnjenje mora biti $\geq 2,30$. Na prvom filmu odnosno projekciji A zacrtnjenje iznosi 2,69 što zadovoljava uvijete norme, a na projekciji B iznosi 2,88 što također ispunjava zahtjeve norme.

Potom slijedi ocjenjivanje.

Na radiogramu odnosno filmu sa lijeve strane nalaze se sve oznake koje radiogram mora imati po normi i standardu. U ovom slučaju to je atest zavarivača, HL045- oznaka kako je varen atest, a u ovom slučaju je to pod kutom od 45°, datum snimanja filma, potom imamo oznaku Z5 što predstavlja žig zavarivača i projekciju.

Na filmu po sredini cijevi nalazi se indikator 13 koji je određen po normi i standardu. Indikator 13 u ovom slučaju se postavlja okomito jer cijev prelazi Ø60, a do Ø60 postavlja se vodoravno. Indikator je najbitniji na radiogramu jer se na njemu gleda vidljiva žica koja određuje kvalitetu radiograma. Žica koja treba biti vidljiva određuje se tako što se zbrajaju debljine zavara i u ovom slučaju to iznosi 11,2 mm plus malo nadvišenje. Iz tablice 5.1. klase B (tablica B.11) očitano je koja se žica treba vidjeti a u ovom slučaju to je žica broj 15.

Tablica 5.1. Tablica za određivanje vidljive žice

B.2 Tehnika snimanja kroz dvije stijenke; dvostruka slika, IQI na strani izvora

Tablica B.5 – Žičani IQI

Kvaliteta slike, klasa A		IQI vrijednost	
Prozračena debljina w, mm			
	do	1,2	W 18
iznad	1,2	do 2	W 17
iznad	2	do 3,5	W 16
iznad	3,5	do 5	W 15
iznad	5	do 7	W 14
iznad	7	do 12	W 13
iznad	12	do 18	W 12
iznad	18	do 30	W 11
iznad	30	do 40	W 10
iznad	40	do 50	W 9
iznad	50	do 60	W 8
iznad	60	do 85	W 7
iznad	85	do 120	W 6
iznad	120	do 220	W 5
iznad	220	do 380	W 4
iznad	380		W 3

Tablica B.7 – Žičani IQI

Kvaliteta slike, klasa B		IQI vrijednost	
Prozračena debljina w, mm			
	do	1,5	W 19
iznad	1,5	do 2,5	W 18
iznad	2,5	do 4	W 17
iznad	4	do 6	W 16
iznad	6	do 8	W 15
iznad	8	do 15	W 14
iznad	15	do 25	W 13
iznad	25	do 38	W 12
iznad	38	do 45	W 11
iznad	45	do 55	W 10
iznad	55	do 70	W 9
iznad	70	do 100	W 8
iznad	100	do 170	W 7
iznad	170	do 250	W 6
iznad	250		W 5

B.3 Tehnika snimanja kroz dvije stijenke; jednostruka ili dvostruka slika, IQI na strani filma

Tablica B.9 – Žičani IQI

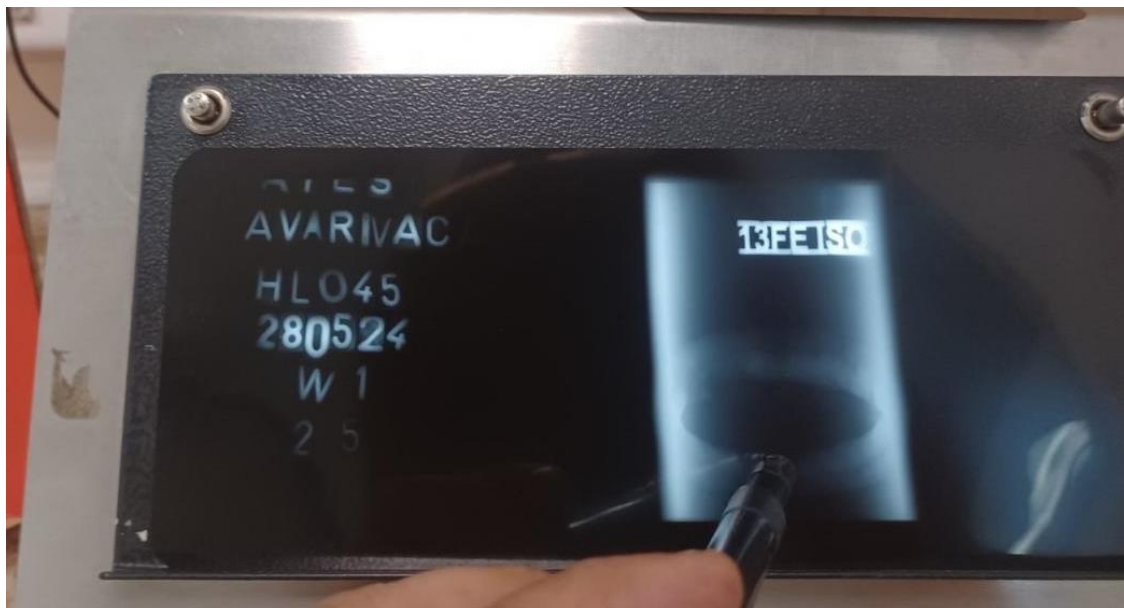
Kvaliteta slike, klasa A		IQI vrijednost	
Prozračena debljina w, mm			
	do	1,2	W 18
iznad	1,2	do 2	W 17
iznad	2	do 3,5	W 16
iznad	3,5	do 5	W 15
iznad	5	do 10	W 14
iznad	10	do 15	W 13
iznad	15	do 22	W 12
iznad	22	do 38	W 11
iznad	38	do 48	W 10
iznad	48	do 60	W 9
iznad	60	do 85	W 8
iznad	85	do 125	W 7
iznad	125	do 225	W 6
iznad	225	do 375	W 5
iznad	375		W 4

Tablica B.11 – Žičani IQI

Kvaliteta slike, klasa B		IQI vrijednost	
Prozračena debljina w, mm			
	do	1,5	W 19
iznad	1,5	do 2,5	W 18
iznad	2,5	do 4	W 17
iznad	4	do 6	W 16
iznad	6	do 12	W 15
iznad	12	do 18	W 14
iznad	18	do 30	W 13
iznad	30	do 45	W 12
iznad	45	do 55	W 11
iznad	55	do 70	W 10
iznad	70	do 100	W 9
iznad	100	do 180	W 8
iznad	180	do 300	W 7
iznad	300		W 6

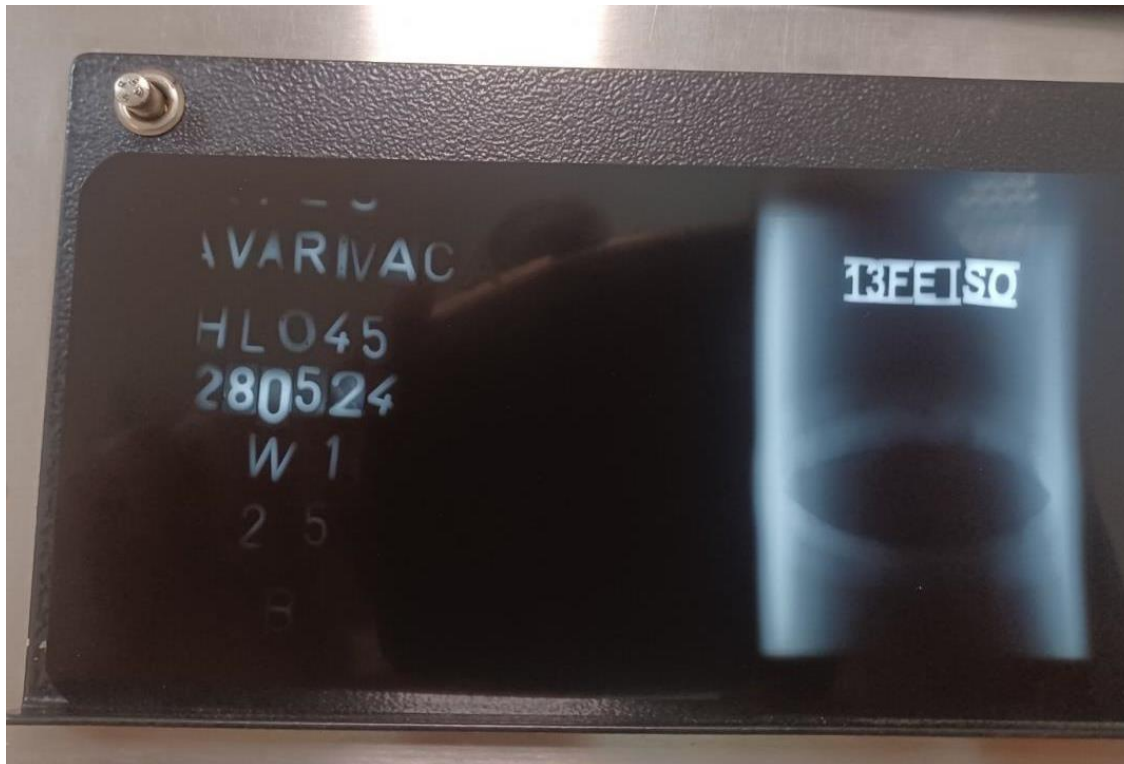
Kriterij prihvatljivosti za ispitani zavar definiran je normom HRN EN ISO 10675-1.

Na slici 5.6. prikazan je film zavara u projekciji A, vidljivo je da nema nikakvih nepravilnosti na zavarenom spoju te je zavar ocjenjen prihvatljivim.



Slika 5.6. Radiogram zavara projekcija A

Na slici 5.7. prikazan je radiogram zavara u projekciji B, zavar je ocjenjen kao prihvatljiv i vidljivo je da nema nikakvih nepravilnosti.



Slika 5.7. Radiogram zavara projekcija B

Pregledom radiograma projekcije A i B utvrđeno je da nema nikakvih nepravilnosti i zavar kvalificiramo kao prihvatljiv.

5.2. Ispitivanje tekućim penetrantima

Za razliku od radiografije koja je dubinska metoda ispitivanja, ispitivanje penetrantima je površinska metoda što znači da se ispituju sve površinske greške vidljive oku.

Za ispitivanje korišteni su penetrant, čistač i razvijач od proizvođača MR CHEMIE koji su prikazani na slici 5.8.



Slika 5.8. Penetrant, čistač i razvijач korišteni tijekom ispitivanja

Penetrant

Korišten je tekući crveni i fluorescentni penetrant proizvođača MR CHEMIE oznake MR 68 NF koji je prigodan za sve metale ali je također prikladan za plastiku i keramiku, zadovoljava sve uvijete propisane normom za ispitivanje penetrantima. Čuva se na temperaturama od + 5 °C do + 45 °C, a može se aplicirati na temperaturama od – 10 °C do + 50 °C. Ovaj penetrant lako uklanjamo s ispitivanih površina vodom ili čistačem.

Čistač

Proizvođač MR CHEMIE oznake MR 79 koristimo ga za čišćenje površina prije ispitivanja te za uklanjanje viška penetranta s površine. Čistač je bezbojan, brzo se suši i ne ostavlja tragove. Koristimo ga na raznim vrstama podloga za otklanjanje razni vrsta nečistoća. Aplicira se na temperaturama od – 30 °C do + 52 °C.

Razvijač

Koristili smo razvijač proizvođača MR CHEMIE oznake MR 70 na bazi otapala. Ovaj razvijač bijele boje brzo se suši, lako se uklanja s površine te također vrlo brzo izvlači penetrant na površinu. Zadovoljava propisane norme za penetratsko ispitivanje. Može se aplicirati na temperaturama od -30 °C do + 50 °C.

Postupak ispitivanja

Prije nego što se nanese penetrant zavar je prvo potrebno očistiti a čisti se suhom krpom. Nakon što je zavar očišćen nanosi se crveni penetrant na zavar otprilike 50 mm sa svake strane zavara. Potrebno je pričekati 15 do 20 minuta da zavareni spoj upije penetrant odnosno da se penetrant uvuče u eventualne nepravilnosti na zavarenom spoju. Nakon 20 minuta višak penetranta skida se krpom koja je ovlažena čistačem i pušta se da se zavar suši na zraku otprilike 10 minuta. Potom na zavareni spoj nanosi se razvijač, vrijeme razvijanja je 10 minuta. Zatim se cijev pregledava vizualno.



Slika 5.9. Prikaz razvijača nakon isteka vremena razvijanja

Na slici 5.9. vidljivo je da na zavaru nema nikakvih pogrešaka, te je zavar ocijenjen kao prihvatljiv.

6. ZAKLJUČAK

Ispitivanje bez razaranja je skupina metoda tehničke analize koja se koristi za procjenu svojstava materijala, dijelova ili kompletnih sustava bez oštećenja ili narušavanja funkcionalnosti testiranog dijela. To omogućuje testiranje bez oštećenja tijekom i nakon proizvodnje, ali i u eksploataciji, čime je proces kontrole kvalitete znatno brži i bolji. Zbog toga je u svakoj grani industrije, tijekom proizvodnje ili tijekom eksploatacije, ispitivanje bez razaranja neizostavan je dio kontrole kvalitete zavarenih spojeva i osnovnih materijala. Normom HRN EN ISO 6520-1:2008 su propisane sve moguće greške koje mogu nastati tijekom procesa zavarivanja.

Nerazorne metode ispitivanja mogu se podijeliti na površinske i volumenske metode. Neke od najpopularnijih nerazornih metoda ispitivanja površine su: vizualni pregled, ispitivanje penetracijom i ispitivanje magnetskim česticama, dok su najpopularnije volumne metode: radiografija i ultrazvučno ispitivanje. Ispitivanje bez razaranja koristi se za otkrivanje grešaka i nepravilnosti u zavarenim spojevima. Greške u zavarenim spojevima su neizbježne, ali se mogu minimizirati pažljivim planiranjem i ispravnom konstrukcijom spojeva. Svaki zavareni spoj mora udovoljavati zahtjevima određenim standardima i normama. Greške u zavarenim spojevima dijele se u šest glavnih skupina: pukotine, šupljine - poroznost, tvrdi uključci, naljepljivanje i nedovoljni provar, greške u obliku zavara i druge greške.

Nakon što je provedeno zavarivanje spojeva, vrši se ispitivanje kvalitete zavara. Ispitivanje provodi za to osposobljeno osoblje. Osposobljavanje se obavlja u centrima za obrazovanje i certificiranje za provjeru kvalitete proizvoda metodama bez razaranja. Razina osposobljavanja se vrši u tri stupnja. Prvim (I) stupnjem se osobama dodjeljuje pojedinačno ovlaštenje za ispitivanje koje mogu obavljati pod nadzorom osoba 2. i 3. Stupnja. Osobe osposobljene za 2. stupanj ispitivanja, imaju pojedinačno ovlaštenje za provođenje ispitivanja i donošenja odluke o metodi koja će se koristiti. Pojedinci koji imaju stečenu treću razinu ispitivanja metodama bez razaranja samostalno obavljaju i upravljaju procesom te mogu procjenjivati i interpretirati dobivene rezultate.

Svaka od nerazornih metoda ispitivanja kvalitete zavara ima određenu razinu pouzdanosti i točnosti koja pak ovisi o nizu faktora. Pouzdanost rezultata je lako odrediti nakon što se definira osjetljivost same metode provjere kvalitete kao i vjerojatnost otkrivanja greške. Najznačajniji parametar ispitivanja metodom bez razaranja je osjetljivost primijenjene metode i ona mora biti propisana unaprijed. Kad je riječ o osjetljivosti, ona se dijeli na četiri razina: osjetljive metode, uvjetno osjetljive metode, metode s graničnom osjetljivosti, radnu osjetljivost te ekvivalentnu osjetljivost. Osjetljivost metode ispitivanja kvalitete povećava se poboljšavanjem sustava ili

tehnika rada, a sama osjetljivost sustava je definirana parametrima greške. Drugi parametar kojim se definira pouzdanost metode je vjerojatnost otkrivanja greške i interpretacija dobivenih rezultata. Što je osjetljivost sustava i primijenjene metode veća (visoka osjetljivost) to je veća vjerojatnost otkrivanja grešaka kritične veličine. Suprotan učinak pri visokoj osjetljivosti metode jest otežano interpretiranje dobivenih rezultata uslijed pojave lažnih greški. Tijekom ispitivanja potrebno je subjektivan utjecaj kontrolora i ispitnog sustava svesti na najmanju moguću mjeru. S obzirom da se pouzdanost povezuje s detektibilnošću greške, stvarna distribucija pojave greški je nepoznata te se stoga ona s obzirom na veličinu greške određuje u skladu s krivuljom distribucije.

U praktičnom dijelu rada vršena je kontrola zavara strojnog dijela OT.24-SI.50 dvjema neovisnim metodama, jednom volumenskom i jednom površinskom metodom. Za površinsku metodu ispitivanja izabrano je ispitivanje penetrantima a radiografiju kao volumnu metodu ispitivanja. Analizom rezultata ispitivanja radiografskom metodom zaključeno je da zadani strojni dio OT.24-SI.50 odnosno zavareni spoj, dimenzija $\text{Ø}60,3 \times 5,6$ mm ne sadrži nikakve nepravilnosti i zadovoljava kriterije prihvatljivosti koje su definirane normom HRN EN ISO 10675-1. Analizom rezultata ispitivanja penetrantima također nisu utvrđene nikakve nepravilnosti na zavarenom spoju te zavareni spoj zadovoljava kriterije definirane normom HRN EN ISO 23277. Stoga je zavar klasificiran prihvatljivim.

7. LITERATURA

- [1] Samardžić, I., Klarić, Š., Despotović, B., Kožul, A. i Topić, V.: „Termini i definicije“, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, s Interneta, <https://old.unisb.hr/kth/zavar/tii/term.html>, 11.5.2024.
- [2] Domazet, Ž. i Krstulović-Opara, L., „Podloge za predavanja iz Metalnih konstrukcija i Konstruiranja“, Fakultet elektrotehnike strojarstva i brodogradnje. Katedra za konstrukcije, Split, 2006.
- [3] Dunder, M., Salopek, G., Horvat, M., Kondić, V. i Marković, M.: „Pristup određivanju zavarljivosti čelika“, Tehnički glasnik, svez. 9, br. 3, pp. 291-297, 2015.
- [4] Vusić, F.: „Zavarljivost čelika visoke čvrstoće“, Zbornik radova Međimurskog veleučilišta u Čakovcu, svez. 10, br. 2, pp. 79-89, 2019.
- [5] ISO 581, „Weldability - Metallic materials - General principles“, ISO copyright office, Geneva, 2005.
- [6] Lukačević, Z.: „Zavarivanje“, Slavonski Brod: Sveučilište J. J. Strossmayer u Osijeku, Strojarski fakultet Slavonski Brod, 1998.
- [7] Samardžić, I., Klarić, Š., Despotović, B., Kožul, A. i Topić, V.: „Greške u zavarenim spojevima u izradi i eksploataciji“, Sveučilište Slavonski Brod. Strojarski fakultet, 8.4.2011. s Interneta, <https://old.unisb.hr/kth/zavar/tii/greske.pdf>, 29.5.2024.
- [8] Matovina, M.: Uloga i značaj kontrole bez razaranja za sigurnost i pouzdanost konstrukcija s debelostjenim zavarima iz konstrukcijskih čelika. Završni rad, Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, 2019.
- [9] HZN: „Zavarivanje i srodni procesi - Razredba geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima - 1. dio: Zavarivanje taljenjem (HRN EN ISO 6520-1:2008; ISO 6520-1:2007; EN ISO 6520-1:2007)“, Zagreb: Hrvatski zavod za norme, 2014.
- [10] Juraga, I., Ljubić, K. i Živčić, M.: „Pogreške u zavarenim spojevima“, Zagreb: Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, 1998.

- [11] ProInstal, „Poroznost pri zavarivanju, vrste: što je uzrokuje i kako to popraviti“, ProInstal, 19.12.2023. s Interneta, <https://proinstal.hr/poroznost-pri-zavarivanju-vrste-sto-je-uzrokuje-i-kako-to-popraviti/>, 29.5.2024.
- [12] Singh, R.: „Applied Welding Engineering: Processes, Codes and Standards“, Waltham: Elsevier Inc., 2012.
- [13] Pečur, I. B., Skazlić, M., Gabrijel, I. i Milovanović, B.: „Nerazorna ispitivanja“, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2012/2013.
- [14] Pondt, „Radiografska kontrola“, Pondt, 28.3.2022. s Interneta, <https://pondt.hr/radiografska-kontrola/>, 29.5.2024.
- [15] Narodne novine, Pravilnik o granicama ozračenja, preporučenom doznom ograničenju i procjenjivanju osobnog ozračenja, svez. 38, Zagreb: Narodne novine d.d., 2018, p. 739.
- [16] Novosel, M., Cajner, F. i Krumes, D.: „Željezni materijali. 2. dio: Konstrukcijski čelici“, Slavonski Brod: Strojarski fakultet Sveučilišta u Slavonskom Brodu, 1994.
- [17] CENI, „Norme“, Hrvatski centar za nerazorna ispitivanja, 17.11.2020. s Interneta, <https://ceni.hr/norme/>, 29.5.2024.
- [18] Muhsen, A. A.: „Non-Destructive Testing Methods and their Application in Technology“, 2021.
- [19] Hrvatska tehnička enciklopedija, „defektoskopija“, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2018. s Interneta, <https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/defektoskopija.pdf>, 29.5.2024.
- [20] Tvrtke.hr, „IDEF d.o.o. Industrijska defektoskopija“, Tvrtke.hr, 2024. s Interneta, <https://www.tvrtke.hr/zagreb/tresnjevka/mjerni-instrumenti/idef>, 29.5.2024.
- [21] Pondt, „Magnetska kontrola“, Pondt, 8.6.2020. s Interneta, <https://pondt.hr/magnetska-kontrola/>, 29.5.2024.
- [22] Krstelj, V. i Lypolt, A.: „Penetrantska kontrola“, Zagreb: Hrvatsko društvo za kontrolu bez razaranja, 2005.
- [23] Pondt, „Penetrantska kontrola“, Pondt, 8.6.2020. s Interneta, <https://pondt.hr/penetrantska-kontrola/>, 29.5.2024.

- [24] Eurolab, „Ispitivanje bez razaranja,“ Eurolab, 2020. s Interneta, <https://www.denetim.com/bs/muayene/tahribatsiz-muayene/girdap-akimlari-testi/>, 29.5.2024.
- [25] Proinstal, „Endoskop vs boreskop,“ Proinstal, 19.12.2023. s Interneta, <https://proinstal.hr/endoskop-protiv-boroskopa/>, 29.5.2024.
- [26] Pipe Masters, „Know the advantages and disadvantages,“ Pipe Masters, 28.5.2020. s Interneta, <https://pipemasters.pt/blog/en/industry/visual-inspection/>, 29.5.2024.
- [27] HZN: „Nerazorno ispitivanje - Kvalifikacija i certifikacija NDT osoblja (HRN EN ISO 9712:2022; ISO 9712:2021; EN ISO 9712:2022)“, Zagreb: Hrvatski zavod za normizaciju, 2022.
- [28] Krstelj, V.: „Ultrazvučna kontrola“, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2003.

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Utjecajni čimbenici na zavarljivost i njihova međusobna ovisnost [4]	1
Slika 2.1. Radiografska snimka mjesta zavarenog spoja cijevi i postupak ispitivanja radiografijom [14]	16
Slika 2.2. Princip rada radiografskog snimanja [18, p. 18]	18
Slika 2.3. SUM Go ultrazvučni defektoskop [20]	21
Slika 2.4. Utjecaj površinski vezanog zarez (pukotine) na stvaranje rasipnog magnetskog polja [19, p. 193]	22
Slika 2.5. Ispitivanje fluorescirajućim magnetskim praškom [21]	23
Slika 2.6. Princip djelovanja ferofluks aparata [19, p. 194]	23
Slika 2.7. Postupak ispitivanja penetrantima [obrada autorice prema [18, p. 7]	24
Slika 2.8. Ispitivanje zavara penetrantima [23]	25
Slika 2.9. Uređaj za ispitivanje vrtložnim strujama [24]	26
Slika 2.10. Boroskop za pregled zavarenih spojeva [25]	27
Slika 4.1. Shematski prikaz ishoda ispitivanja [8]	33
Slika 4.2. Distribucija i detektibilnost grešaka [8]	34
Slika 5.1. Prikaz zavarenog spoja strojnog dijela OT.24-SI.50	35
Slika 5.2. Rendgen uređaj korišten pri ispitivanju.	36
Slika 5.3: Norma HRN EN ISO 17636-1	36
Slika 5.4. Upravljačka ploča rendgena	37
Slika 5.5. Prikaz uređaja za izradu filmova	37
Slika 5.6. Radiogram zavara projekcija A	39
Slika 5.7. Radiogram zavara projekcija B	39
Slika 5.8. Penetrant, čistač i razvijlač korišteni tijekom ispitivanja	40
Slika 5.9. Prikaz razvijlača nakon isteka vremena razvijanja	42

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Razredba nepravilnosti u zavarenim spojevima [9]	4
Tablica 2.2. Klasifikacija pukotina prema HRN EN ISO 6520-1:2008. [9]	5
Tablica 2.3. Klasifikacija šupljina prema HRN EN ISO 6520-1:2008. [9].....	6
Tablica 2.4. Klasifikacija čvrstih uključaka prema HRN EN ISO 6520-1:2008. [9].....	8
Tablica 2.5. Klasifikacija grešaka uslijed nedovoljnog spajanja i nepotpune penetracije prema HRN EN ISO 6520-1:2008. [9].....	9
Tablica 2.6. Klasifikacija pogrešaka oblika zavara prema HRN EN ISO 6520-1:2008. [9].....	10
Tablica 2.7. Klasifikacija ostalih pogrešaka prema HRN EN ISO 6520-1:2008. [9]	13
Tablica 2.8. Metode ispitivanja nepravilnosti u zavarenim spojevima [8].....	14
Tablica 2.9. Prednosti i nedostaci metoda nerazornog ispitivanja [13].....	14
Tablica 2.10. Mogućnost primjene metoda bez razaranja za otkrivanje pogrešaka zavara [10, p. 90]	15
Tablica 2.11 Najčešće korišteni izotopi za gama zračenje [6].....	19
Tablica 2.12. Prednosti i nedostaci ultrazvučne defektoskopije [10, p. 102], [19, p. 192]	20
Tablica 2.13. Prednosti i nedostaci magnetske defektoskopije, [19, pp. 193-194]	22
Tablica 2.14. Prednosti i nedostaci penetrantske metode ispitivanja zavara [10].....	25
Tablica 2.15. Prednosti i nedostaci vizualne kontrole zavarenog spoja [26]	28
Tablica 3.1. Zadaci i ovlaštenja osoblja ovisno o razini osposobljenosti [27]	30
Tablica 5.1. Tablica za određivanje vidljive žice	38

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U ovom završnom radu govorili smo o metodama ispitivanja bez razaranja, opisane su neke od najčešćih metoda ispitivanja i pogrešaka koje je moguće otkriti ovim metodama ispitivanja.

U praktičnom djelu rada ispitan je strojni dio na dva načina, volumenskom i površinskom metodom. Analizom rezultata radiografskog i penetrantskog ispitivanja naš zavar ocijenjen je prihvatljivim.

Ključne riječi: nerazorna ispitivanja, ispitivanja bez razaranja, radiografsko ispitivanje, ispitivanje ultrazvukom, ispitivanje magnetskim i elektromagnetskim česticama, penetrantsko ispitivanje, vizualno ispitivanje, pogreške u zavarenim spojevima.

SUMMARY AND KEYWORDS

In this thesis, we talked about non-destructive testing methods, we described some of the most common testing methods and defects in welded joints that we can detect with these testing methods.

In the practical part of the thesis, we tested the machine part in two ways, by volumetric and surface method. Analyzing the results of radiographic and penetrant testing, our weld was rated acceptable.

Keywords: non-destructive testing, radiographic testing, ultrasound testing, magnetic and electromagnetic particle testing, penetrant testing, visual testing, defects in welded joints.