

ULOGA I ZNAČAJ KONTROLE BEZ RAZARANJA ZA SIGURNOST I POUZDANOST KONSTRUKCIJA S DEBELOSTIJENIM ZAVARIMA IZ KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA

Matovina, Matija

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:128:375067>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PROIZVODNO STROJARSTVO

MATIJA MATOVINA

ULOGA I ZNAČAJ KONTROLE BEZ RAZARANJA ZA SIGURNOST I
POUZDANOST KONSTRUKCIJA S DEBELOSTJENIM ZAVARIMA IZ
KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA

ZAVRŠNI RAD

KARLOVAC, 2019.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
PROIZVODNO STROJARSTVO

MATIJA MATOVINA

ULOGA I ZNAČAJ KONTROLE BEZ RAZARANJA ZA SIGURNOST I
POUZDANOST KONSTRUKCIJA S DEBELOSTJENIM ZAVARIMA IZ
KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Tihana Kostadin, mag. ing. stoj., viši predavač

KARLOVAC, 2019.

| | | | |
|---|--|---|---|
|  | VELEUČILIŠTE U KARLOVCU Trg J.J.Strossmayera 9 HR - 47000, Karlovac, Croatia Tel. +385 - (0)47 - 843-500 Fax. +385 - (0)47 - 843-503 e-mail: dekanat @ vuka.hr | Klasa: 602-11/18-01/____ Ur.broj: 2133-61-04-18-01 |  CRS <small>IRN EN ISO 9001:2015</small> |
| | ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA | Datum: 06.09.2019 | |

| | | | |
|---|------------------------|---------------------------|--|
| Ime i prezime | MATIJA MATOVINA | | |
| OIB / JMBG | | | |
| Adresa | | | |
| Tel. / Mob./e-mail | | | |
| Matični broj studenta | | | |
| JMBAG | | | |
| Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija) | X preddiplomski | specijalistički diplomski | |
| Naziv studija | | | |
| Godina upisa | | | |
| Datum podnošenja molbe | | | |
| Vlastoručni potpis studenta/studentice | | | |

| | |
|--|------------------------------------|
| Naslov teme na hrvatskom: ULOGA I ZNAČAJ KONTROLE BEZ RAZARANJA ZA SIGURNOST I POUZDANOST KONSTRUKCIJA S DEBELOSTJENIM ZAVARIMA IZ KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA | |
| Naslov teme na engleskom: THE ROLE AND SIGNIFICANCE OF NON-DESTRUCTIVE TESTING FOR THE SAFETY AND RELIABILITY OF STRUCTURES WITH THICKENED WELDS MADE FROM STRUCTURAL STEELS | |
| Opis zadatka: Nakon uvoda potrebno je opisati metode kontrole bez razaranja i njihovu ulogu u detekciji grešaka kod zavarenih konstrukcija. Također ukratko opisati konstrukcijske čelike, njihova svojstva i primjenu u zavarenim konstrukcijama. U eksperimentalnom dijelu obraditi konkretan primjer provedbe nerazornih ispitivanja na dijelovima generatora. Na kraju napraviti analizu rezultata temeljem kriterija prihvatljivosti i napisati zaključak. Rad urediti prema pravilima VUK. | |
| Mentor: | Predsjednik Ispitnog povjerenstva: |

Izjava:

Izjavljujem da sam ja – student Matija Matovina, OIB: 03704888701, MB: 0110615020

Upisan kao apsvolent akademske godine 2018/2019 radio ovaj rad samostalno koristeći se znanjem stečenim tokom obrazovanja te uz stručne savjete i pomoć mentorice Tihane Kostadin i kod eksperimentalnog dijela u tvrtki Tekum d.o.o. pod vodstvom mr.sc Mikana Slijepca, dipl.ing.stroj. kojem se ovim putem srdačno zahvaljujem.

Karlovac, rujan 2019.

Sažetak:

U radu je teoretski i praktično obrađena primjena kontrole bez razaranja (KBR) na zavarene konstrukcije. Obrađene su metode KBR-a s naglaskom na zavarene spojeve i prikazan je pristup kako pratiti pouzdanost ovih procesa. Također je prikazana i važnost KBR-a za sigurnost konstrukcije s obzirom na opasnosti koje nastaju uslijed koncentracije naprezanja.

Posebno je naglašena kontrola ultrazvukom zbog njene važnosti kod ocjene homogenosti zavarenog spoja po presjeku zavara. Dan je kratki opis konstrukcijskih čelika s naglaskom na sitnozrnati čelik S355J2 + N koji je u širokoj primjeni pri izradi zavarenih konstrukcija za hidroturbine i generatore.

Na primjeru zavarene konstrukcije izlazne cijevi (difuzora) hidroturbine, izvršena je kontrola bez razaranja sa više metoda KBR-a čime je praktički u pogonskim uvjetima pokazan značaj i uloga KBR-a.

Ključne riječi: Kontrola bez razaranja, zavareni spojevi, sitnozrnati čelici, koncentracija naprezanja, makrodefekti, pouzdanost.

The role and significance of non-destructive testing for the safety and reliability of structures with thickened weld made from structural steels

Summary:

In this graduate thesis the application of non-destructive testing (NDT) on welded constructions is theoretically and practically processed. The NDT methods with emphasis on welded joints have been elaborated and the approach is shown to monitor the reliability of these processes. It also shows the importance of NDT for construction safety with regard to hazards arising from stress concentration.

Ultrasound control is particularly emphasized because of its importance in assessing the homogeneity of the welded joints on its cross section. A brief description of structural steels with an emphasis on fine-grained S355J2 + N steels which is widely used in the construction of welded structures for hydro turbines and generators.

On example of draft tube a non-destructive inspection of several NDT methods was performed, demonstrating the importance and role of NDT in practical operating conditions.

Key words: NDT testing, welding joints, fine – grain steels, fatigue stress, macrodefects, reliability.

Sadržaj:

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | UVOD | 1 |
| 2. | METODE KONTROLE BEZ RAZARANJA | 2 |
| 2.1 | OPĆENITO O KONTROLI ZAVARA..... | 2 |
| 2.2 | PRIMJENA METODA KBR-a NA ZAVARENE SPOJEVE | 3 |
| 2.3 | OPIS METODA..... | 4 |
| 2.3.1 | VIZUALNA METODA (VT) | 4 |
| 2.3.2 | ULTRAZVUČNA METODA (UT) | 5 |
| 2.3.3 | MAGNETSKA METODA (MT)..... | 10 |
| 2.3.4 | RADIOGRAFSKA METODA (RT) | 11 |
| 2.3.5 | PENETRANTSKA METODA (PT) | 12 |
| 2.4 | STRUČNO OSOBLJE U KONTROLI BEZ RAZARANJA..... | 13 |
| 2.5 | POUZDANOST KONTROLE BEZ RAZARANJA | 15 |
| 2.5.1 | OSJETLIVOST METODA KONTROLE BEZ RAZARANJA | 15 |
| 2.5.2 | VJEROJATNOST DETEKCIJE GREŠKE I INTERPRETACIJE REZULTATA | 16 |
| 3. | MAKRO I MIKRO NEPRAVILNOSTI | 21 |
| 3.1. | OPĆENITO..... | 21 |
| 3.2. | ZAOBLJENE MAKRONEPRAVILNOSTI | 22 |
| 3.3. | IZDUŽENE MAKRONEPRAVILNOSTI | 23 |
| 4. | POGREŠKE U ZAVARENOM SPOJU..... | 25 |
| 4.1. | PUKOTINE (skupina 100) | 25 |
| 4.2. | ŠUPLJINE ILI POROZNOST (skupina 200) | 26 |
| 4.3. | ČVRSTI UKLJUČCI (skupina 300)..... | 27 |
| 4.4. | NALJEPLJIVANJE I NEDOVOLJAN PROVAR (skupina 400) | 28 |
| 4.5. | POGREŠKE OBLIKA ZAVARA (skupina 500) | 29 |
| 4.6. | OSTALE POGREŠKE (skupina 600)..... | 30 |
| 5. | KONSTRUKCIJSKI ČELICI | 31 |
| 6. | EKSPERIMENTALNI DIO | 34 |
| 6.1. | PLAN EKSPERIMENTA | 34 |
| 6.2. | DOKUMENTACIJA ZA ZAVARENU KONSTRUKCIJU..... | 34 |

| | | |
|--------|-------------------------------|----|
| 6.3. | OPSEG ISPITIVANJA | 37 |
| 6.3.1. | TEHNOLOŠKI ZAVARI | 37 |
| 6.3.2. | KONTROLA PENETRANTIMA | 38 |
| 6.3.3. | ULTRAZVUČNA KONTROLA..... | 38 |
| 6.3.4. | KRITERIJ PRIHVATLJIVOSTI..... | 39 |
| 6.3.5. | PROVOĐENJE ISPITIVANJA..... | 40 |
| 6.3.6. | ANALIZA REZULTATA | 50 |
| 7. | ZAKLJUČAK..... | 51 |
| | LITERATURA | |
| | PRILOZI | |

Popis slika:

| | |
|--|----|
| Slika 1. Vizualna kontrola [2] | 5 |
| Slika 2. Ispitivanje zavara ultrazvučnom metodom [2] | 6 |
| Slika 3. Primjer širenja ultrazvučnog vala iz sonde po presjeku materijala [2] | 7 |
| Slika 4. Projekcija ultrazvučnog puta [2] | 7 |
| Slika 5. Reflektor na donjoj stijenci materijala [2]..... | 8 |
| Slika 6. Reflektor na površini materijala [2] | 8 |
| Slika 7. Reflektor u presjeku materijala [2] | 9 |
| Slika 8. A-prikaz na ultrazvučnom aparatu [2]..... | 10 |
| Slika 9. Prikaz linearnih indikacija. [2] | 11 |
| Slika 10. Prikaz fotografija zavarenih spojeva nakon RT snimanja. [1] | 12 |
| Slika 11. Prikaz linearnih i točkastih indikacija. [2]..... | 13 |
| Slika 12. Shematski prikaz ishoda ispitivanja [2] | 17 |
| Slika 13. Distribucija i detektibilnost grešaka [3]..... | 18 |
| Slika 14. Primjer zaobljenih nepravilnosti prema CCH70-PT [4] | 22 |
| Slika 15. Primjer koncentracije naprezanja kod pukotine [2]..... | 23 |
| Slika 16. Pukotina u zavaru. [5] | 26 |
| Slika 17. Poroznost u zavaru. [6] | 27 |
| Slika 18. Primjer šljake u zavaru [7]..... | 28 |
| Slika 19. Primjer naljepljivanja (materijal zavara nije spojen). [8] | 29 |
| Slika 20. Primjer kontinuiranog zajeda. [9] | 29 |
| Slika 21. Primjer onečišćenja zavara kapljicama materijala [2]..... | 30 |
| Slika 22. Dijagram naprezanje – deformacija [11]..... | 31 |
| Slika 23. Dijagram ovisnosti udarne žilavosti o temperaturi ispitivanja [11] | 32 |
| Slika 24. Izvedbeni plan kontrole kvalitete br. 2002506 [2]..... | 36 |
| Slika 25. Spojni zavari na poziciji 2 (konusna cijev). [2]..... | 37 |
| Slika 26. Spojni zavar između pozicija 2 i 3 [2] | 38 |
| Slika 27. Zavarena konstrukcija izlazne cijevi hidroturbine [2] | 40 |
| Slika 28. Kontrola visine zavara sa šablonom za zavare [2]..... | 40 |
| Slika 29. Kontrola visine zavara sa šablonom za zavare [2]..... | 41 |
| Slika 30. Položaj nepravilnosti [2]..... | 41 |
| Slika 31. Detalj nepravilnosti [2]..... | 41 |
| Slika 32. Položaj nepravilnosti [2]..... | 41 |
| Slika 33. Detalj nepravilnosti [2]..... | 41 |
| Slika 34. Magnetizacija indikatora [2] | 42 |
| Slika 35. Detalj indikatora [2] | 42 |
| Slika 36. Položaj indikacije broj 1 na nosaču glavine [2] | 42 |
| Slika 37. Detalj indikacije broj 1 dužine 8 mm [2] | 43 |
| Slika 38. položaj indikacije broj 2 na nosaču glavine [2] | 43 |
| Slika 39. Detalj indikacije broj 2 dužine 6 mm [2] | 43 |

| | |
|--|----|
| Slika 40. Nanesen penetrant [2] | 44 |
| Slika 41. Nanesen razvijač [2] | 44 |
| Slika 42. Razvijene indikacije na referentnom bloku [2] | 44 |
| Slika 43. Ispitivanje zavara sa unutarnje strane izlazne cijevi [2] | 45 |
| Slika 45. Položaj indikacije broj 1 na kružnom tehnološkom zavaru plašta [2] | 45 |
| Slika 46. Detalj indikacije broj 1, dužine 4mm [2] | 45 |
| Slika 47. Položaj indikacije broj 2 na vertikalnom tehnološkom zavaru plašta [2] | 46 |
| Slika 48. Detalj indikacije broj 2, dužine 6mm [2] | 46 |
| Slika 49. Kalibracija mjernog područja na kalibracijskom bloku V2 [2] | 47 |
| Slika 50. Postavljanje prve točke referentne krivulje na referentnom bloku [2] | 47 |
| Slika 51. Postavljanje druge točke referentne krivulje na referentnom bloku [2] | 47 |
| Slika 52. Postavljanje treće točke referentne krivulje na referentnom bloku [2] | 48 |
| Slika 53. Položaj sonde za skeniranje cijelog volumena zavara [2] | 48 |
| Slika 53. Ultrazvučno ispitivanje kružnog tehnološkog zavara plašta izlazne cijevi [2] | 49 |
| Slika 54. Ultrazvučno ispitivanje vertikalnog tehnološkog zavara plašta izlazne cijevi [2] | 49 |
| Slika 55. Echo-gram prihvatljive indikacije na vertikalnom tehnološkom zavaru [2] | 49 |

Popis tablica:

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Metode ispitivanja grešaka | 2 |
| Tablica 2. Djelatnost KBR osoblja | 14 |
| Tablica 3. Mogućnost primjene metode bez razaranja | 20 |
| Tablica 4. Klasifikacija indikacije | 39 |

POPIS OZNAKA:

KBR – Kontrola bez razaranja

VT – Vizualna kontrola (*eng. Visual Testing*)

PT – Ispitivanje penetrantima (*eng. Penetrant Testing*)

MT – Ispitivanje magnetskim česticama (*eng. Magnetic Particle Testing*)

UT – Ispitivanje ultrazvukom (*eng. Ultrasonic Testing*)

RT – Radiografsko ispitivanje (*eng. Radiographic Testing*)

a [mm] – Projekcijski razmak između sonde i reflektora

s [mm] – Dužina zvučnog puta

t [mm] – Stvarna dubina reflektora

β [°] – kut prostiranja ultrazvuka u materijalu

C_L [km/s] – brzina longitudinalnog vala u čeliku

C_v [km/s] – brzina transferzalnog vala u čeliku

POD – Vjerojatnost detekcije (*eng. Probability of Detection*)

POR – Vjerojatnost interpretacije (*eng. Probability of Registration*)

n – broj grešaka u intervalu $x_{KR} < x < x_M$

nU – teoretski ukupni broj grešaka

x_{KR} – najmanja greška koja se može otkriti

x_M – greška koja se otkriva s najvećom vjerojatnošću

σ_0 [N/mm²] – osnovno naprezanje

σ_k [N/mm²] – koncentracija naprezanja

p/2 [mm] – projekcija zvučnog puta do donje stijenke materijala

p [mm] – projekcija zvučnog puta do gornje stijenke materijala

$R_{p0,2}$ [Mpa] – granica tečenja

R_m [Mpa] – vlačna čvrstoća

E [Mpa] – modul elastičnosti

A5 [%] – istezljivost

1. UVOD

Osnovni problem zavarljivosti materijala je osjetljivost zavarenih spojeva prema nastajanju pukotina. Izrada zavarenih konstrukcija za hidroturbine i generatore izvodi se uz kontrolirane postupke zavarivanja i izbor materijala.

Svi proračuni koji se koriste za dimenzioniranje konstrukcija podrazumijevaju da su zavareni spojevi homogeni i da imaju iste vrijednosti mehaničkih svojstava kao i osnovni materijal.

Budući da veliki broj čimbenika ima utjecaj na kvalitetu zavarenog spoja, nameće se zahtjev za pouzdano utvrđivanje homogenosti zavarenih spojeva. Današnje metode kontrole bez razaranja (KBR) i primjenjivi standardi postižu zadovoljavajuće rezultate u sprječavanju ugradnje konstrukcije sa nehomogenim zavarima.

U ovom radu na primjeru zavarene konstrukcije izlazne cijevi (difuzora) hidroturbine prikazana je primjena i mogućnosti KBR-a za utvrđivanje homogenosti zavarenih spojeva. Posebno je prikazana mogućnost KBR-a na otkrivanju oku nevidljivih izduženih grešaka tipa pukotina. Obrađene su karakteristike čelika S355J2 + N i njegova svojstva.

2. METODE KONTROLE BEZ RAZARANJA

2.1 OPĆENITO O KONTROLI ZAVARA

Učestala je pojava da uslijed nekontroliranog postupka zavarivanja dolazi do katastrofalnih posljedica na vrlo važnim objektima (kotlovi, turbine, brodovi, mostovi, i drugo...), zbog čega je došlo do potrebe razvoja metoda ispitivanja i kontrole zavarenih spojeva, kao i poduzimanja niza mjera u tehnologiji zavarivanja kroz obveznu izradu kvalifikacije postupka zavarivanja i atestaciju zavarivača. Ispitivanje zavarenih spojeva na konstrukcijama može se izvršiti s razornim i nerazornim metodama.

Metode ispitivanja su se razvile s ciljem da se utvrde moguće pogreške kod postupaka zavarivanja. Grubom podjelom mogućih pogrešaka na zavarenim konstrukcijama razlikujemo tri osnovne skupine:

1. Loša mehanička svojstva: niska ili previsoka granica tečenja i čvrstoća, mala istezljivost, niska žilavost, niska ili previsoka tvrdoća i nedovoljna otpornost na koroziju.
2. Površinske greške: odstupanje dimenzija uslijed deformacija, loše pripreme zavarenog spoja, neispravne veličine zavara i oblika zavara, površinske nehomogenosti tipa zaobljenih i izduženih grešaka.
3. Unutarnje greške kao što su: poroznost, nemetalni uključci, nepotpuno staljivanje, nedovoljan provar i pukotine.

Primjenjive metode ispitivanja za registriranje mogućih grešaka u zavarenim spojevima su:

Tablica 1. Metode ispitivanja grešaka

| Greške | Metoda ispitivanja |
|-------------------------|--|
| Loša mehanička svojstva | Kontrola s razaranjem uz primjenu standardnih proba i postupaka |
| Površinske greške | Kontrole bez razaranja: vizualna (VT), magnetska (MT) i kontrola penetrantima (PT) |
| Unutarnje greške | Kontrole bez razaranja: ultrazvučna (UT) i radiografska (RT) |

Metode kontrole bez razaranja uspješno pronalaze greške u vrlo širokom rasponu proizvoda i materijala te se radi toga primjena kontrole bez razaranja sve više širi. Međutim, razorne i nerazorne metode kontrole su kompatibilne i zajedno primijenjene omogućavaju osiguranje potrebne kvalitete.

Osnovne prednosti i nedostaci nerazornih metoda kontrole kvalitete u usporedbi s razornim su:

osnovne prednosti:

- ispitivanja se mogu provoditi izravno na proizvodu ili konstrukciji,
- moguće je provoditi 100% kontrolu,
- uzorak je reprezentativan, tj. nije potrebno temeljem ispitanog uzorka zaključivati o drugom uzorku ili cijelom skupu,
- objekt je moguće ispitati s više metoda sukcesivno,
- ispitivanje je moguće ponoviti više puta na istom objektu,
- moguće je provoditi kontrolu objekta u eksploataciji,
- kontrola se može često provesti i bez zaustavljanja proizvodnje,
- moguće je pratiti učinke graška kumulativno, ili općenito utjecaj radnih uvjeta na stanje objekta,
- može se pratiti pojava i širenje loma, što je izuzetno korisno u svrhu stjecanja iskustva o konstrukciji za razradu kriterija kvalitete, kao i za određivanje lomne žilavosti materijala,
- oprema je u većini metoda razvijena u vidu prijenosne i prijevozne te je moguć rad na terenu.

osnovna ograničenja:

- svojstva objekta i kvalitete se u većini metoda mjere indirektno,
- pojedine metode kontrole zahtijevaju pojačanu zaštitu na radu,
- oprema je uvozna, tj. za sada nema domaćih proizvođača. [12]

2.2 PRIMJENA METODA KBR-a NA ZAVARENE SPOJEVE

Budući da se metode kontrole bez razaranja temelje na principu interakcije materijala i unesene energije ili sredstva s kojim je materijal doveden u kontakt, uobičajena je primjena slijedećih metoda KBR-a za ispitivanje zavarenih spojeva:

1. vizualna metoda (VT),
2. penetrantska, kapilarna metoda (PT),
3. elektro i/ili magnetska metoda (MT),
4. ultrazvučna metoda (UT),
5. metoda ionizirajućeg zračenja (RT). [13]

2.3 OPIS METODA

2.3.1 VIZUALNA METODA (VT)

Vizualna kontrola je prva nastala metoda kontrole kvalitete koja se temelji na međusobnom odnosu svjetlosti i površine ispitivanog objekta i kao takva služi za otkrivanje mikro ili makro pogrešaka uz pomoć optičkih uređaja i pomagala. Danas na raspolaganju imamo brojna tehnička pomagala za provedbu kontrole mjera, površine i ostalog. Kao najosnovnije pomagalo koristimo povećalo, dok je znatno zastupljenija uporaba endoskopa kojim uz podršku računala omogućuje pregled unutrašnjosti i nepristupačnih površina. Za kontrolu mjera koristimo standardna pomagala kao što su pomična mjerila, mikrometri, dubinomjer te razne šablone. Vizualnom kontrolom utvrđujemo stanje površine ispitivanog objekta, njegove mjere, odstupanja, pripadnost i usklađenost te najčešće prethodi ostalim metodama bez razaranja. Zbog opće prihvaćenog mišljenja da je metoda jasna i jednostavna, u tome leži potencijalna opasnost u nepoznavanju i razlikovanju eventualnih pogrešaka koji mogu utjecati na rad pozicije u eksploataciji. Iako je ovisna o sposobnosti, preciznosti i pouzdanosti samoga kontrolora, izborom odgovarajuće tehnike subjektivni utjecaj treba svesti na najmanju moguću mjeru. Dimenzijska kontrola i kontrola oblika značajniji su dio ove kontrole jer je većina dijelova izrađena sa strogim tolerancijama i dopuštenim odstupanjima i u skladu sa time se koristi različita oprema za mjerenje. (1)

Tijekom izrade zavarenih konstrukcija vizualna kontrola ima naglašeno preventivno djelovanje koje se sastoji u slijedećem:

- a) Vizualna kontrola pripreme spoja:
 - kontrola oblika i dimenzija spoja,
 - kontrola čistoće površine spoja,
 - kontrola načina spajanja i pozicioniranja dijelova prema dokumentaciji.

- b) Vizualna kontrola tijekom zavarivanja:
 - kontrola čišćenja nakon svakog prolaza,
 - registriranje vidljivih nepravilnosti i pukotina,
 - kontrola oblika deponiranog sloja.

- c) Vizualna kontrola nakon zavarivanja:
 - kontrola čistoće zavara,
 - registriranje vidljivih površinskih grešaka,
 - kontrola oblika i dimenzije zavara. [13]



Slika 1. Vizualna kontrola.¹ [2]

2.3.2 ULTRAZVUČNA METODA (UT)

Primjena ultrazvuka za ispitivanje homogenosti materijala, koristi se za pronalaženje i određivanje položaja defekta, koji se mogu nalaziti na dubini od 1 do 2000 mm, a u nekim slučajevima (ovisno o materijalu) čak i većih debljina.

Ispitivanje se provodi na metalnim i nemetalnim materijalima pomoću emitiranja ultrazvučnih valova kroz materijal. Ultrazvuk nastaje fizičkim vibriranjem izvora (piezoelektrični element) frekvencije iznad 20 000 Hz što omogućuje njegovo prodiranje u materijal.

Prolaskom ultrazvuka kroz materijal dolazi i do određenog rasipanja zbog čega nastaju razlike između količine ulaznih i izlaznih valova, što se registrira na ultrazvučnim aparatima.

Kod ultrazvučnih uređaja za dobivanje ultrazvučnih valova najčešće se koristi piezoelektrični element. Pri tome se korištenjem piezokristala vrši pretvaranje električne energije u mehaničku učestalost od 500 kHz do 1000MHz. Za ispitivanje materijala koriste se uglavnom frekvencije od 1 do 6 MHz. Za stvaranje ultrazvučnih valova koriste se ultrazvučne sonde u kojima piezokristal usmjerava valove u materijal. Sonde su oblikovane tako da stvaraju longitudinalne (uzdužne), transverzalne (poprečne) i površinske valove.

Za ispitivanje zavarenih spojeva čeličnih konstrukcija, koriste se uglavnom transverzalne (kutne) sonde i u manjem opsegu longitudinalne (normalne) sonde.

Frekvencija ispitnih sondi uglavnom je 2MHz i 4MHz.

Brzina prodiranja ultrazvučnih valova u materijal je različita za svaki tip ultrazvučnog vala i materijal u koji prodire. [13]

Za čelik brzine ultrazvučnih valova su slijedeće:

- Longitudinalni val $C_L = 6,0$ km/s
- Transverzalni val $C_V = 3,3$ km/s

¹ Vidljiva je linearna indikacija na površini konstrukcije koja je već zaštićena zaštitom protiv korozije.;

Longitudinalni val – uzdužni val (L – val), je onaj val kod kojega čestice titraju u smjeru širenja vala, stoga uzrokuju zgušćenja i razrjeđenja u sredstvu u kojem se šire.

Transverzalni val – poprečni val (T – val), je onaj val kod kojega čestice titraju okomito na smjer širenja vala, stoga ne uzrokuju zgušćenja ni razrjeđivanja u materijalu.

Primjena metode ultrazvuka u kontroli zavarenih spojeva postaje dominantna iz slijedećih razloga:

- područje primjene s obzirom na debljinu ispitnog uzorka je neograničeno,
- dovoljan je pristup samo s jedne strane,
- provođenje ispitivanja je bezopasno,
- uređaj i pribor su malih dimenzija i male težine,
- osjetljivost metode je relativno visoka,
- metoda je povoljna za elektroničku obradu,
- metoda je relativno neosjetljiva na okolinu. [14]



Slika 2. Ispitivanje zavora ultrazvučnom metodom.² [2]

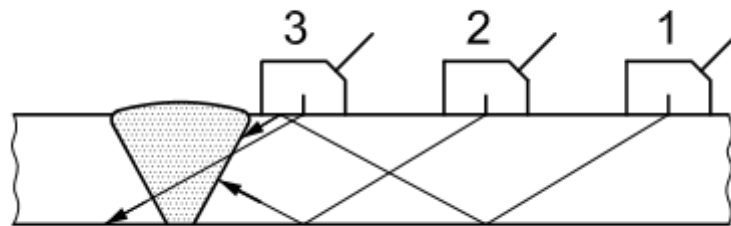
U ovome radu iz područja ispitivanja ultrazvukom dano je objašnjenje UT metode koje obuhvaća princip rada s transverzalnim valovima (kutne sonde) koji se primjenjuju pri ispitivanju zavarenih spojeva.

Ispitivanje zavarenih spojeva provodi se s umjerenim uređajem, kojim se može točno prozvučiti cijeli volumen zavora i utvrditi točna udaljenost reflektirajuće indikacije, od koje dobivamo najveći odjek.

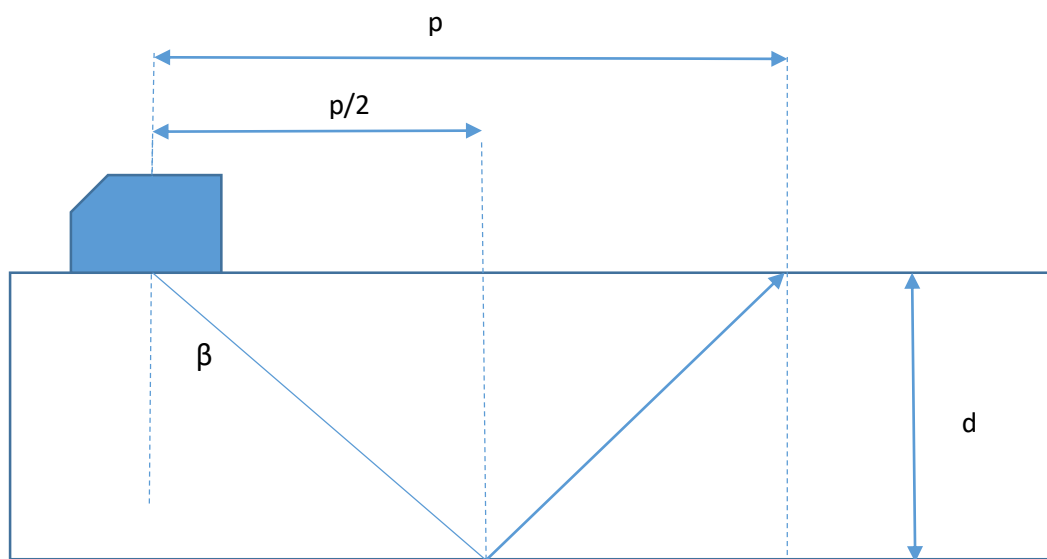
² Vidljiv je primjer ultrazvučnog sustava kod ispitivanja.

Kada transversalnu sondu postavimo na ispitnu površinu, transversalni val se odbija od donje i gornje stijenke materijala u „cik-cak“ liniji i nikada se ne vraća natrag u sondu osim ukoliko se ne odbije od reflektora. Tek ukoliko transversalni val udari na pukotinu, uključak ili poprečnu stranu ispitnog materijala on se odbija i vraća natrag u sondu te imamo njegov prikaz na ultrazvučnom uređaju.

Prema slici br. 3 možemo vidjeti da pomicanjem sonde u horizontalnoj osi sa središnjim dijelom zvučnog snopa možemo prozvučiti cijeli presjek ispitnog materijala.



Slika 3. Primjer širenja ultrazvučnog vala iz sonde po presjeku materijala. [2]



Slika 4. Projekcija ultrazvučnog puta. [2]

Put koji treba napraviti sa sondom da prozvučimo cijeli presjek ispitnog uzorka možemo izračunati na slijedeći način:

$$p/2 = d \cdot \operatorname{tg}\beta$$

$$p = 2d \cdot \operatorname{tg}\beta$$

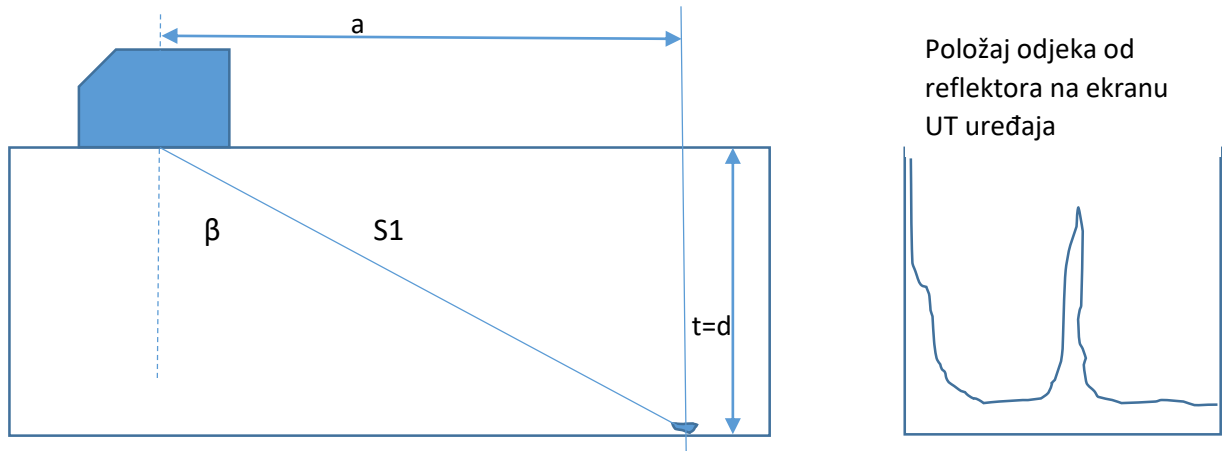
$p/2$ - projekcija zvučnog puta do donje stijenke materijala

p - projekcija zvučnog puta do gornje stijenke materijala

Ukoliko sondu pomičemo između $p/2$ i p prozvučit ćemo cijeli presjek materijala (slika 4).

Ako reflektor leži u najnižoj točki ispitnog uzorka (lima) možemo ga direktno prozvučiti, a udaljenost projekcije reflektora na površini od izlazne točke sonde biti će $a=p/2$ dok je dubina na kojoj je lociran reflektor jednaka $d=t$ (debljina lima).

Opisana situacija prikazana je slikom 5.

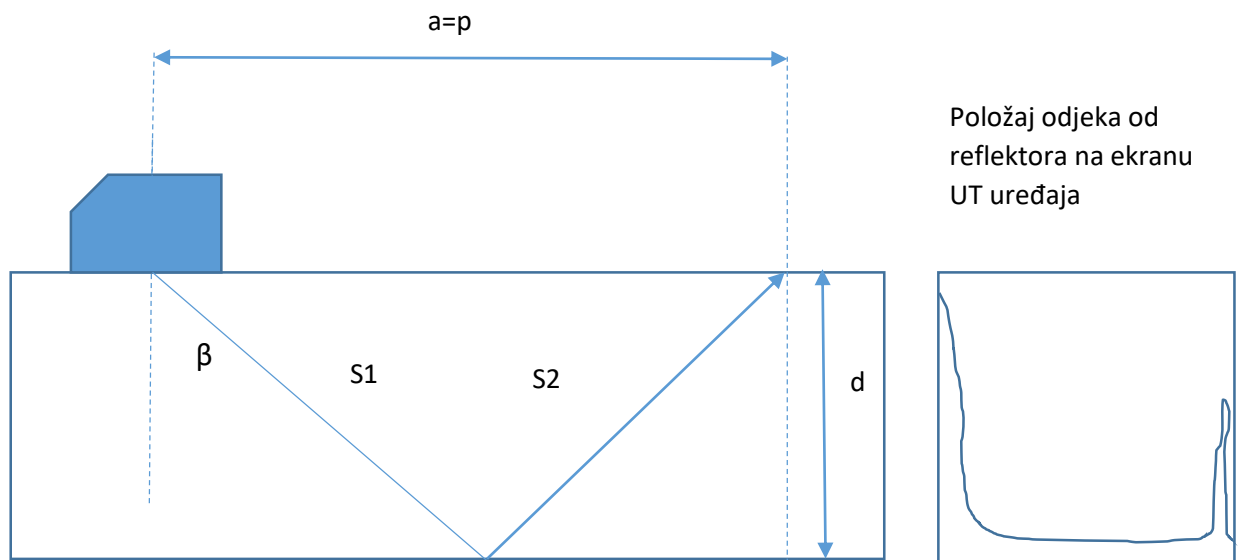


Slika 5. Reflektor na donjoj stijenci materijala. [2]

S1

Ako reflektor leži u gornjoj točki presjeka ispitnog uzorka (lima) možemo ga detektirati ako sondu pomaknemo u položaj $a=p$, gdje je onda dubina reflektora = 0 što znači da je reflektor na površini ispitnog uzorka (lima).

Opisana situacija prikazana je slikom 6.



Slika 6. Reflektor na površini materijala. [2]

$S=S1+S2$

Kada je reflektor lociran negdje između gornje i donje stijenke ispitnog uzorka (lima) zvučni put se sastoji od $S=S1+S2$. Ako zvučni put odbijen od donje stijenke ispitnog uzorka produžimo u smjeru zvučnog puta S1 vidimo ukupni produženi zvučni put, kao što je prikazana na slici 7. Upadni kut β je poznat na ispitnoj sondi te možemo izračunati udaljenost projekcije reflektora na površini na slijedeći način:

$$a = (S1+S2) \cdot \sin\beta$$

Dubina reflektora određuje se preko formule:

$$t = d - b$$

*b nije poznat ali se lako izračuna iz izraza:

$$b = t1 - d$$

*t1 se izračuna prema izrazu:

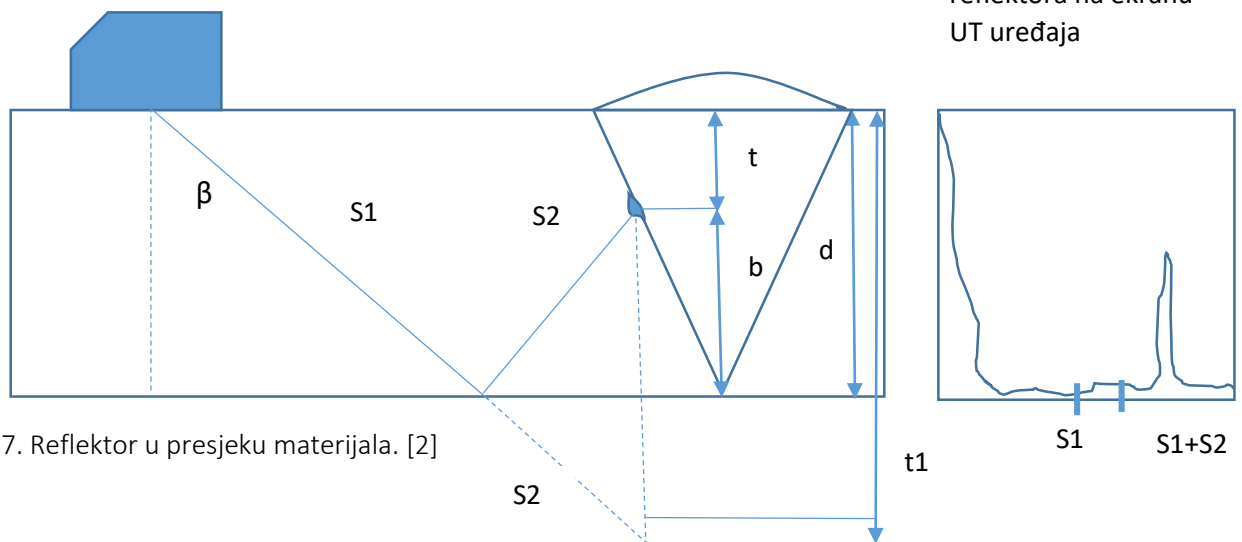
$$t1 = (S1 + S2) \cdot \cos\beta$$

Ako sve gore navedene izraze stavimo u međusobne omjere dobivamo izraz za računanje dubine reflektora:

$$t = 2 \cdot d - S \cdot \cos\beta$$

d – dubina reflektora

S – ukupna dužina zvučnog puta



Na osnovi prikazanih skica može se zaključiti da homogenost zavarenog spoja možemo ispitati u svim točkama presjeka i točno odrediti veličinu i položaj detektiranog reflektora.

Bitno je prilikom razrade postupka ispitivanja sagledati mogući položaj grešaka kako bi se odabrale najpovoljnije sonde za prozvučivanje ispitnog volumena.

Na slici 8. prikazan je standardan prikaz (A-prikaz) ultrazvučnog aparata na kojemu je vidljiv signal-echo od reflektora. [14]

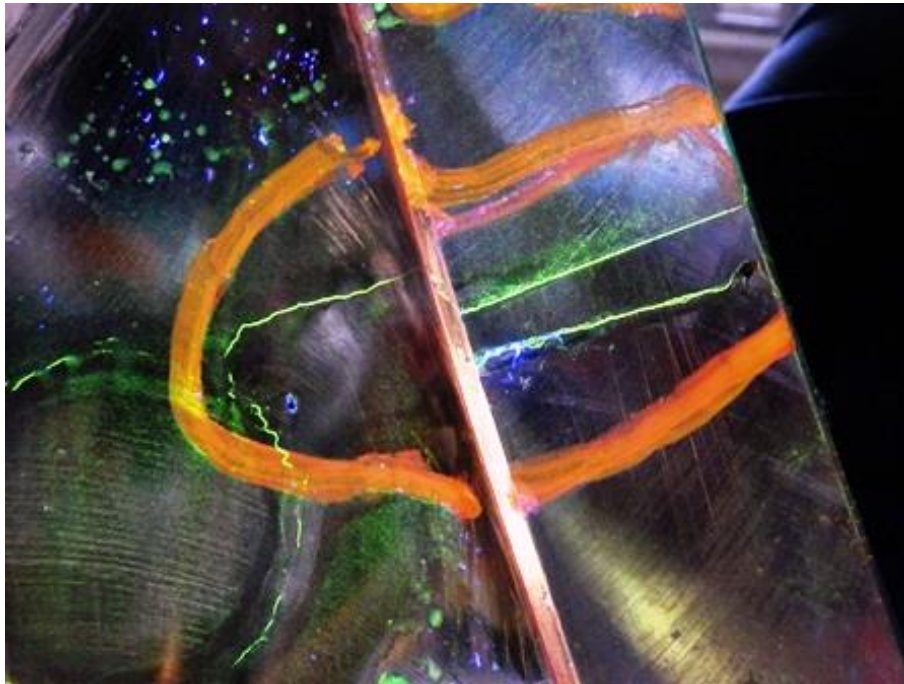


Slika 8. A-prikaz na ultrazvučnom aparatu.³ [2]

2.3.3 MAGNETSKA METODA (MT)

Za registriranje površinskih grešaka samo kod feromagnetskih materijala najčešće se primjenjuje magnetska metoda. Karakteristično za ovu metodu je da se predmet koji se ispituje postavi između polova elektromagneta kroz čije namotaje prolazi istosmjerna ili izmjenična struja. Linije magnetskih sila pri prolazu kroz homogeni materijal su ravnomjerne, dok nailaskom magnetskih silnica na nekakav uključak, pukotinu i sl. (druge magnetske propusnosti - permeabilnosti) doći će do skretanja magnetskih silnica. Da bi se greške u materijalu registrirale, obzirom da su magnetske silnice nevidljive, predmet koji se ispituje posipa se feromagnetskim prahom ferooksida u transformatorskom ulju s kerozinom ili u alkoholu. Primjenjuju se obojene i fluorescentne magnetske suspenzije, čije svijetleće čestice olakšavaju kontrolu teško pristupačnih mjesta. Primjena feromagnetskih čestica zasniva se na sposobnosti čestica, kada se nađu u magnetskom polju da se orijentiraju u pravcu polja i raspoređuju se u pravcu najvećeg povećanja gustoće magnetskih silnica, tako da se u okolini defekata grupiraju, odnosno čestice magnetskog praha se na defektu skupljaju. Pri otkrivanju grešaka magnetskom metodom, važan je uvjet pravac magnetskog strujanja koji mora biti okomit na grešku jer se greške neće registrirati ako je tok magnetskih strujnica paralelan s greškom. Kada je raspored i oblik mogućih grešaka nepoznat u praksi se magnetiziranje vrši u dva međusobno okomita pravca. Kada objekt zahtjeva, nakon provedenog magnetiziranja vrši se demagnetizacija. [15]

³ Vidljiv je signal – echo od reflektora na ultrazvučnom aparatu.



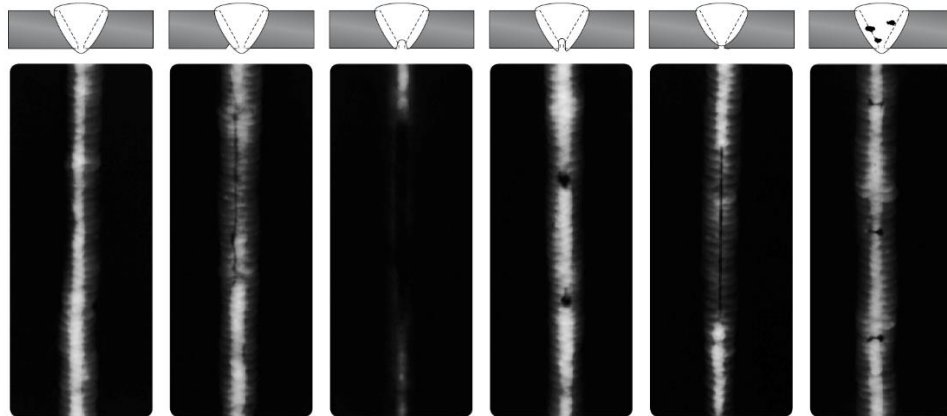
Slika 9. Prikaz linearnih indikacija.⁴ [2]

2.3.4 RADIOGRAFSKA METODA (RT)

Radiografska metoda se temelji na razlikama u apsorpciji zračenja dijela ili cijelog komada koji se ispituje. Količina zračenja koje će predmet apsorbirati ovisi o apsorpcijskim karakteristikama samog materijala, kao i gustoći i debljini istog. Zračenje koje materijal ne upije odnosno apsorbira koristi se za izradu zapisa na filmu ili fotosenzitivnom papiru ili se može detektirati odnosno prikazati pomoću različitih uređaja. Konvencionalna radiografska metoda podrazumijeva zapisivanje trajne slike na filmu ili papiru (xeroradiografija, eng. xeroradiography), iako bi se u pravilu trebala odnositi na sve poznate radiografske metode kontrole. Objekt koji se ispituje izlaže se X ili γ zrakama. Zračenje koje materijal nije apsorbirao stvara sliku na filmu. Neapsorbirano zračenje aktivira emulziju filma na sličan način kako svjetlost aktivira fotografski film. Razvijanjem filma stvara se dvodimenzionalna slika objekta. Razlike u gustoći, debljini i sastavu materijala objekta koji se ispituje uzroci su varijacijama intenziteta apsorbiranog zračenja i na filmu se očitavaju kao razlike u fotografskoj (optičkoj) gustoći tj. zacrnljenju. Ocjenjivanje radiograma temelji se na procjenama razlika u zacrnljenju uzimajući u obzir poznate karakteristike materijala objekta. Veće razlike u zacrnljenju lakše su uočljive od onih manjih. Sa stajališta mogućnosti detekcije nepravilnosti u materijalu, radiografija se ograničava na otkrivanje grešaka osjetne debljine u smjeru paralelnom sa zrakom. To znači da vjerojatnost detekcije planarnih grešaka poput pukotina ovisi o pravilnom postavljanju ispitnog uzorka. Nepravilnosti poput šupljina ili uključaka, koji imaju mjerljivu debljinu u svim smjerovima lako su uočljive. Općenito gledajući, nepravilnosti koje uzrokuju 2 ili više posto razlike u apsorpciji u odnosu na osnovni materijal moguće je uočiti. Radiografija i ultrazvuk pripadaju volumnim metodama ispitivanja i kao takve koriste se za otkrivanje

⁴ Sa slike su vidljiva mjesta na kojima su se nakupile fluorescentne magnetske čestice.

nepravilnosti koje se nalaze u materijalu i nisu otvorene prema površini. Nijedna od navedenih metoda nije ograničena na otkrivanje specifičnih volumnih nepravilnosti. Ipak, radiografija pokazuje veću sposobnost detekcije nepravilnosti koje nisu planarne, dok je ultrazvuk učinkovitiji kod detekcije planarnih. [10]



Slika 10. Prikaz fotografija zavarenih spojeva nakon RT snimanja.⁵ [1]

2.3.5 PENETRANTSKA METODA (PT)

Penetrantska kontrola, poznata i kao kontrola tekućim penetrantima (lakim uljima) jedna je od najranijih metoda KBR-a i osuvremenjena kontrola prve industrijske provedene kontrole nepropusnosti tzv. „metoda petrolej kreda“. Metoda se zasniva na principu kapilarnog učinka, tj. svojstvu tekućine da prodire i ispunjava šupljine, pukotine i uske slobodne prostore. Ova metoda nam omogućuje otkrivanje površinskih mikro i makro pukotina, propusnosti stijenci cijevi, šupljina i sl. Najznačajniji korak u provođenju ove metode jest priprema površine koju je potrebno očistiti i odmastiti radi osiguravanja ispunjavanja pukotina penetrantom. U sljedećem koraku penetrant nanosimo na kontaktnu plohu gdje nastupa vrijeme penetracije koja traje propisano uputama na ambalaži (u prosjeku nekoliko minuta). Nakon toga slijedi odstranjivanje penetranta pogodnim sredstvom uz uvjet da se penetrant zadrži unutar šupljina i nanošenje razvijaača kojim penetrant pojačano izlazi iz pukotina i razvija indicaciju. Uočavanje i definiranje indicacija te čišćenje objekta smatra se završnom komponentom penetrantskog sustava. [16]

⁵ Neprovarena mjesta i defekti uzrokuju zacrnjenje na filmu.



Slika 11. Prikaz linearnih i točkastih indikacija.⁶ [2]

2.4 STRUČNO OSOBLJE U KONTROLI BEZ RAZARANJA

Jedan od temeljnih faktora pouzdanosti rezultata u primjeni KBR je osposobljenost osoblja koje primjenjuje metode kontrole. Ovo je više izraženo što je manji stupanj automatizacije. Normama su propisani uvjeti za obrazovanje i certifikaciju osoblja, te za centre obrazovanja i certifikacije. Obrazovanje se provodi putem tečajeva, definiranih programom i sadržajem, a provjera postignutog znanja i vještine odgovarajućim strogo definiranim ispitima. Na taj način su stvoreni uvjeti za međunarodno priznavanje uvjerenja o obrazovanju, te mogućnosti međunarodnog priznavanja kadra za potrebe provođenja kontrole, te kvalitete proizvoda vanjskog isporučitelja.

Centri obrazovanja i certifikacije su kod nas i u svijetu pri nacionalnim znanstveno-strukovnim udruženjima za kontrolu bez razaranja. Time je postignut temeljni cilj za ocjenu osposobljenosti, a to je certifikacija odnosno provjera i potvrđivanje od strane nepristrane organizacije koja nema izravne koristi niti interesa za određeno ispitivanje ili rezultate kontrole. Time je spriječeno propuštanje nekvalitetnog kadra u kontrolu kvalitete. [13]

⁶ Vidljiva su mjesta na kojima je izašao penetrant s jakim intenzitetom što znači da su dubina i volumen indikacija značajni (crveno označene linearne indikacije, žuto označene kružne indikacije).

Specifikacija tehničkog osoblja:

| | |
|-------------------|--|
| definira temeljem | stupanj osposobljenosti, normi, odnosno postupka o obrazovanju kadra, koji se temelji na ISO 9712, |
| sadrži | nivo zahtijevanog znanja i stručnost, fizičke i psihičke sposobnosti, |
| u svrhu | stjecanja uvjeta za provođenje kontrole. |

Stručni kadar se prema stupnju osposobljenosti dijeli u tri grupe:

| | |
|------------|-----------------------|
| 1. stupanj | operater kontrole, |
| 2. stupanj | tehnolog kontrole, |
| 3. stupanj | specijalist kontrole. |

Svaki stupanj osposobljenosti podrazumijeva određenu stručnost, djelatnost i odgovornost, a priznaje se u određenom industrijskom sektoru i vremenu.

Djelatnosti prema stupnju osposobljenosti i osnovnoj namjeni dana je u tablici 2 i to sa stajališta:

| | |
|---|---|
| postizanja cilja načina rada sredstava za rad zaštite na radu | otkrivanja greške ili utvrđivanja stanja materijala, ispitivanje, mjerenje, oprema, laboratorij kao cjelina, osobne i okoliša. [13] |
|---|---|

Tablica 2. Djelatnost KBR osoblja

| | I stupanj | II stupanj | III stupanj |
|---|--|---|--|
| NEPRAVILNOST, GREŠKA, STANJE MATERIJALA | - otkrivanje područja nepravilnosti | - procjena parametara nepravilnosti - ocjena vrste greške - utvrđivanje postojanja greške | - definiranje kriterija kvalitete ili podobnosti - ocjena prihvatljivosti objekta |
| ISPITIVANJE, MJERENJE | - ispitivanje prema pisanoj uputi ili postupku | - razrada uputa za ispitivanje - organizacija rada | - definiranje uvjeta ispitivanja - razrada ili provjera postupka |
| LABORATORIJ, OPREMA, PRIBOR | - održavanje | - provjera opreme - priprema sustava za ispitivanje | - organizacija laboratorija - izbor opreme |
| ZAŠTITA NA RADU | - provođenje | - priprema i nadzor - izvještavanje | - organizacija sustava zaštite - dokumentacija |

2.5 POUZDANOST KONTROLE BEZ RAZARANJA

Pouzdanost kontrole bez razaranja ovisi o mnogo faktora. Pouzdanost rezultata kontrole lako je razjasniti nakon definiranja osjetljivosti metoda kontrole kvalitete, vjerojatnosti otkrivanja greške i vjerojatnosti interpretacije rezultata ispitivanja. [13]

2.5.1 OSJETLJIVOST METODA KONTROLE BEZ RAZARANJA

Osjetljivost je svakako najznačajniji parametar metode kontrole kvalitete bez razaranja i mora biti unaprijed propisan za svako ispitivanje. Osjetljivost se definira najmanjom greškom ili indikacijom neke mjerene veličine, koja se primijenjenom metodom ispitivanja još može razlučiti od šuma.

Valja razlikovati slijedeće:

- osjetljivost metode,
- uvjetnu osjetljivost sustava,
- graničnu osjetljivost,
- radnu osjetljivost,
- ekvivalentnu osjetljivost.

Osjetljivost metode definira se najmanjom nepravilnosti koju se može određenom metodom otkriti ili najmanjom veličinom koju se može izmjeriti kada se metoda koristi za mjerenje. Ova je osjetljivost općenito poznata, najčešće iz literature ili iskustva, a definira doseg osjetljivosti u navedenoj metodi ili tehnici ispitivanja. Primjerice, poznato je da je najveća osjetljivost koju se može očekivati u metodi kontrole penetrantima otkrivanje pukotine slijedećih vrijednosti pojedinih parametara; širina $>0.1 \mu\text{m}$, dubina $\sim 1 \mu\text{m}$, duljina $>1\text{mm}$. Jasno je međutim, da se takva mikropukotina ne može otkriti uvijek i u svim uvjetima.

Općenitu osjetljivost metode treba shvatiti kao maksimalni domet koji je postignut na sadašnjem stupnju znanja i razvoja metode.

Uvjetna osjetljivost definira osjetljivost sustava za ispitivanje. Ona se definira parametrima referentnih grešaka izrađenih u etalonima i uzorcima. Jasno je da će uvjetna osjetljivost ovisiti o izboru sustava, a naziv je primjeren jer definira u kolikoj mjeri neki sustav ima uvjete za postizanje potrebne osjetljivosti.

Uvjetna osjetljivost je uvijek manja ili jednaka osjetljivosti metode.

Granična osjetljivost definira potrebnu osjetljivost koja se mora osigurati da bi postojala dovoljna rezerva osjetljivosti za provođenje ispitivanja.

Ekvivalentna osjetljivost je mjera osjetljivosti sustava na realne greške u osnovnom materijalu ili na standardne u etalonu, kada se ne može izraditi odgovarajući referentni uzorak s referentnim greškama definiranih parametara s obzirom na kritičnu grešku. Sustav za ispitivanje će određenom metodom kontrole detektirati i procijeniti greške u ispitivanom objektu ekvivalentne po odzivu, te odatle slijedi naziv ekvivalentna osjetljivost.

Radna osjetljivost je prisutna tijekom provođenja ispitivanja. Ona je najčešće manja od uvjetne ili ekvivalentne, ovisno o izboru osjetljivosti za rad i uvjetima rada. Radi toga radnu osjetljivost treba provjeravati tijekom ispitivanja.

Nije samo radna osjetljivost podložna promjeni. Uvjetna osjetljivost sustava tj. ekvivalentna, a naročito granična, mijenjati će se tijekom vremena ovisno o karakteristikama pojedinih sustava i opreme unutar sustava.

Osjetljivost metode može se s vremenom povećati i to na temelju poboljšanja u sustavu i tehnici rada. Na takav način se naravno mogu postići povećanja i ostalih osjetljivosti.

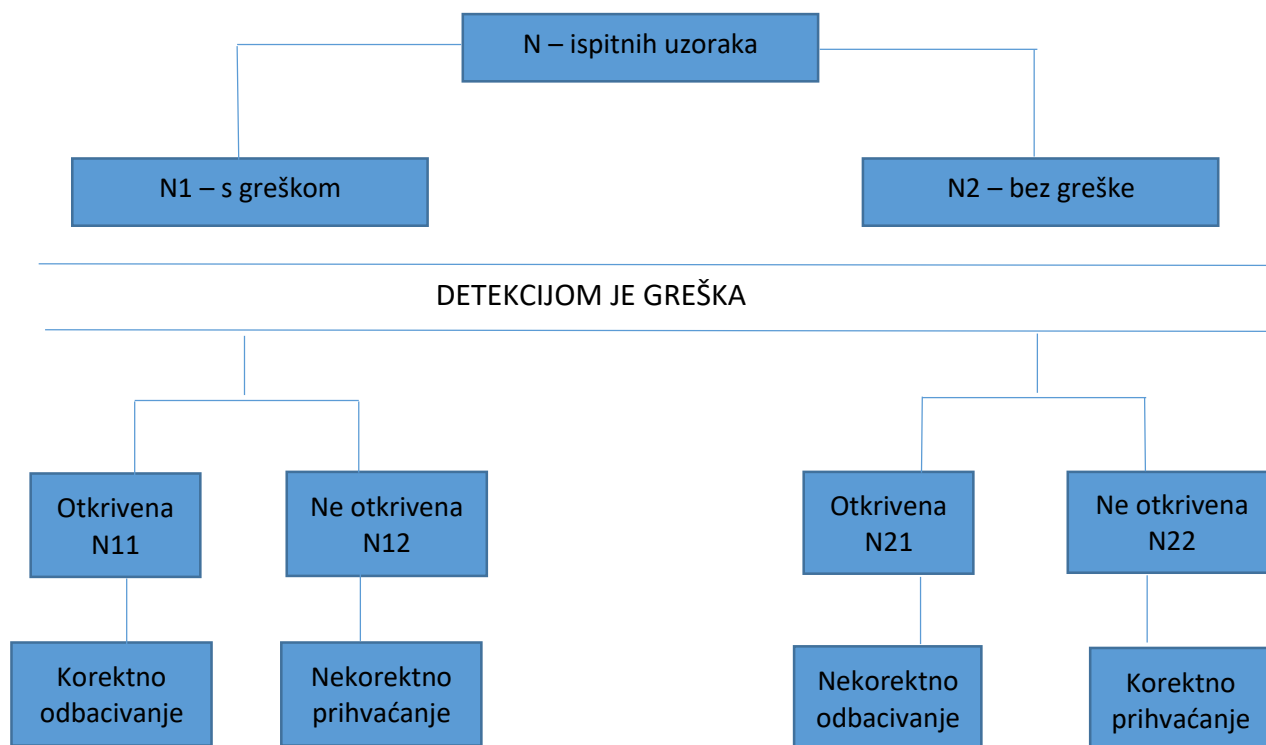
Osjetljivost se definira parametrima greške, međutim, ti se parametri u razradi postupka preslikavaju u parametre odabrane metode kontrole na različite načine. U ultrazvučnoj kontroli najčešće će se osjetljivost definirati određenom amplitudom signala postignutog odjekom ultrazvuka na zadanom reflektoru. U metodi radiografije biti će to snimka jasno prepoznatljivog etalona i polje zacrnjenja u granicama zadanog, bez kojega radiogram nije kvalificiran za interpretaciju. Podešavanje i provjera osjetljivosti biti će zato objašnjeni vezano uz metode kontrole. [13]

2.5.2 VJEROJATNOST DETEKCIJE GREŠKE I INTERPRETACIJE REZULTATA

Kontrola bez razaranja može imati četiri ishoda, ovisno o nizu utjecajnih faktora. Odabere li se visoka osjetljivost ispitnog sustava i primijenjene metode može se očekivati visoka vjerojatnost otkrivanja greška kritične veličine. Suprotni učinak visoke osjetljivosti metode je otežana interpretacija rezultata. Tako će primjerice u ultrazvučnoj metodi visoka osjetljivost dati mnoštvo ultrazvučnih signala, odjeka iz materijala, koji često ne moraju biti uvjetovani postojećom greškom, već se ultrazvuk reflektira od raznih kutova, bridova, provrta unutar ispitnog uzorka. Tako dolazimo do pojma lažne greške.

Lažna greška je svaka indikacija koja ukazuje na postojanje greške, a nije joj uzrok stvarna greška. Lažne greške se moraju predvidjeti već pri razradi postupka kontrole da ne bi u interpretaciji bile proglašene greškom, što bi dovelo do neopravdanog škarta.

Četiri ishoda kontrole bez razaranja mogu se pregledno prikazati i analizirati, ako zamislimo skup od N ispitnih uzoraka, pri čemu je postignut rezultat ispitivanja kao u shematskom prikazu na slici 12.



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

Slika 12. Shematski prikaz ishoda ispitivanja. [2]

Drugi i treći ishod vode krivom zaključku tj. prihvaćanju objekta s greškom i odbacivanju objekta bez greške. Ove pogreške treba reducirati ili ovisno o objektu ispitivanja, dati prednost jednoj od njih. Usvajanje strožeg kriterija kvalitete, veće osjetljivosti i većeg opsega kontrole bitno će uvećati pogrešku nepotrebnog odbacivanja. Konstrukcije koje eventualnom havarijom uslijed neotkrivenih grešaka mogu uzrokovati veliku opasnost za materijalna dobra ili ljudski život, kao primjerice nuklearne elektrane, petrokemijska postrojenja, zrakoplovstvo i slično, spadaju u takvu vrstu kada se svjesno prihvaća povećanje škarta uslijed pogrešnog odbacivanja, ali zato smanjenje rizika od neotkrivanja grešaka.

Vjerojatnost detekcije i interpretacije su u velikoj mjeri određene prije provođenja ispitivanja.

Nameću se pitanja:

1. uolikoj mjeri postupak kontrole bez razaranja garantira da će greška određene veličine biti otkrivena ?
2. koja najveća greška može ostati neotkrivena, unatoč osjetljivosti koja omogućuje otkrivanje grešaka i manjih veličina ?

Odgovori na postavljena pitanja definiraju tehnologiju kontrole, a time i pouzdanost rezultata kontrole. Također, odgovori na ta pitanja su ključni sa stajališta kriterija podobnosti, koji se temelji na proračunu kritične greške.

Greška se smatra otkrivenom, ukoliko su utvrđeni oni parametri greške koji su propisanom metodom kontrole trebali biti utvrđeni.

Parametri greške su slijedeći:

- položaj
- veličina
- usmjerenost
- učestalost ili brojnost.

Svaki od navedenih parametara može imati više dimenzija. Položaj je općenito određen s tri dimenzije. Veličina će također biti u potpunosti određena s tri dimenzije, duljinom, širinom i eventualno dubinom, ako se radi o pukotini. U slučaju mjerenja sferne poroznosti, sve tri dimenzije veličine će se moći iskazati promjerom pore.

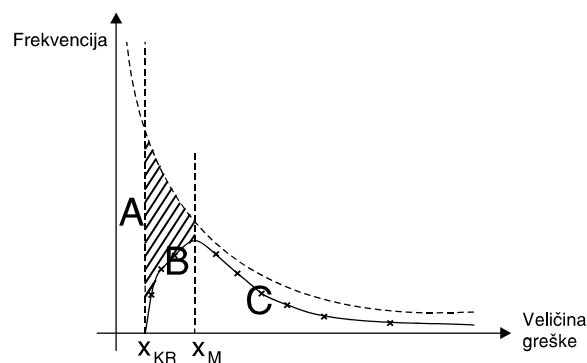
Važno je da se mogu kvantitativno procijeniti traženi parametri greške i da je pri tome poznata mjerna netočnost sustava.

Vjerojatnost detekcije greške, kojom se iskazuje vrijednost omjera otkrivenih i postojećih grešaka u nekom objektu ili skupu objekata, ima vrijednost manju od jedan, što je logično, jer nema savršenih metoda, niti savršenih sustava. Subjektivni utjecaj kontrolora i ispitnog sustava treba svesti na najmanju moguću mjeru.

U pravilu se otkriva samo dio grešaka, a što je veća osjetljivost i moć razlučivanja, te što je interpretacija bolje organizirana, to će se distribucija otkrivenih grešaka više podudarati sa stvarnom distribucijom istih.

Budući je nekorektno prihvaćanje objekta (slučaj N12), najkritičniji ishod kontrole kvalitete zato se pojam pouzdanost povezuje upravo uz detektabilnost grešaka.

Iako je stvarna distribucija u pravilu nepoznata, inženjerskom logikom može se zaključiti da je broj postojećih grešaka u objektu, obzirom na veličinu grešaka, raspoređen približno u skladu s krivuljom prikazanom na slici 13. Na slici su istaknuta područja unutar kojih metode kontrole bez razaranja mogu ili ne mogu otkrivati greške. Površina ispod krivulje je proporcionalna broju grešaka. [13]



Slika 13. Distribucija i detektibilnost grešaka. [3]

Na slici 13 je prikazano područje detektibilnosti je podijeljeno u tri karakteristična dijela.

Dio A označava skup grešaka koje se ne mogu otkriti uz graničnu osjetljivost metode. Uglavnom se radi o greškama mikroveličina pri čemu ova granica detektibilnosti ovisi o metodi kontrole.

Dio C je područje detektibilnosti s visokom vjerojatnosti detekcije, tj. može se smatrati da će u pravilu biti otkrivene sve greške koje se veličinom svrstavaju u ovo područje.

Zona B obuhvaća greške čija veličina prelazi prag osjetljivosti metode te se greške mogu detektirati, ali je upravo zbog približavanja pragu osjetljivosti veća vjerojatnost da se greške ne otkriju. Greške u ovom području čine upravo onaj dio grešaka koje smanjuju pouzdanost ispitivanja. Taj broj grešaka može se izračunati i time odrediti pouzdanost pri ispitivanju.

Budući je broj grešaka proporcionalan površini ispod krivulje može se pisati:

$$n \cdot (x_{KR} < x < x_M) = n_U \int_{x_{KR}}^{x_M} b \cdot e^{-bx} dx$$

gdje je:

- n broj grešaka u intervalu $x_{KR} < x < x_M$
- n_U teoretski ukupni broj grešaka
- x_{KR} najmanja greška koja se može otkriti
- x_M greška koja se otkriva s najvećom vjerojatnošću

Temeljem provedenog ispitivanja određuje se krivulja, a proračunom proizlazi na navedeni način izračunata pouzdanost putem broja neotkrivenih grešaka (N12).

U razradi tehnologije kontrole potrebno je voditi brigu u kojem će se području nalaziti kritična greška. Radi toga je definicija pouzdanosti još jedan pokazatelj koji vjerojatnost detekcije izražava u vremenskoj domeni. Posebno je važno znati kako se vjerojatnost detekcije određenog sustava ili ekipe ponaša tijekom vremena, ili od objekta do objekta kako bi se moglo rezultatima kontrole pridružiti upravo ono povjerenje koje im pripada. [13]

U tablici 3. prikazana je mogućnost primjene danas najčešće korištenih metoda kontrole bez razaranja zavarenih spojeva u odnosu na pojedine skupine grešaka iz norme HRN EN ISO 6520

Tablica 3. *Mogućnost primjene metode bez razaranja.*

| Vrste pogrešaka | | Metode KBR | Vizualna kontrola VT | Prozračivanje RT | Prozvučivanje UT | Magnetska kontrola MT | Penetrantska kontrola PT |
|--|------------------|------------|----------------------|------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|
| Pukotine /101-106/ | Manje površinske | | (+) | - | (+) | + | + |
| | Veće površinske | | + | (+) | + | + | + |
| | potpovršinske | | - | (+) | (-) | + | (+) |
| Poroznost /201-224/ | Površinske | | + | + | (-) | + | - |
| | U zavaru | | - | + | + | - | - |
| Čvrsti uključci /301-304/ | | | - | + | + | - | - |
| Nedovoljno spajanje (naljepljivanje) /401/ | | | - | - | + | - | - |
| Nepotpuna penetracija /402/ | Vanjsko | | + | + | (+) | + | + |
| | U zavaru | | - | + | + | (-) | - |
| Pogreške oblika /501-517/ | | | + | (-) | (-) | - | - |
| Ostale pogreške /601-606/ | | | + | - | - | (-) | (-) |

+ dobra mogućnost određivanja

(+) mogućnost uvjetovana geometrijom i sl.

(-) vrlo ograničena i nelogična primjena

- neprimjenjivost metode

3. MAKRO I MIKRO NEPRAVILNOSTI

3.1. OPĆENITO

Metodama kontrole bez razaranja registriraju se samo makronepravilnosti. Mikronepravilnosti moguće je promatrati kod pregleda mikrostrukture primjenom mikroskopa (optički i elektronski). U zavarima su često prisutne nepravilnosti (diskontinuiteti) koje čine zavar nehomogenim. Nehomogenost u pravilu smanjuje čvrstoću zavara, a prema tome i radnu sposobnost zavarene konstrukcije. Postoje nepravilnosti koje bitno umanjuju pouzdanost i nosivost zavarene konstrukcije, ali postoje nepravilnosti koje praktički ne utječu na njenu pouzdanost i nosivost. Nepravilnosti u homogenom volumenu zavara dijelimo na mikronepravilnosti i makronepravilnosti. Mikronepravilnosti se ocjenjuju preko analize mikrostrukture i ne razmatraju se u ovom radu.

Makronepravilnosti uvelike prelaze veličinu zrna u materijalu i nejednoliko su raspoređene u zavaru. Općenito smatramo makronepravilnosti one diskontinuitete koji se mogu uspješno detektirati metodama KBR-a sa opremom i instrumentima namijenjenim industrijskoj proizvodnji.

Makronepravilnosti svodimo na tipične geometrijske oblike:

- Zaobljene pojedinačne nepravilnosti
- Izdužene pojedinačne nepravilnosti
- Nepravilnosti u nizu koji se sastoji od niza sličnih nepravilnosti
- Plošne nepravilnosti kod kojih imamo dvije dimenzije dok je treća zanemarivo mala. Ove nepravilnosti su najnepovoljnije imaju karakter pukotine.

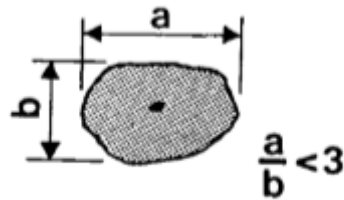
Da bi makronepravilnosti sveli na tipične geometrijske oblike, kontrola bez razaranja mora ispuniti dva osnovna zadatka:

- Otkriti grešku
- Karakterizirati i dimenzionirati grešku

Podizanje sposobnosti otkrivanja greški postiže se postupcima kontrole, izborom metoda, opreme i tehnike kontrole. Prema izgledu indikacija i njihovom položaju i veličini, utvrđuju se tip greške te se greška dimenzionira, tako da zadovoljava određeni geometrijski oblik koji se može koristiti kao model u proračunu. Ovakav pristup koristi se ukoliko se nepravilnost ostavlja u zavaru a primjenom mehanike loma kod izrade proračuna utvrđuje se utjecaj iste na smanjenje nosivosti zavara. [17]

3.2. ZAoblJENE MAKRONEPRAVILNOSTI

Zaobljene makronepravilnosti su one kod kojih je omjer najduže osi prema najmanjoj manji od 3:1. Ove nepravilnosti u pravilu ne predstavljaju opasnost za konstrukciju, osim ako nisu vrlo velike i na taj način smanjuju noseću površinu zavara. U njihovom okolišu pojavljuje se koncentracija naprezanja ako egzistira polje naprezanja. Kada se radi o duktilnim materijalima kao što je čelik P265GH, kojeg karakterizira visoka žilavost i istezljivost, koncentracija naprezanja ne predstavlja opasnost, jer u okolišu zaobljenih grešaka dolazi do lokalnog plastičnog stanja i greške se ne šire. Koncentracija naprezanja opada s udaljenošću od nepravilnosti i na udaljenosti 8 do 10 puta veće od najveće izdužene nepravilnosti praktički nestaje. U slučaju bliskih nepravilnosti koncentracija naprezanja se superponira pa je prostor između dvije bliske nepravilnosti u stanju većih naprezanja nego u ostali prostor, zato se postavljaju kriteriji za greške u nizu.



Slika 14. Primjer zaobljenih nepravilnosti prema CCH70-PT. [4]

Prema slici br. 14 vidi se primjer zaobljenih nepravilnosti kod kontole (PT). Ovdje je važno naglasiti da se indikacije dimenzioniraju prema veličini obojenog kruga od penetranta, a ne prema promjeru otvora točkaste greške. Krug od penetranta je veći što je volumen greške veći. Kada bi na ovom primjeru primijenili kontrolu (VT) onda bi ocijenili veličinu greške prema vidljivom otvoru.

Zaobljene makronepravilnosti ne predstavljaju opasnost za konstrukciju ukoliko ne smanjuju nosivi presjek i ukoliko nisu grupirane u gnijezda i nizove. [17]

3.3. IZDUŽENE MAKRONEPRAVILNOSTI

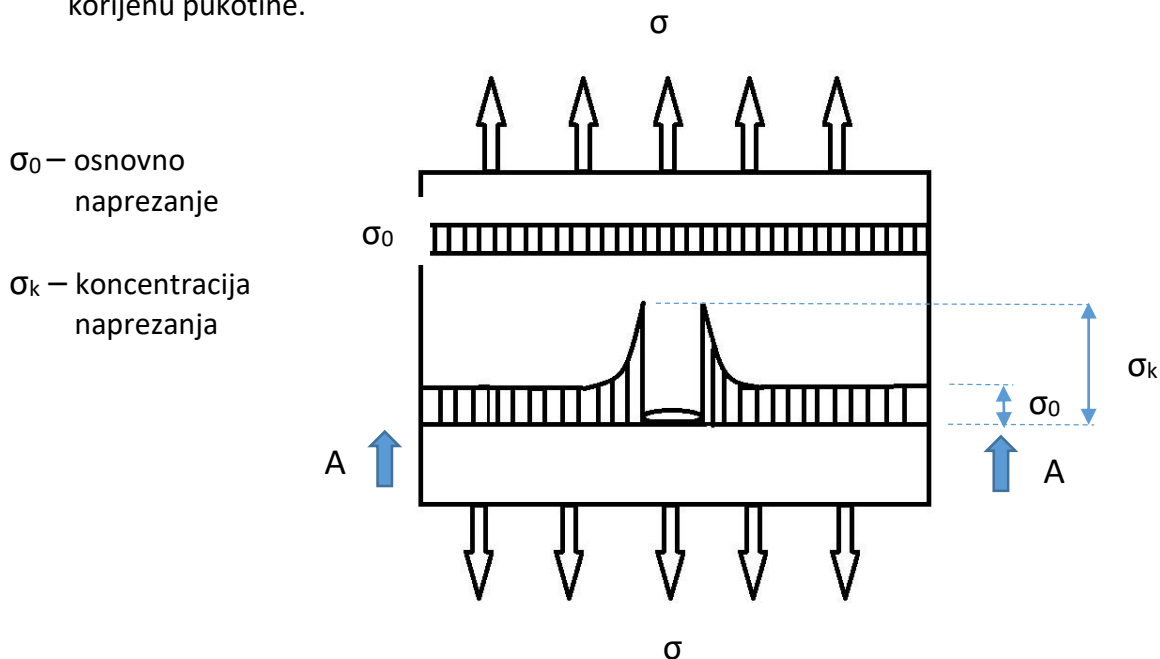
U izdužene makronepravilnosti spadaju:

- Greške u nizu
- Planarne nepravilnosti
- Pukotine

Zadatak KBR-a je da odredi tip greške i dimenzionira greške tako da zadovolje određeni geometrijski oblik, koji se može poslije koristiti u proračunu.

Izdužene makronepravilnosti pod djelovanjem naprezanja uzrokuju poremećaj sila u određenom presjeku i javljaju se konzentatori naprezanja koji dosežu najveću vrijednost u korijenu pukotine. Važno je da se KBR-om utvrde dimenzije pukotine kako bi se mogao izračunati njen utjecaj na ukupni presjek ispitanog objekta. Ako se radi o većim planarnim greškama više nije riječ o pukotini nego o smanjenju poprečnog presjeka. U slučaju smanjenja poprečnog presjeka ne može doći do plastifikacije materijala kao u slučaju kada imamo manje pukotine i zaobljene nepravilnosti.

Sa svrhom naglašavanja važnosti KBR-a kod klasifikacije i dimenzioniranja nepravilnosti prikazan je element s pukotinom i kvantitativno prikazan odnos naprezanja po presjeku i u korijenu pukotine.



Slika 15. Primjer koncentracije naprezanja kod pukotine. [2]

Kod povećanja naprezanja elementa s pukotinom, u presjeku A-A postoje dvije mogućnosti:

- 1) Materijal se ne može plastično deformirati i na taj način smanjiti vrh koncentratora naprezanja u rastu. Vrh koncentratora naprezanja u tom slučaju raste s σ_0 uz faktor koncentratora naprezanja te vrijedi slijedeći izraz: $\sigma_k = n \cdot \sigma_0$;
Kada koncentrator naprezanja σ_k na vrhu pukotine koja propagira dosegne veličinu da savlada kohezijske sile između atoma materijala $\sigma_k = \sigma_T$ nastupa lom.
Vrijeme koje je potrebno da dođe do loma ovisi o veličini pukotine, osnovnom naprezanju σ_0 , karakteristikama materijala i promjeni naprezanja.
- 2) Materijal se može plastično deformirati, onda do loma ne može doći prije nego što osnovno naprezanje σ_0 ne naraste po cijeloj širini presjeka do vrijednosti koja dovodi do tečenja materijala. U tom se slučaju osnovno naprezanje σ_0 postepeno poravnava s vrhom koncentratora naprezanja koji nestaje kroz plastičnu deformaciju presjeka.

Na osnovi navedenog slijedi činjenica da za nosive konstrukcije moramo izabrati materijal koji je plastičan, što znači da ima mogućnost deformacije prije nego što nastupi lom.

Pored navedenog zavari na konstrukciji moraju biti homogeni, što se mora potvrditi s KBR-om, jer je iznos koncentracije naprezanja proporcionalna s veličinom makronepravilnosti (dimenzijama pukotine). Prema tome dimenzije dozvoljenih makronepravilnosti moraju biti manje od onih koje uzrokuju prekomjernu koncentraciju naprezanja. [17]

4. POGREŠKE U ZAVARENOM SPOJU

Zavarivanje je danas najkorištenija tehnika spajanja koja ima primjenu u mnogim granama industrije te je potrebno obratiti posebno pažnju na pogreške u zavarenom spoju koje mogu dovesti do narušavanja pouzdanosti proizvoda u eksploataciji. Pogreške pri zavarivanju mogu biti počinjene i prije provođenja spajanja kao što su izbor materijala, postupak zavarivanja, parametri zavarivanja, itd. Stoga je nužno poznavanje vrste i uzroka nastanka greške kako bi se preventivno moglo utjecati na njihovo uklanjanje ili smanjenje.

U nastavku ćemo navesti šest osnovnih skupina pogrešaka u zavarenom spoju prema međunarodno prihvaćenoj normi ISO 6520/1982 i europskoj normi EN 26520-1991:

- Pukotine (100)
- Šupljine ili poroznost (200)
- Uključci čvrstih tijela (300)
- Nedovoljno vezivanje i penetracija (400)
- Pogreške oblika (500)
- Ostale pogreške (600)

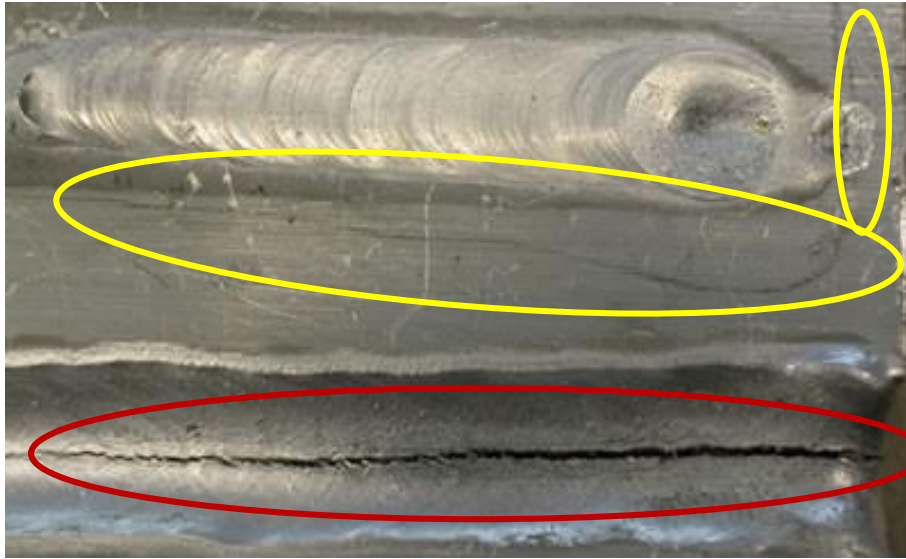
4.1. PUKOTINE (skupina 100)

Pukotine se smatraju najopasnijom pogreškom zavarenog spoja i danas su najobrađivanija skupina pogrešaka teoretičara i praktičara zbog većeg broja otkazivanja konstrukcija nastalih usred njihove pojave. Djelovanjem promjenjivih naprezanja pukotina može vremenom napredovati i dovesti do prijeloma. Prema uzroku nastanka dijelimo ih na tople i hladne pukotine. Tople pukotine kod zavarivanja nastaju tijekom hlađenja taline, faza skrućivanja taline do čvrstog stanja, a prostiru se po granicama zrna najčešće po dužini u sredini zavara. Uzrok nastajanja toplih pukotina jest gubitak sposobnosti taljevine zavara da izdrži naprezanja nastala skupljanjem u posljednjoj fazi skrućivanja. Posebno povezani uvjeti koji pogoduju nastajanju su nečistoće u materijalu, legiranje, parametri zavarivanja, legiranje, a posebno nepravilan izbor dodatnog materijala.

Hladne pukotine se pojavljuju nakon izvršenoga zavarivanja čelika povišene i visoke čvrstoće na temperaturama nižim od 300°C te se mogu pojaviti i više sati poslije zavarivanja. Mogu biti uzdužne i poprečne na zavar ili na prijelazu u osnovni materijal. Najčešći uzroci njihova nastajanja su prisutnost vodika u zavaru, sklonost metala otvrdnjavanju (naročito u zoni utjecaja topline), djelovanja naprezanja prilikom očvršćivanja zavara, uključci i sl. Čelici povišene i visoke čvrstoće, slabo zavarljivi čelici zbog svoje zakaljive strukture imaju smanjenju istezljivosti koje pod utjecajem zaostalih naprezanja može doći do pojave pukotina.

Problem nastajanja pukotina u prvom redu rješavamo konstrukcijskim rješenjem gdje uz oblik spoja želimo unijeti što manje dodatnog materijala. Također vrlo važan faktor je pravilan izbor postupka zavarivanja te unos toplinske energije koja ovisno o premalom ili povećanom unosu može uzrokovati tople ili hladne pukotine. Posebno važan je izbor odgovarajućeg dodatnog

materijala i smanjeni pristup vodika, skladištenje elektroda i praškova, priprema površine, redoslijed zavarivanja itd... [16], [18]

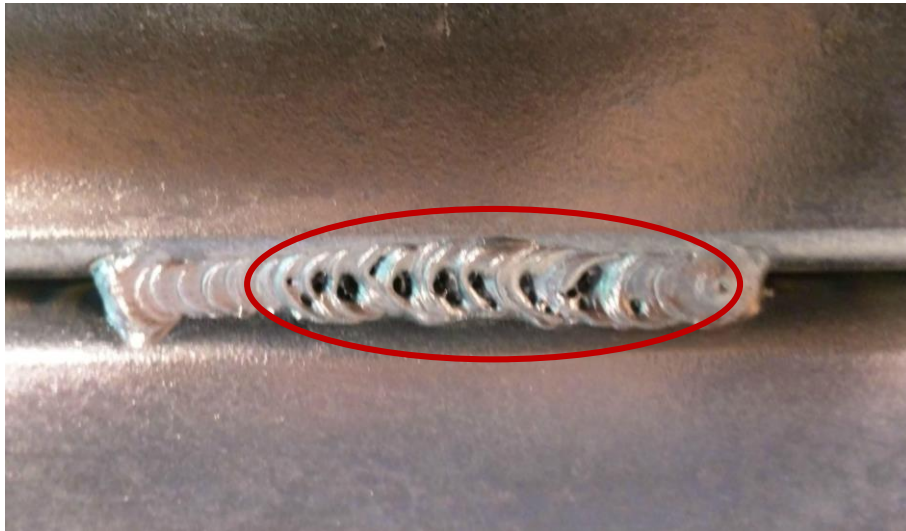


Slika 16. Pukotina u zavaru.⁷ [5]

4.2. ŠUPLJINE ILI POROZNOST (skupina 200)

Šupljine ili poroznost najčešća su greška u zavarima u zoni taljenja a predstavljaju mjesta ispunjena stlačenim plinom. Posljedica su što metal zavara u rastaljenom stanju može upiti znatne količine plinova (vodik, dušik i kisik) koji su topljivi u tekućem i krutom stanju materijala. Nastajanje šupljina ili poroznosti započinje hlađenjem taline gdje metal zavara može upiti znatne količine plinova koji se oslobađaju prilikom hlađenja i ako je brzina izlučivanja plinova manja od brzine skrućivanja metala, ostaju zarobljeni u zavaru. Variraju od okom nevidljivih do nekoliko milimetara veličine koja ovisi o količini upijenog tj. oslobođenog plina iz taline metala. Najčešći uzročnici ove pojave su štetni plinovi (vodik, dušik, kisik) koji u talinu električnog luka dolaze iz okoline atmosfere, nečistoće i vlage na mjestu zavarivanja i što se nalaze na dodatnom materijalu, neispravni parametri zavarivanja, tehnika rada i sl. Ove pogreške ovisno o broju, veličini i obliku različito utječu na čvrstoću zavarenog spoja tako što sa vremenom usred dinamičkih opterećenja dolazi do pojave pukotina. Greške ovoga tipa saniraju se žlijebljenjem i da se izvrši ispravno zavarivanje. Iz navedenih uzroka propisana su mnoga pravila za izbjegavanje ovakvih tipova grešaka kao što su čistoća mjesta zavarivanja, priprema spoja prije zavarivanja, ispravni parametri i uređaji zavarivanja, pravilna uspostava i prekid električnog luka itd... [16], [18]

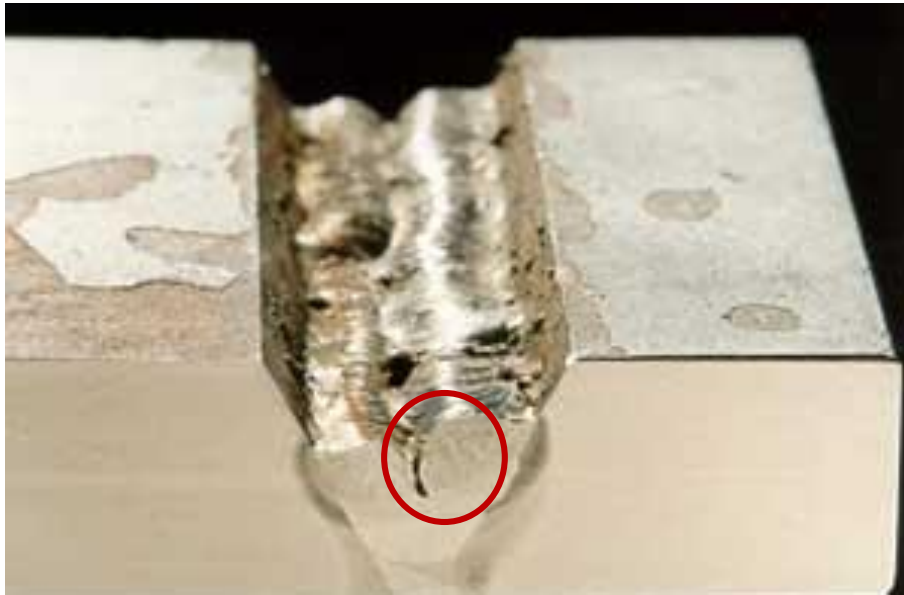
⁷ Crveno označeno – pukotina na površini zavara; Žuto označeno – pukotina u zoni utjecaja topline.



Slika 17. Poroznost u zavaru. [6]

4.3. ČVRSTI UKLJUČCI (skupina 300)

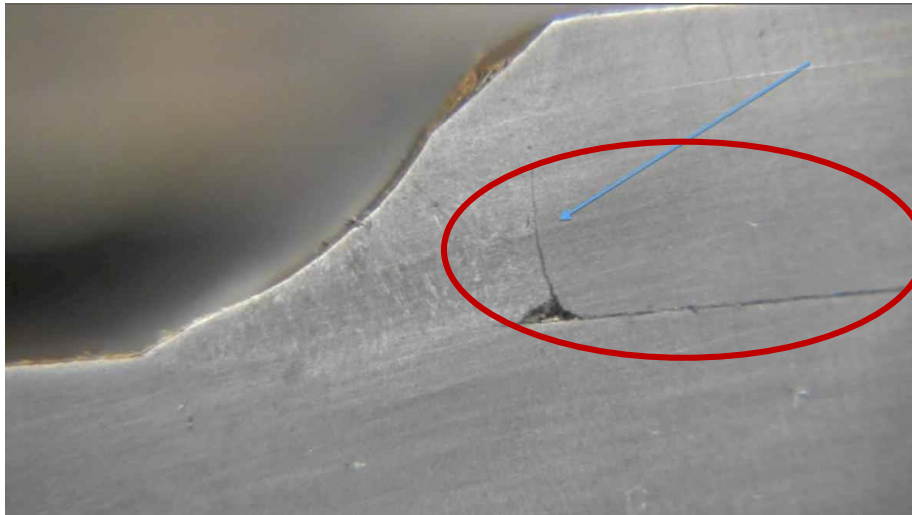
Čvrsti uključci su nemetali (troska, prašak) ili metali (volfram, oksidna kožica) koji se najčešće uslijed nedovoljnog čišćenja među slojevima zavara mogu naći u zoni taljenja. Uključci troske se ponekad teško čiste zbog preuskog ili dubokog žlijeba, oštrog rubova kutnog spoja, nepravilne tehnike rada zbog kojeg na isti način dolazi do uključaka praška kod EPP zavarivanja gdje u slučaju preuskog korijena zavara prašak upadne u dno i ostaje nepretaljen uključak u slučaju premale brzine zavarivanja. Uključci oksidne kožice u zavaru nastaju ako površina žlijeba ili uz žlijeb nije potpuno očišćena a događaju se kod TIG i MIG zavarivanja aluminija i Al-legura. Osim navedenih grubih uključaka postoji i čitav niz drugih uključaka koji su posljedica kemijskih reakcija u procesu zavarivanja (silikati, fosfati, sulfidi, nitridi) koji su smješteni na granici zrna a usko su povezani sa nastajanjem pukotina. Općenito, nemetalni i metalni uključci ovisno o količini, obliku i veličini smanjuju čvrstoću zavarenog spoja nehomogenosti i smanjenja presjeka materijala. Iz navedenih primjera nastajanja ovakvih grešaka u zavaru potrebna je pravilna priprema spoja i kut žlijeba zavara, čišćenje troske, ispravni parametri zavarivanja i tehnika rada, kod TIG zavarivanja izbjegavati doticaj volframove elektrode sa talinom itd. [16], [18]



Slika 18. Primjer šljake u zavaru. [7]

4.4. NALJEPLJIVANJE I NEDOVOLJAN PROVAR (skupina 400)

Naljepljivanje je pogreška nepostojanja čvrste strukturne veze u zavarenom spoju ili navaru. Kod zavarivanja kao i navarivanja taljenjem nastaje „nalijeganje“ taline dodatnog materijala na „hladnu“ nepretaljenu površinu spoja ili sloj prethodnog zavara. Nedovoljni provar je greška nedovoljnog protaljivanja po cijelom presjeku korijena zavara, odnosno neprovarivanje korijena zavara. Najčešći uzroci i kod jednih i kod drugih vrsta grešaka su: nepravilna priprema spoja, neispravni parametri zavarivanja i nepravilna tehnika rada. Nepravilna priprema spoja podrazumijeva neodgovarajuću širinu žlijeba, koja ne osigurava dobro protaljivanje u korijenu zavara te talina naliježe na nepretaljeni metal, kao i u slučaju neprovarenog zavara. Neispravni parametri zavarivanja kao što je premala ili prevelika jakost struje česti su uzročnici grešaka kod MIG/MAG zavarivanja gdje usred premale jakosti struje ne dolazi do pretaljivanja površine i samim time nedovoljnog strukturnog povezivanja. Jedan od najvažnijih čimbenika u izbjegavanju ovih tipova grešaka jest tehnika rada zavarivača gdje prevelika ili premala brzina zavarivanja, nepravilno držanje pištolja i usmjeravanje električnog luka samo na jednu stranu žlijeba mogu uzrokovati pogreške naljepljivanja i nedovoljnog provara. Provarivanje korijena zavara smatra se najsloženijim dijelom tehnike rada zavarivača. Ove vrste pogrešaka smanjuju čvrstoću zavarenog spoja koje u pravilu nisu dopuštene osim u izuzetnim slučajevima manje opterećenih konstrukcija. Iz navedenih razloga uzroka ovih vrsta pogrešaka uočavamo da posebnu pozornost treba obratiti parametre i tehniku rada zavarivača kod MIG/MAG zavarivanja, jakost struje, brzini zavarivanja, vrstu žica za zavarivanje, te samu obuku zavarivača. [16], [18]



Slika 19. Primjer naljeppljivanja (materijal zavara nije spojen). [8]

4.5. POGREŠKE OBLIKA ZAVARA (skupina 500)

Pogreške oblika zavara predstavljaju svako odstupanje od zadanog oblika zavara. Sve ove pogreške dobro su vidljive (osim u izuzetnim slučajevima) i mjerljive vizualnim pregledom. Budući da ove pogreške nisu samo estetske prirode već je njihov utjecaj vrlo značajan u smanjenju nosivosti kod zavarenog spoja danas im se pridaje posebna pozornost. [16], [18]



Slika 20. Primjer kontinuiranog zajeda. [9]

4.6. OSTALE POGREŠKE (skupina 600)

U ovu skupinu pogrešaka spadaju sve greške koje se ne mogu svrstati u već navedene. Uglavnom je riječ o oštećenju površine materijala pri zavarivanju ili u pripremi za zavarivanje. [16], [18]



Slika 21. Primjer onečišćenja zavara kapljicama materijala. [2]

5. KONSTRUKCIJSKI ČELICI

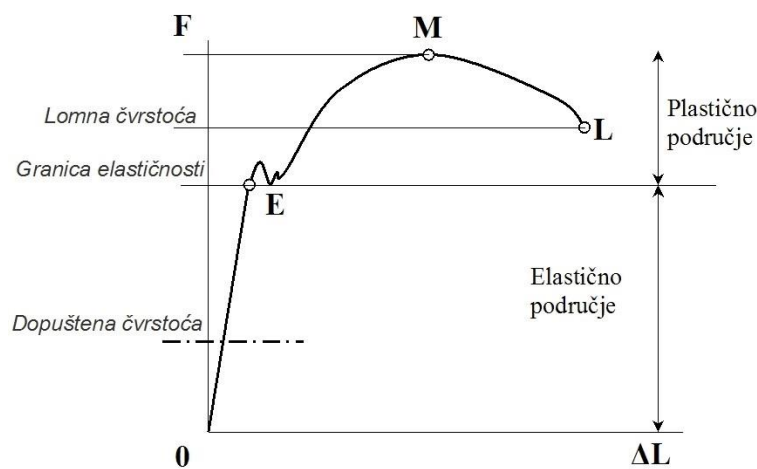
Čelik je najvažniji konstrukcijski materijal u strojarstvu a konstrukcijski čelici su najraširenija grupa materijala koja ima široku primjenu u strojogradnji.

Od konstrukcijskih čelika traže se slijedeća svojstva:

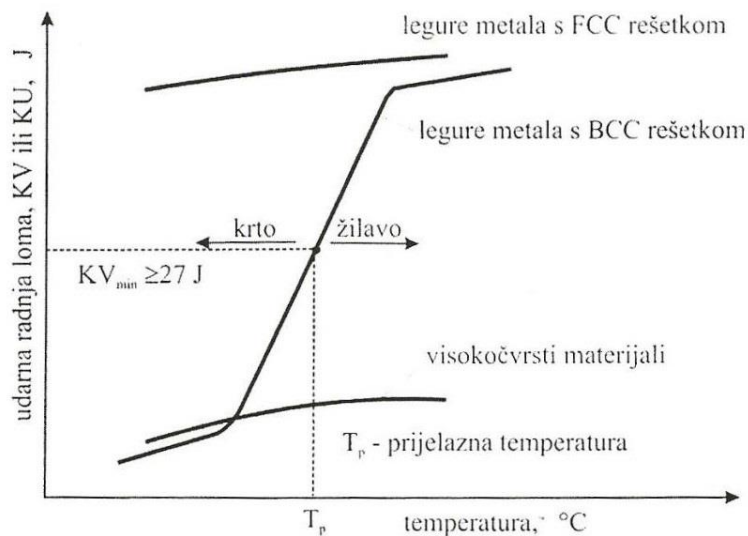
- Visoka granica tečenja (R_e , $R_{p0,2}$), čija se vrijednost koristi prilikom izrade proračuna dopuštenih naprezanja u konstrukciji,
- Visoka čvrstoća (vlačna, tlačna, savojna), i visoka razlika između vlačne čvrstoće i granice tečenja ($R_m - R_e$) kako bi se osigurala dovoljna sposobnost plastične deformacije prije loma (slika 22.),
- Visoka udarna radnja loma (žilavost) i što niža prijelazna temperatura žilavosti (slika 23.),
- Dobra tehnološka svojstva od kojih su najvažnija:
 - o Zavarljivost pod kojom podrazumijevamo:
 - Sposobnost spajanja, da se na osnovu kemijskog sastava, metalurških i fizikalnih svojstava mogu spajati dva elementa iz čelika zavarivanjem,
 - Otpornost na krhki lom koja ovisi od materijala, tipa zavora i oblika konstrukcije,
 - Mogućnost zavarivanja, kojom se daje opća slika je li moguće uopće ostvariti spajanje, a u tu svrhu se izračunava ugljični ekvivalent (CE)

$$^{10} CE = C\% + \frac{Mn\%}{6} + \frac{Cr\%+Mo\%+V\%}{5} + \frac{Ni\%+Cu\%}{15} < 0,45\%$$

- o Obradivost odvajanjem čestica,
- o Hladna oblikovljivost.



Slika 22. Dijagram naprezanje – deformacija. [11]



Slika 23. Dijagram ovisnosti udarne žilavosti o temperaturi ispitivanja. [11]

Konstruktivske čelike dijelimo na:

1. Konstruktivski čelici za širu primjenu
 - a. Opći konstruktivski čelici,
 - b. Čelici za cementiranje,
 - c. Čelici za poboljšanje,
 - d. Opužni čelici

2. Konstruktivski čelici za posebnu namjenu
 - a. Sitnozrnati niskolegirani čelici, koji mogu biti isporučeni u normaliziranom ili poboljšanom stanju,
 - b. Čelici otporni na djelovanje korozije i kiselina, koji mogu biti feritni, poluferitni, martenzitni i austenitni,
 - c. Čelici za rad pri povišenim temperaturama, koji mogu biti nelegirani kotlovski, niskolegirani s Mo i Mo-Cr, Cr-Mo čelici, 12%Cr visokolegirani čelici za rad do 600°C, visokopostojani austenitni čelici

U ovom radu u eksperimentalnom dijelu za izradu izlazne cijevi turbine (difuzora) korišten je sitnozrnati normalizirani čelik S355J2 + N. Svojstva ovog čelika baziraju se na postizanju sitnog perlitno-feritnog zrna što uzrokuje povišenje granice razvlačenja (R_e , $R_{p0,2}$) i sniženje prijelazne temperature žilavosti.

Ova svojstva postignuta su primjenom dezoksidacije čelične litine sekundarnim aluminijem koji se spaja s kisikom tvoreći Al_2O_3 koji biva izlučen kroz trosku. Aluminij se također spaja i s dušikom (N) tvoreći AlN koji je jednoliko disperziran u obliku finih čestica. Spoj AlN je vrlo postojan i raspada se iznad 1350°C, što ovom čeliku daje odlična tehnološka svojstva kod zavarivanja jer zona utjecaja topline (ZUT) zadržava sitnozrnatu strukturu a time i postojeća mehanička svojstva.

Mikrolegiranjem s legirnim elementima Nb, V i Ti u cilju spajanja istih s ugljikom (C) i dušikom (N) u karbide i nitride što dodatno pojačava djelovanje spoja AlN, čime se postiže sitnije austenitno zrno iz kojeg se nakon toplinske obrade postiže sitna feritno-perlitna struktura s

dobrim mehaničkim i tehnološkim svojstvima. Sadržaj mikrolegirajućih elemenata nije ograničen, nego se čeličanama prepušta slaganje određenih mikrolegirajućih kombinacija u svrhu dobivanja traženih mehaničkih i tehnoloških svojstava.

Standardizirani su zahtjevi osnovnog kemijskog sastava i mehaničkih svojstava prema HRN EN ISO 10025-2 „Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika -- 2. dio: Tehnički uvjeti isporuke za nelegirane konstrukcijske čelike“. [19]

Kemijski sastav

| | %C | %Si | %Mn | %P | %S | %N | %Cu |
|------|------|------|------|-------|-------|----|------|
| Max. | 0,20 | 0,55 | 1,60 | 0,025 | 0,025 | - | 0,55 |

Mehanička svojstva

| Re [N/mm ²] | Rm [N/mm ²] | A5 | KV [-20°C] |
|-------------------------|-------------------------|----------|------------|
| min. 355 | 470-630 | min. 22% | min. 27 J |

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. PLAN EKSPERIMENTA

U eksperimentalnom dijelu rada na odabranoj zavarenoj konstrukciji konusne cijevi izlaznog dijela hidroturbine prikazana je praktična primjena kontrole bez razaranja na zavarenim spojevima.

Cilj eksperimentalnog dijela rada je da se prikaže pristup provedbe kontrole bez razaranja, opseg kontrole, provedba ispitivanja i ocjena rezultata.

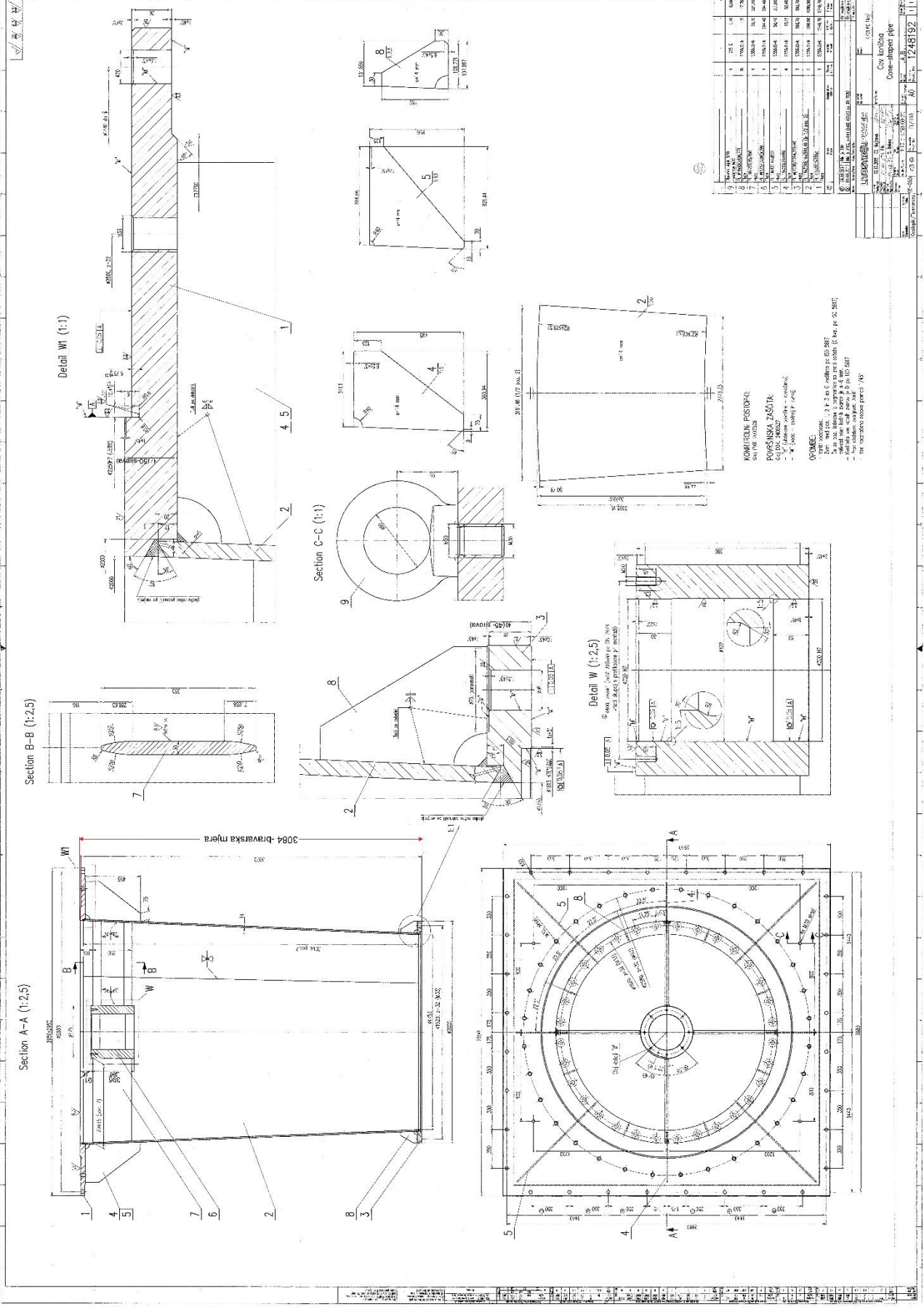
Na osnovi postavljenog cilja u ovoj radnji, a prema odabranoj zavarenoj konstrukciji sačinjen je slijedeći plan eksperimenta koji sadrži:

1. Pregled dokumentacije koja se sastoji od crteža i izvedbenog plana kontrole kvalitete za točke kontrole bez razaranja
2. Definiranje opsega ispitivanja
3. Kriterije prihvatljivosti
4. Provođenje ispitivanja na zavarenoj konstrukciji
5. Analizu rezultata

6.2. DOKUMENTACIJA ZA ZAVARENU KONSTRUKCIJU

Dokumentacija prema kojoj se provodi eksperiment je slijedeća:

- Crtež konusne cijevi izlaznog dijela turbine br. 1248192
- Izvedbeni plan kontrole kvalitete br. 2002506
- Materijal: S355J2+N prema HRN EN10025-2



| № | ИЗМЕНЕНИЯ | ПОЯСНЕНИЯ | ИЗМЕНИТЕЛЬ | ПРОВЕРИТЕЛЬ | УТВЕРЖДЕН | ПОДПИСЬ | ПОЯСНЕНИЯ |
|---|-----------|-----------|------------|-------------|-----------|---------|-----------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | |

УТВЕРЖАЮЩИЙ: _____
ПРОЕКТИРУЮЩИЙ: _____
РАБОТА ИСПОЛНИТЕЛЬ: _____
ПОДСЧИТАТЕЛЬ: _____
ОПИСАНИЕ:
 1. Объект: _____
 2. Этап: _____
 3. Масштаб: _____
 4. Дата: _____
 5. _____

| Naročnik Customer | | MED CAIRO, EGYPT | | Projekt Project | | E1/1193 | | PPS element WBS element | | E1/1193-P:3A/1-VI:SD-01 | | Štev./ No.: 2002506 | |
|---|--|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|--|---|----------------|---|--|---------------------|--|
| IZVEDBENI PLAN KONTROLE KAKOVOSTI QUALITY WORKING PLAN | | | | | | | | | | | | List/Sheet: 3 of 8 | |
| Šl. No. | Predmet in vrsta kontrole Subject, Type of inspection | Risba št. Drawing No. | Material Material | Preobdelani Inspected | Kontrola / Checking | Previdni Inspected | Standard | Številka poročila Datum in podpis inšpektorja Inspection report No. Date and signature of inspector | Opomba Note | Inšpektor Inspector | | | |
| 2 | KONIČNA CEV COLUMN PIPE | 1248192 | Zvarjenec Welded piece | | | | EN 10025 DIN 17100 | | | 1 | | | |
| 2.1 | 222 - Mehanske lastnosti in kemična sestava Mechanical properties and chemical composition | | S355J2+N Pos. 1 - 8 | R | | | EN 10204 3.1 EN 10002 EN 10045 | | | | | | |
| 2.2 | 641 - Vizualna kontrola ob pričetku varjenja Visual checking before welding | | | | Y | | EN 17637 | | | | | | |
| 2.3 | 662 - Kvalifikacija (Atest) varilca Welder qualification | | | | R | | EN 287-1 | | | | | | |
| 2.4 | 582 - Pregled temen vodooblivnih zvarov s penetrantom Liquid penetrant inspection of welded connections in contact with water | | | | R | | EN 23277 EN 3542-1 EN ISO 5817- Class C | | | | | | |
| 2.5 | 612 - Diagram toplotne obdelave Heat treatment diagram | | | | R | | | | | | | | |
| 2.6 | 702 - Kontrola dimenzij Dimensional checking | | | | R | | | | | Merska skica Dimensional drawing | | | |
| 2.7 | 532 - Pregled preverjenih zvarov z ultrazvokom Ultrasonic examination of welds | | | | Y | | ISO 11666 Class 3 EN 17640 Class A | | | Vrednotiti Velikost zvara - 5 mm Evaluate weld - 5 mm | | | |

Dokument je last družbe LITOSTRKO POWER. Razmnoževanje, prevajanje in uporaba v tujini, ali navedenim ni dovoljena. The document is LITOSTRKO POWER's sole property. It cannot be reproduced or passed to third parties for any other purposes than agreed.

OBR 0202

Slika 24. Izvedbeni plan kontrole kvalitete br. 2002506 [2]

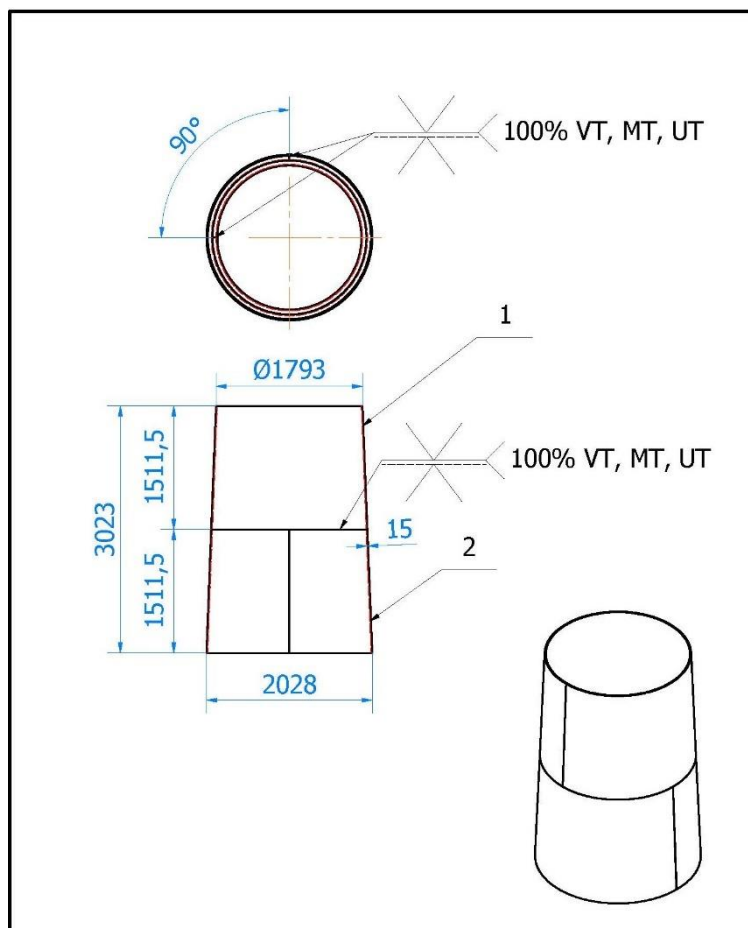
6.3. OPSEG ISPITIVANJA

Prema izvedbenom planu kontrole zahtijeva se slijedeće:

- Vizualna kontrola pripreme svih zavara (VT 100%)
- Kontrola penetrantskim česticama svih zavara koji su u kontaktu s vodom (PT 100%)
- Ultrazvučna kontrola svih zavara s punom penetracijom, prema crtežu br. 1248192 (UT 100%)
- Kontrola tehnoloških zavara magnetskim česticama (MT 100%)
- Ultrazvučna kontrola tehnoloških zavara (UT 100%)

6.3.1. TEHNOLOŠKI ZAVARI

Tehnološki zavari su prikazani na slici 25.



Slika 25. Spojni zavari na poziciji 2 (konusna cijev). [2]

Zahtjev za kvalitetu zavara je klasa C prema HRN EN ISO 5817.

Tehnološki zavari se moraju ispitati u 100% opsegu s vizualnom (VT), magnetskom (MT) i ultrazvučnom (UT) metodom.

6.3.2. KONTROLA PENETRANTIMA

Prema crtežu br. 1248192 i Izvedbenom planu kontrole kvalitete br. 2002506, ispitivanje zavarenih spojeva koji su u kontaktu s vodom, provest će se u 100% opsegu penetrantskom metodom (PT).

Zavari koji su u kontaktu s vodom su:

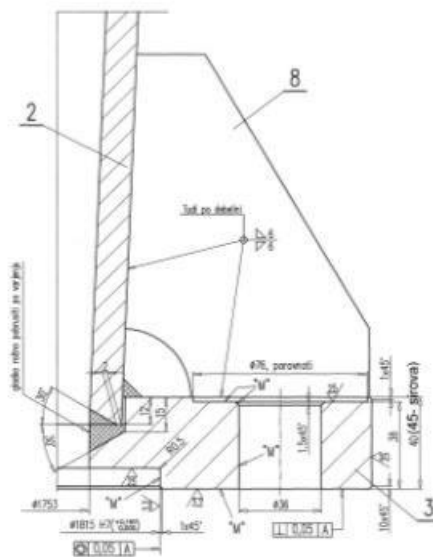
- Unutarnji zavari na poziciji br. 2,
- Unutarnji zavar između pozicija 2 i 3,
- Unutarnji zavar između pozicija 1 i 2.

6.3.3. ULTRAZVUČNA KONTROLA

Prema crtežu br. 1248192 i Izvedbenom planu kontrole kvalitete br. 2002506, ispitivanje zavarenih spojeva s punom penetracijom provest će se u 100% opsegu ultrazvučnom metodom (UT).

Zavari s punom penetracijom:

- Spojni zavari na konusnoj cijevi (pozicija 2) prikazani na slici 25.,
- Spojni zavar između pozicija 1 i 2,
- Spojni zavar između pozicija 2 i 3 prikazan na slici 26.



Slika 26. Spojni zavar između pozicija 2 i 3. [2]

6.3.4. KRITERIJ PRIHVATLJIVOSTI

Prilikom provođenja ispitivanja zavara metodama bez razaranja potrebno je odrediti svrhu svake pojedine metode na slijedeći način:

Vizualnom metodom (VT) izvršit će se pregled tjemena kutnih zavara na način da će se kontrolirati priprema spoja za zavarivanje, dimenzija zavarenog spoja te površinske nepravilnosti definirane za klasu C prema HRN EN ISO 5817 „Zavarivanje – Zavareni spojevi nastali taljenjem u čeliku, niklu, titanu i njihovim legurama (osim zavarivanja elektronskim snopom i laserom) – Razina kvalitete s obzirom na nepravilnosti“.

Tablica 4. Klasifikacija indikacije

| Oznaka indikacije prema HRN EN ISO 6520-1 | Klasifikacija indikacije | Ocjena |
|---|------------------------------------|--------------------------------|
| 100 | Pukotine | Nedozvoljeno |
| 2017 | Površinske pore | Maksimalno $d \leq 2\text{mm}$ |
| 2025 | Udubljenje u završnom krateru | Maksimalno 1mm |
| 401 | Nedovoljna penetracija | Nedozvoljeno |
| 4021 | Nepotpuna penetracija | Nedozvoljeno |
| 5011 | Kontinuirani zajedji | Maksimalne dubine 0,5mm |
| 502 | Nadvišenje zavara | Maksimalno 1mm |
| 503 | Preveliko ispućenje | Maksimalno 2mm |
| 512 | Nesimetričnost kutnog zavara | Maksimalno 0,6mm |
| 5213 | Nedovoljna debljina kutnog zavara | Maksimalno 0,6mm |
| 5214 | Prekomjerna debljina kutnog zavara | Maksimalno 1mm |

Penetrantskom metodom (PT) izvršit će se pregled površinske homogenosti zavara koji su u kontaktu s vodom prema klasi 2X, HRN EN ISO 23277 „Nerazorno ispitivanje zavara -- Ispitivanje penetrantima -- Razine prihvatljivosti“.

Dozvoljene su linearne indikacije $\leq 2\text{mm}$ i kružne indikacije $\leq \varnothing 6\text{mm}$, sve ostale indikacije potrebno je označiti i ukloniti brušenjem ili glodanjem s profilnim glodalom.

Magnetskom metodom (MT) izvršit će se pregled homogenosti svih zavarenih spojeva prema klasi 2X, HRN EN ISO 23278 „Nerazorno ispitivanje zavara -- Ispitivanje zavara magnetskim česticama -- Razine prihvatljivosti“.

Dozvoljene su linearne indikacije $\leq 1,5\text{mm}$ i kružne indikacije $\leq \varnothing 3\text{mm}$, sve ostale indikacije potrebno je označiti i ukloniti brušenjem ili glodanjem s profilnim glodalom.

Ultrazvučnom metodom (UT) izvršit će se pregled volumetrijske homogenosti zavara s punom penetracijom za kriterij prihvatljivosti 3 prema HRN EN ISO 11666 „Nerazorno ispitivanje zavarenih spojeva -- Ultrazvučno ispitivanje -- Razine prihvatljivosti“.

Ispitivanje će se provesti primjenom tehnike 1 – DAC krivulja bazirane na bočno bušenim provrtima veličine $\varnothing 3\text{mm}$. Granica evaluacije je -10dB. Neprihvatljive indikacije su veće od referentne krivulje za 4dB.

6.3.5. PROVOĐENJE ISPITIVANJA

Nakon izvođenja zavarivanja i mehaničkog čišćenja konstrukcije izvršena je kontrola bez razaranja na konstrukciji, slika 27. prema planu eksperimenta.



Slika 27. Zavarena konstrukcija izlazne cijevi hidroturbine. [2]

Vizualna kontrola (VT)

- Pregled svih zavara direktnom tehnikom
- Kontrola visine zavara
- Oprema: šablon za kontrolu zavara, baterijska svjetiljka



Slika 28. Kontrola visine zavara sa šablonom za zavare. [2]



Slika 29. Kontrola visine zavora sa šablonom za zavare. [2]

Pregledom i kontrolom registrirano je:

- Završetci zavora su nalijepljeni tj. nisu staljeni sa osnovnim materijalom (grupa 401 – Nedovoljna penetracija prema HRN EN ISO 6520-1)



Slika 30. Položaj nepravilnosti. [2]



Slika 31. Detalj nepravilnosti. [2]



Slika 32. Položaj nepravilnosti. [2]

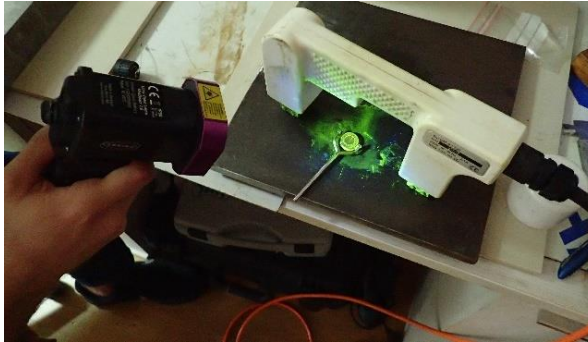


Slika 33. Detalj nepravilnosti. [2]

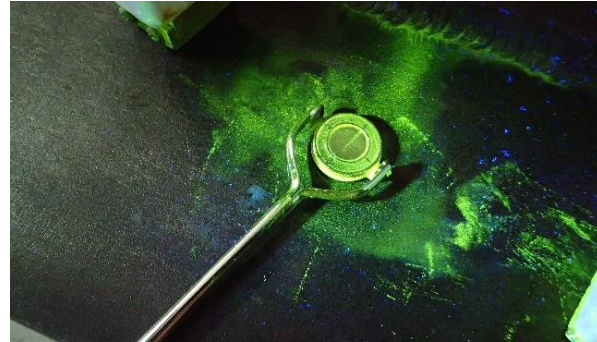
Magnetska kontrola (MT)

- Izvršeno je ispitivanje svih zavara na konstrukciji
- Oprema: magnetski jaram Tiede TMW 230A, UV lampa UV-LED 1.2, magnetske čestice Tiede MF655 WB i kontrolni etalon Bertholdov indikator

Provjera osjetljivosti metode izvršena je na Bertholdovom indikatoru fotografija slika 35. i slika 36.



Slika 34. Magnetizacija indikatora. [2]

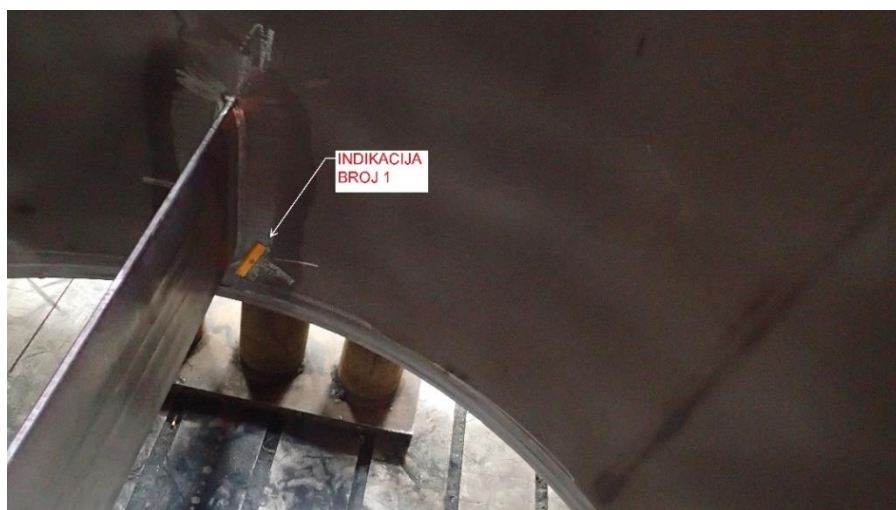


Slika 35. Detalj indikatora. [2]

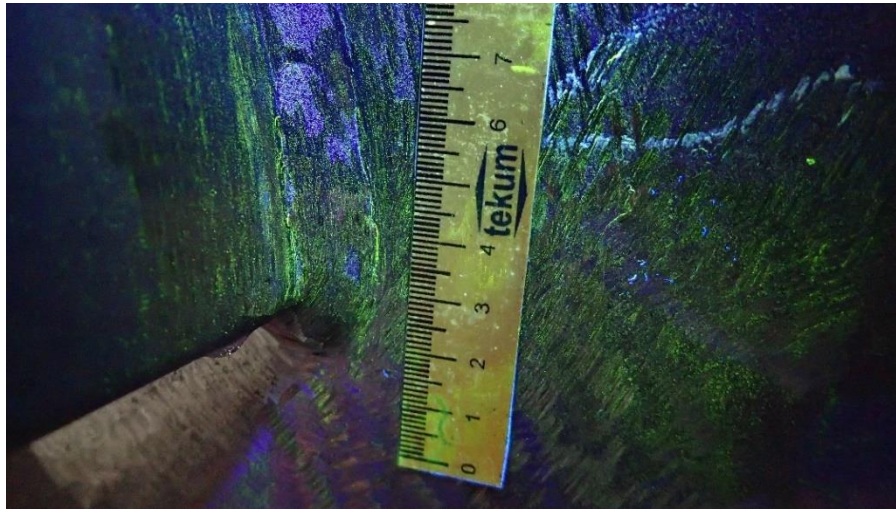
Na fotografijama je vidljiva indikacija na indikatoru. Ispitni sustav zadovoljava.

Ispitivanjem zavara registrirane su slijedeće neprihvatljive indikacije:

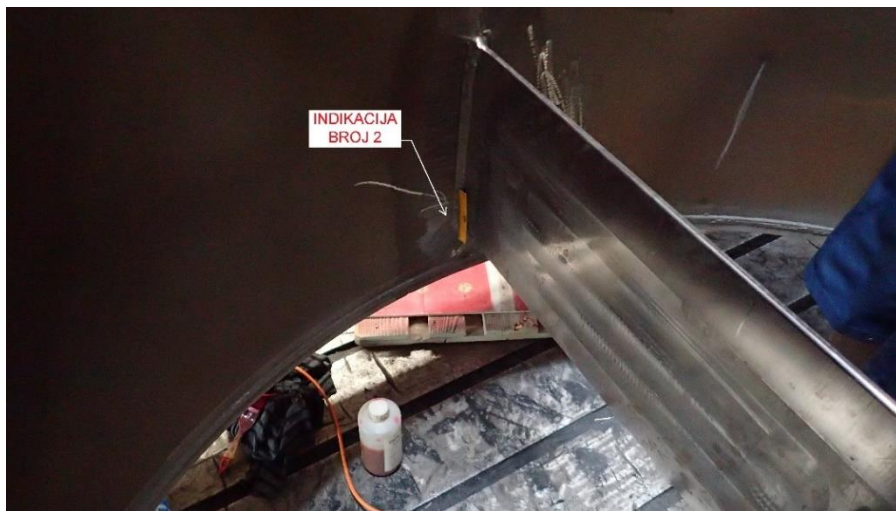
- indikacija broj 1 na zavaru nosača glavine dužine 8mm, fotografija 36 i 37 (grupa 401 – Nedovoljna pementracija prema HRN EN ISO 6520-1)
- indikacija broj 2 na zavaru nosača glavine dužine 6mm, fotografija 38 i 39 (grupa 401 – Nedovoljna penetracija prema HRN EN ISO 6520-1)



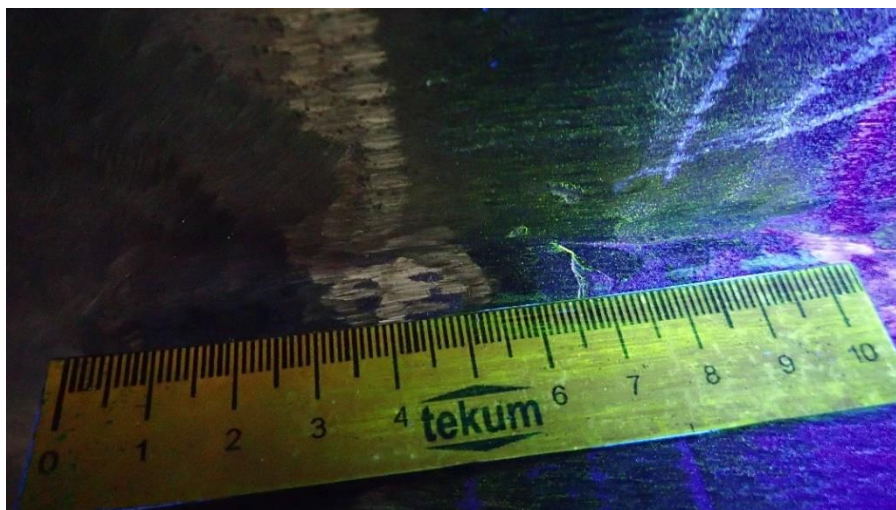
Slika 36. Položaj indikacije broj 1 na nosaču glavine. [2]



Slika 37. Detalj indikacije broj 1 dužine 8 mm. [2]



Slika 38. položaj indikacije broj 2 na nosaču glavine. [2]



Slika 39. Detalj indikacije broj 2 dužine 6 mm. [2]

Penetrantska kontrola (PT)

- Izvršeno je ispitivanje svih zavara u kontaktu sa vodom, znači unutarnji zavari na izlaznoj cijevi
- Oprema: kontrolni blok broj 2, penetrant Tiede PWL-1 i razvijlač Tiede DL-20

Provjera osjetljivosti sustava izvršena je na kontrolnom bloku broj 2, fotografija 40., 41., 42.



Slika 40. Nanesen penetrant. [2]



Slika 41. Nanesen razvijlač. [2]



Slika 42. Razvijene indikacije na referentnom bloku. [2]

Na kontrolnom bloku su vidljive indikacije grešaka stvorenih u svrhu provjere penetrantskog sustava. Osjetljivost ispitnog sustava zadovoljava.

Ispitivanjem zavara registrirane su slijedeće prihvatljive indikacije:

- Indikacija broj 1 na kružnom tehnološkom zavaru plašta dužine 4mm, fotografija 45 i 46 (grupa 2017 – Površinske pore prema HRN EN ISO 6520-1).
- Indikacija broj 2 na vertikalnom tehnološkom zavaru plašta dužine 6mm, fotografija 47 i 48 (grupa 2017 – Površinske pore prema HRN EN ISO 6520-1).



Slika 43. Ispitivanje zavora sa unutarnje strane izlazne cijevi. [2]



Slika 44. Ispitivanje zavora sa unutarnje strane izlazne cijevi. [2]



Slika 45. Položaj indikacije broj 1 na kružnom tehnološkom zavaru plašta. [2]



Slika 46. Detalj indikacije broj 1, dužine 4mm. [2]



Slika 47. Položaj indikacije broj 2 na vertikalnom tehnološkom zavaru plašta. [2]



Slika 48. Detalj indikacije broj 2, dužine 6mm. [2]

Ultrazvučna kontrola (UT)

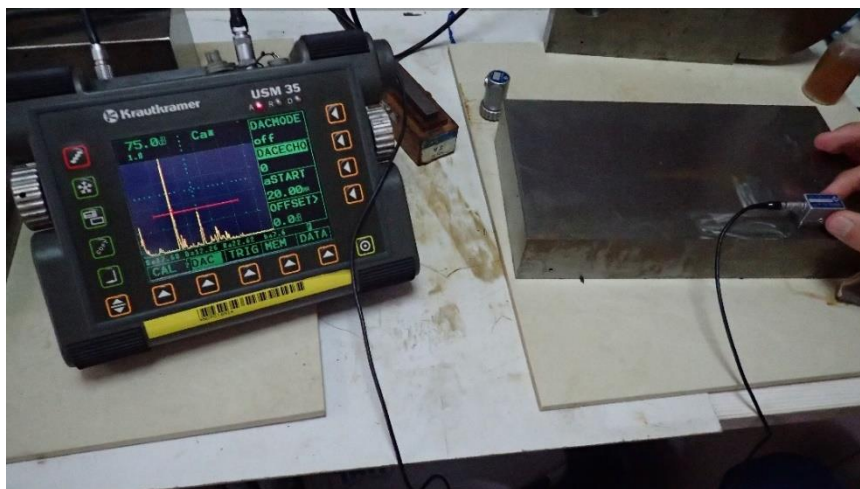
- Izvršeno je ispitivanje svih tehnoloških zavara na izlaznoj cijevi i zavara na prirubnicama $\varnothing 1793\text{mm}$ i $\varnothing 2028\text{mm}$.
- Oprema: UT aparat USM 35X, UT sonde MWB70-4, kalibracijski blok V2 i referentni blok $\varnothing 3\text{mm}$

Kalibracija UT sustava izvršena je na kalibracijskom bloku V2 i postavljena je krivulja preko referentnog bloka $\varnothing 3\text{mm}$ prema kojoj će se klasificirati greške.

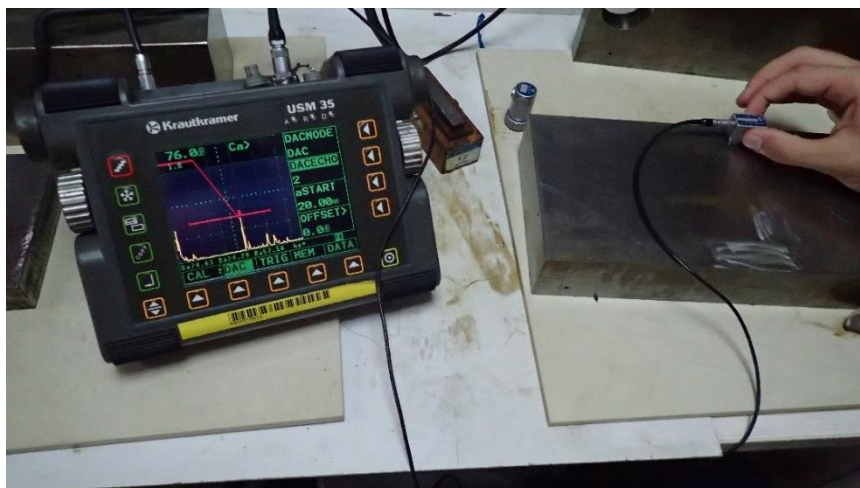
Kalibracija sustava prikazana je na fotografijama:



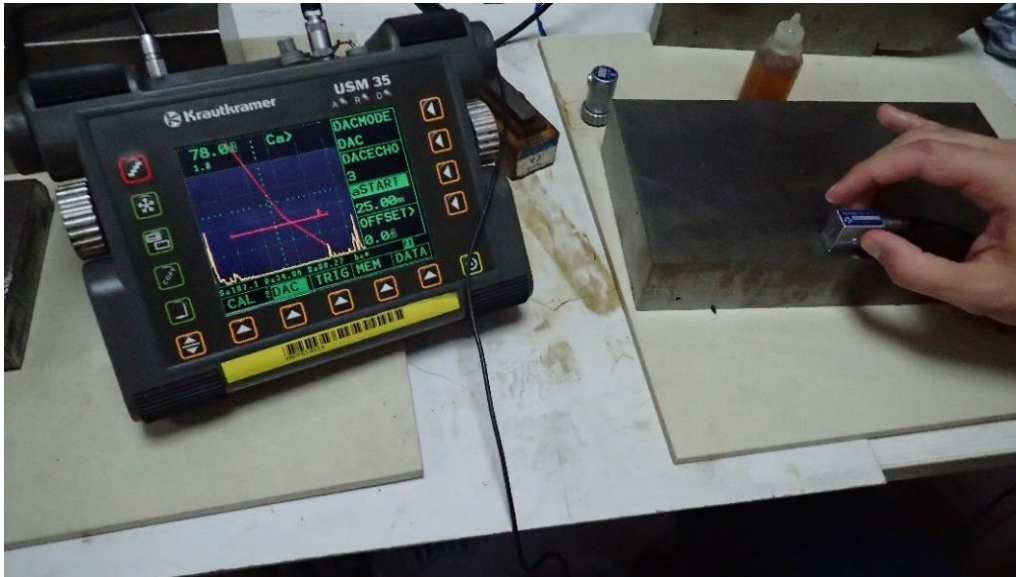
Slika 49. Kalibracija mjernog područja na kalibracijskom bloku V2. [2]



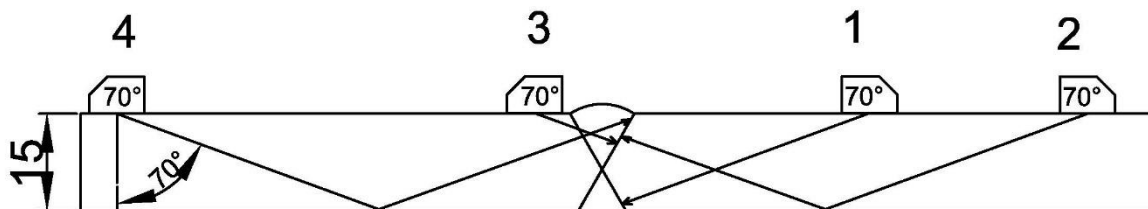
Slika 50. Postavljanje prve točke referentne krivulje na referentnom bloku. [2]



Slika 51. Postavljanje druge točke referentne krivulje na referentnom bloku. [2]



Slika 52. Postavljanje treće točke referentne krivulje na referentnom bloku. [2]



Slika 53. Položaj sonde za skeniranje cijelog volumena zavara [2]

Parametri ispitivanja:

Mjerno područje: 100mm

Debljina ispitane stijenke: 15mm

Sonda: MWB70-4

Pojačanje do referentne krivulje: 75dB

Prema kriterijima prihvatljivosti iz norme HRN EN ISO 11666 registrirati će se sve indikacije veće ili jednake visini referentne krivulje, kao neprihvatljive će se klasificirati indikacije veće od referentne krivulje za 4dB.

Ultrazvučnim ispitivanjem registrirana je jedna prihvatljiva indikacija na vertikalnom tehnološkom zavaru plašta izlazne cijevi, indikacija je 1,2 dB veća od referentne krivulje na dubini 8,5mm i ima dužinu od 3mm, fotografija 55.



Slika 53. Ultrazvučno ispitivanje kružnog tehnološkog zavora plašta izlazne cijevi. [2]



Slika 54. Ultrazvučno ispitivanje vertikalnog tehnološkog zavora plašta izlazne cijevi. [2]



Slika 55. Echo-gram prihvatljive indikacije na vertikalnom tehnološkom zavaru. [2]

6.3.6. ANALIZA REZULTATA

U vizualnoj kontroli registrirane nepravilnosti nisu prihvatljive prema HRN EN ISO 5817/ klasa C, stoga je nepravilnosti je potrebno otkloniti brušenjem i zavarivanjem.

U provedbi magnetske kontrole registrirane nepravilnosti nisu prihvatljive prema HRN EN ISO 23278/ klasa 2X te je nepravilnosti je potrebno otkloniti brušenjem i zavarivanjem.

Provedbom penetrantske kontrole registrirane nepravilnosti prihvatljive su prema HRN EN ISO 23277/ klasa 2X.

Ultrazvučnom kontrolom registrirana indikacija je prihvatljiva prema HRN EN ISO 11666/ klasa 3

7. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana uloga i značaj kontrole bez razaranja za postizanje zadovoljavajuće pouzdanosti zavarenih konstrukcija. Prikazana je posebna važnost KBR-a i njene mogućnosti za pouzdano otkrivanje grešaka, koje izazivaju koncentraciju naprezanja, smanjenje nosivosti i funkcionalnosti konstrukcije.

U eksperimentalnom dijelu rada proveden je cjelovit postupak ispitivanja i otkrivanja dozvoljenih i nedozvoljenih indikacija.

Indikacije koje ne zadovoljavaju kriterij prihvatljivosti prema relevantnim standardima otklonit će se brušenjem a mjesto indikacije popraviti će se zavarivanjem. Prema provedenom eksperimentu pokazano je da se KBR-om mogu otkriti nevidljive, volumetrijske (UT metodom), površinske greške (VT, PT i MT metode) koje uzrokuju koncentraciju naprezanja, smanjenje presjeka zavara i funkcionalne uporabe ispitnog dijela.

Kod provođenja eksperimentalnog dijela rada bitno je za sigurnost konstrukcije definirati potreban opseg ispitivanja, a kod provođenja ispitivanja, obratiti potrebnu pažnju na baždarenje i provjeru ispitnih sustava, čime se osigurava zadovoljavajuća točnost rezultata.

Svrha ovog rada jest biti od koristi svima onima koji žele cjelovito i praktično razmatrati i uspješno provoditi kontrolu bez razaranja s ciljem postizanja zadovoljavajuće sigurnosti zavarenih konstrukcija.

LITERATURA

- [1] <http://eisl.ie/radiography-inspection/#prettyPhoto>
- [2] Tekum d.o.o.
- [3] Hrvatsko Društvo za Kontrolu bez Razaranja – Skripta kvaliteta
- [4] CCH 70-4 Cahier des Charges Hydrauliques – Specification for Inspection of Steel Castings of Hydraulic Machines, – Edition 4
- [5] <https://medium.com/sandbox-forge/crack-repair-of-difficult-to-weld-materials>
- [6] https://www.reddit.com/r/Welding/comments/3lqfrx/tig_n00b_bad_porosityplease_help/
- [7] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/defects-imperfections-in-welds-slag-inclusions-043>
- [8] <http://www.weldingtipsandtricks.com/mig-welding-downhill.html>
- [9] <https://weldingweb.com/showthread.php?667631-Undercut-On-Dissimilar-Thicknesses>
- [10] Novosel Mladen, Cajner, Franjo, Krumes Dragomir: Željezni materijali. 2. dio : Konstrukcijski čelici, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 1994
- [11] Damir Jelaska: Elementi strojeva, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2011.
- [12] Vizualna kontrola II, Priručnik Hrvatskog društva za kontrolu bez razaranja (HDKBR), Zagreb, 2015
- [13] Vjera Krstelj: Ultrazvučna kontrola, FSB, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- [14] Ultrazvučna kontrola II, Priručnik Hrvatskog centra za kontrolu bez razaranja (HDKBR), Zagreb, 2015;
- [15] Magnetska kontrola II, Priručnik Hrvatskog centra za kontrolu bez razaranja (HDKBR), Zagreb, 2015
- [16] Juraga, K. Ljubić, M. Živčić: Pogreške u zavarenim spojevima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2000.
- [17] Defektoskopija materijala, Jugoslavenski savez društva za kontrolu bez razaranja, Sarajevo, 1985
- [18] Mirko Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, FSB, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2003.;
- [19] Inženjerski priručnik, Proizvodno strojarstvo, prvi svezak materijali, Školska knjiga, Zagreb, 1998.

PRILOZI