

# Primjena ultrazvučne kontrole zavarenih spojeva u proizvodnji izmjenjivača topline

---

Ištvan, Igor

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:548240>

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

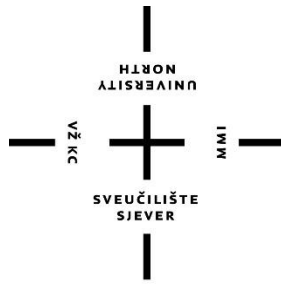
Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





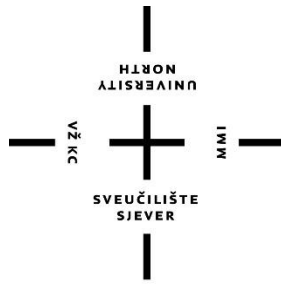
**Sveučilište  
Sjever**

**Diplomski rad br. 119/STR/2024**

**Primjena ultrazvučne kontrole zavarenih spojeva u  
proizvodnji izmjenjivača topline**

**Igor Ištvan, 2117/336**

Varaždin, rujan 2024. godine



# Sveučilište Sjever

Diplomski sveučilišni studij Strojarsstvo

Diplomski rad br. 119/STR/2024

## Primjena ultrazvučne kontrole zavarenih spojeva u proizvodnji izmjenjivača topline

**Student**

Igor Ištvan, 2117/336

**Mentor**

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj.

Varaždin, rujan 2024. godine

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarstvo		
PRISTUPNIK	Igor Ištvan	MATIČNI BROJ	0336022484
DATUM	13.09.2024.	KOLEGIJ	Suvremene proizvodne tehnologije
NASLOV RADA	Primjena ultrazvučne kontrole zavarenih spojeva u proizvodnji izmjenjivača topline		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Application of ultrasonic control of welded joints in the production of heat exchanger		

MENTOR	dr.sc. Matija Bušić	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, predsjednik povjerenstva		
	2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva		
	3. doc. dr. sc. Boris Jalušić, član povjerenstva		
	4. doc. dr. sc. Tanja Tomić, zamjenska članica povjerenstva		
	5.		

## Zadatak diplomskog rada

BROJ	119/STR/2024
OPIS	<p>U diplomskom radu potrebno je na praktičnom primjeru iz proizvodnje prezentirati primjenu ultrazvučne kontrole zavarenih spojeva pri izradi izmjenjivača topline. U teoretskom dijelu rada na temelju dostupne literature, definirati postupke ispitivanja zavarenih spojeva metodama bez razaranja te im navesti prednosti i nedostatke. Posebno detaljno opisati ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva. Pojasniti osnovne fizikalne principe na kojima se temelji ova metoda. Opisati uređaje i opremu koja je potrebna za ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva. Opisati tehnike ispitivanja sa navedenom opremom.</p> <p>U praktičnom dijelu rada provesti te opisati ultrazvučno ispitivanje na gotovim zavarenim spojevima izrađenog izmjenjivača topline. Opisati sonde i uređaj koji se koristi u ispitivanju. Navesti i objasniti rezultate ispitivanja te izvještaj o ispitivanju koji se sastavlja. Na kraju rada donijeti zaključak o izvršenim ispitivanjima i rezultatima. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu te eventualno dobivenu pomoć.</p>

ZADATAK URUČEN

16.09.2024.



PODPIS MENTORA

M. Bušić

## **Predgovor**

Ovim putem posebno se zahvaljujem svom mentoru, doc. dr. sc. Matiji Bušiću na izdvojenom vremenu, stručnim savjetima, smjernicama i sveukupnoj pomoći tijekom izrade diplomskog rada.

Također, zahvaljujem se svim profesorima na Sveučilištu Sjever na izvrsnoj suradnji, prenesenom znanju i iskustvu.

Na kraju, posebnu zahvalu dugujem svojoj obitelji na beskrajnoj podršci tijekom studiranja.

## Sažetak

Cilj ovog rada je detaljno prikazati postupak ultrazvučnog ispitivanja zavarenih spojeva modernom višepretvorničkom metodom („Phased Array“) i konvencionalnom metodom odjeka („Pulse Echo“). Početak teorijskog dijela rada odnosi se na najčešću podjelu nerazornih metoda, njihov opis, te su navedene glavne karakteristike, prednosti i nedostaci za svaku od metoda. Isto tako, razrađene su fizikalne osnove ultrazvuka koje predstavljaju temelj rada ultrazvučnog sustava. Navedena je najčešća korištena oprema od koje se sastoji ultrazvučni sustav, uz pojašnjenje njezinog načina rada. U eksperimentalnom dijelu na regeneratore (izmjenjivaču topline) višepretvorničkom metodom proveden je postupak ultrazvučnog ispitivanja sučeljenog zavarenog V-spoja, te je na podsklopu transformatora metodom odjeka provedeno ultrazvučno ispitivanje sučeljenog zavarenog X-spoja. Detaljno je prikazana korištena ultrazvučna oprema, kao i postupci kalibracije i podešavanje sustava, uključujući pripremu samog materijala prije ispitivanja te postupak vođenja sonde. Također, prikazan je princip mjerenja debljine stijenke materijala na primjeru izmjenjivača topline. Na kraju rada na osnovu dobivenih rezultata provedena je analiza uz prikaz izvještaja ispitivanja.

**Ključne riječi:** nerazorne metode, višepretvornička metoda, metoda odjeka, ultrazvučni sustav

## **Abstract**

The objective of this paper is to present the detailed procedure of ultrasonic testing of welded joints using the modern phased array ultrasonic testing method and the conventional pulse-echo method. The beginning of the theoretical part of the paper refers to the most common division of non-destructive methods and their description. Also listed are the main characteristics, as well as advantages and disadvantages of each method. Furthermore, the paper describes the physical foundations of ultrasound, which represent the basis of the operation of the ultrasound system. The most commonly used equipment that makes up the ultrasound system is also listed, along with an explanation of its mode of operation. In the experimental part, on the regenerator (heat exchanger), the procedure of ultrasonic testing of the butt-welded V-joint was carried out using the multi-transducer method while, on the sub-assembly of the transformer, the ultrasonic testing of the butt-welded X-joint was carried out using the echo method. In addition, the ultrasound equipment used, as well as the calibration and system adjustment procedures, including the preparation of the materials before testing and the procedure of guiding the probe, are presented in detail. Furthermore, the principle of measuring the thickness of the material wall is presented on the example of the heat exchanger. Finally, based on the obtained results, an analysis was carried out and the testing report was presented.

**Keywords:** non-destructive testing, phased array ultrasonic testing, pulse-echo method, ultrasound system

## Popis korištenih kratica

<b>PA</b>	Višepretvornička metoda (Phased Array)
<b>PE</b>	Metoda odjeka (Pulse-Echo)
<b>KBR</b>	Kontrola bez razaranja
<b>NDT</b>	Nerazorne metode ispitivanja (Non-Destructive Testing)
<b>TOFD</b>	Metoda difrakcije (Time of Flight Diffraction)
<b>ISO</b>	Međunarodna organizacija za standardizaciju (International Organization for Standardization)
<b>EN</b>	Europska norma (European standard)
<b>MIG</b>	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (Metal Inert Gas)
<b>MAG</b>	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina (Metal Active Gas)
<b>EPP</b>	Elektrolučno zavarivanje pod praškom
<b>TIG</b>	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti plina (Tungsten Inert Gas)
<b>UT</b>	Ultrazvučni sustav
<b>DGS</b>	Udaljenost-pojačanje-veličina (Distance Gain Size)
<b>DAC</b>	Korekcija amplitude s udaljenošću (Distance Amplitude Correction)
<b>TCG</b>	Korekcija pojačanja s vremenom (Time Corrected Gain)
<b>AWS</b>	Američko društvo za zavarivanje (American Welding Society)
<b>API</b>	Američki naftni institut (American Petroleum Institute)
<b>ZUT</b>	Zona utjecaja topline
<b>MP<sub>min</sub></b>	Minimalno mjerno područje
<b>d<sub>ERS</sub></b>	Promjer ekvivalentne veličine reflektora



## Popis fizikalnih veličina

Oznaka	Jedinica	Opis
$f$	Hz	frekvencija
$v$	m/s	brzina
$\lambda$	m	valna duljina
$Z$	Ns/m <sup>3</sup>	karakteristična akustična impedancija
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća materijala
$A$	mm	amplituda titranja

# Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Nerazorne metode ispitivanja zavarenih spojeva .....	2
2.1. Vizualna metoda.....	3
1.1.1. Optička pomagala i instrumenti .....	4
2.2. Penetrantska metoda.....	6
2.2.1. Koraci ispitivanja penetrantskom metodom .....	6
2.3. Magnetna metoda .....	8
2.3.1. Princip ispitivanja .....	9
2.3.2. Postupak magnetizacije i potrebna oprema .....	11
2.4. Ultrazvučna metoda.....	13
2.4.1. Princip ispitivanja .....	13
2.4.2. Prednosti i nedostaci ultrazvučne metode .....	14
2.5. Radiografsko ispitivanje.....	15
3. Fizikalne osnove ultrazvuka.....	17
3.1. Ultrazvučni izvori.....	17
3.1.1. Stvaranje ultrazvuka .....	18
3.2. Vrste valova.....	18
3.2.1. Frekvencija i brzina ultrazvučnih valova .....	19
3.2.2. Akustička impedancija sredstva.....	19
3.2.3. Piezoelektrični efekt.....	20
3.3. Refleksija ultrazvučnih valova .....	21
3.4. Difrakcija ili ogib valova.....	21
4. Oprema za ultrazvučno ispitivanje.....	22
4.1. Ultrazvučni uređaj .....	22
4.2. Ultrazvučne sonde .....	22
4.2.1. Normalna ili ravna sonda.....	23
4.2.2. Kutna sonda.....	24
4.2.3. Dvostruka sonda.....	24
4.2.4. Specijalna sonda.....	25
4.3. Kalibracijski blokovi .....	25
4.4. Kontaktno sredstvo.....	25
5. Eksperimentalni dio .....	26
5.1. Opis rada .....	26
5.2. Korištene metode i oprema za ultrazvučno ispitivanje zavara.....	33
5.2.1. Višepretvornička metoda „Phased Array“ .....	34
5.2.2. Metoda odjeka .....	36
5.2.3. Ultrazvučni uređaj OMNISCAN SX 1664PA.....	37
5.2.4. Višepretvornička sonda s klinom od 36° .....	38
5.2.5. Pretvarač položaja ENCI-2.5-LM .....	40
5.2.6. Ultrazvučni uređaj Krautkrämer USM 100.....	42
5.2.7. Kutna sonda MWB 60-4 i ravna sonda MB4S.....	43

5.2.8. Kalibracijski blokovi .....	44
5.2.9. Kontaktno sredstvo .....	45
5.2.10. Ostala oprema .....	46
5.3. Mjerenje debljine stijenke uređajem USM Go+ i sondom DA 512 EN .....	47
5.4. Postupak ultrazvučnog ispitivanja višepretvorničkom tehnikom „Phased Array“ sučeljenog V-zavara dobiven TIG i EPP postupkom.....	52
5.4.1. Priprema sustava za ispitivanje i podešavanje parametara .....	52
5.4.2. Priprema ispitne površine .....	56
5.4.3. Ultrazvučno ispitivanje sučeljenog V-zavara višepretvorničkom sondom.....	57
5.5. Postupak ultrazvučnog ispitivanja metodom odjeka sučeljenog X-zavara dobivenog MAG postupkom.....	59
5.5.1. Priprema sustava za ispitivanje i postupak kalibracije .....	59
5.5.2. Ultrazvučno ispitivanje sučeljenog X-zavara metodom odjeka ravnom sondom MB4S i kutnom sondom od 60° .....	64
5.6. Analiza rezultata i izvještaj o ispitivanju .....	66
6. Zaključak.....	71
7. Literatura .....	72

# 1. Uvod

Porast tehnologija zavarivanja utječe na sve veću proizvodnju zavarenih konstrukcijskih materijala, te njihovu svakodnevnu upotrebu što se reflektira na postavljanje određenih zahtjeva kvalitete izrađenih proizvoda. Velika većina metalnih konstrukcija i elemenata koji svoju primjenu pronalaze u gotovo svim industrijskim granama, izvedeni su raznim postupcima zavarivanja. Upravo iz tih razloga neophodno je osigurati kvalitetan zavar odnosno potrebno je obratiti pozornost na tražene zahtjeve kako bi se osigurala određena vrsta i oblik zavara, način pripreme samog materijala, redoslijed zavarivanja, adekvatan dodatni materijal kao i sva oprema za zavarivanje.

Prema tome od presudne važnosti je osigurati postupak ispitivanja zavara kako bi se mogle utvrditi njegove najvažnije karakteristike te dobiti podaci o razini uspješnosti izvedbe zavara. Jedan od najčešće korištenih načina ispitivanja zavarenih spojeva su nerazorne metode ispitivanja koje pružaju uvid u fizikalna svojstva materijala, određuju homogenost, potencijalne pukotine, nesavršenosti zavarenog spoja te uvelike pridonose vrednovanju kvalitete kako zavarenog spoja, tako i cijelog proizvoda. Značajna prednost koja ih čini posebnima je da nerazorne metode omogućuju provedbu postupka ispitivanja materijala, bez ikakvog razaranja materijala i utjecaja na funkcionalnost u stvarnim uvjetima bez zaustavljanja radnog stroja ili pogona.

U ovom radu poseban naglasak stavljen je na dvije metode ultrazvučnog ispitivanja zavarenih spojeva. Provedeno je ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva naprednom višepretvorničkom metodom na primjeru izmjenjivača topline, te ultrazvučno ispitivanje konvencionalnom metodom odjeka kojom je kutnom i ravnom sondom ispitan zavareni spoj na podsklopu transformatora. Ultrazvučna metoda je i najraširenija metoda nerazornih ispitivanja jer osim što brzo detektira pogreške unutar volumena materijala, vrlo je pouzdana i daje precizne rezultate. Osim mogućnosti ispitivanja, ultrazvučnom metodom može se provesti postupak mjerenja debljine stijenke materijala čiji je postupak također prikazan u eksperimentalnom dijelu rada na primjeru mjerenja debljine stijenke izmjenjivača topline. U radu je prikazana sva korištena oprema, način pripreme materijala, postupak kalibracije ultrazvučnog sustava detaljno su prikazani svi koraci u provedbi ispitivanja zavarenih spojeva ultrazvučnim metodama, kao i analiza dobivenih rezultata uz prikaz izvještaja ispitivanja. Važno je istaknuti da se postupak ultrazvučnog ispitivanja može provoditi i izravno na terenskim uvjetima, a sam postupak pripreme ne predstavlja visoko zahtijevan zadatak te se ispitivanje provodi pomoću prijenosne i uglavnom lagane opreme što pridonosi široj primjeni ovih metoda.

## 2. Nerazorne metode ispitivanja zavarenih spojeva

Šira primjena materijala i nagli razvoj tehnologije oblikovanja metala, te napredak automatizacije procesa zavarivanja ima za posljedicu potrebu poznavanja svojstva i kvalitete materijala. Kod procjene stanja materijala i određivanja njegove kvalitete nerazorne metode ispitivanja zauzimaju bitnu ulogu koja je od vitalne važnosti u svrhu osiguranja sigurnosti konstrukcija u eksploataciji. Nerazorne metode (*eng. Non-Destructive Testing - NDT*) ili kontrola bez razaranja (KBR) predstavlja skup metoda čija je svrha određivanje kvalitete i otkrivanje pogrešaka materijala, konstrukcija, strojnih dijelova ili proizvoda bez potrebe za njihovim oštećenjem što ih čini neizostavnim alatom kod sustava osiguravanja kvalitete.

Budući da svaka industrija koja proizvodi metalne konstrukcije, elemente mora osigurati njihovu pouzdanost tijekom rada, kontinuirano se provode ispitivanja nerazornim metodama koje značajno olakšavaju pregled i daju uvid u analizu ispitivanog objekta. Osnovu svih nerazornih metoda predstavljaju fizikalni principi kojima se ostvaruju temeljni koncepti provođenja procesa kontrole određenog materijala. Zbog svojih prednosti široku primjenu i bitnu ulogu pronalaze u raznim industrijama kao što su: zrakoplovstvo, brodogradnja, energetika, automobilska industrija, naftna i plinska industrija.

Značajna prednost nerazornih metoda je mogućnost provedbe ispitivanja na terenu što je od izuzetne važnosti kod procjene stanja konstrukcije tijekom eksploatacije čime se mogu predvidjeti potencijalni uzroci nastanka narušavanja funkcionalnosti konstrukcije. Primjenom ovih metoda rizik od otkaza konstrukcije i odstupanja zahtijevanih karakteristika materijala sveden je na minimum čime su spriječene moguće nezgode koje bi utjecale na neželjene ekološke posljedice i dovele u pitanje sigurnost ljudi. [1]

Najčešća podjela nerazornih metoda uključuje: [1]

- Optičke metode
- Zvučne i ultrazvučne metode
- Električne i/ili magnetske metode
- Radijacijske metode
- Penetrantske metode
- Toplinske metode

Metode imaju cilj otkriti nepravilnosti u materijalu i procijeniti stanje objekta, no nije svaka metoda pogodna za ispitivanje svih materijala jer postoje ograničenja u pogledu primjene za određenu vrstu, debljine i oblik materijala, te načina praćenja indikacija. Isto tako, svaku metodu karakterizira određen postupak pripreme, razne tehnike ispitivanja te primjena raspoložive opreme ovisno o raznim čimbenicima poput: vrste ispitivanog materijala, određene pogreške koja se ispituje te uvjeta ispitivanja.

Upravo iz tih razloga, unutar svake industrije za ispitivanje materijala uobičajeno se prakticira povezivanje više NDT metoda sa mogućnošću ponavljanja postupka više puta na istom mjestu čime se povećava učinkovitost procesa kontrole određenog materijala. [1]

Uspješnost postupka ispitivanja nerazornih metoda zahtijeva odgovarajuću obuku i certificiranje NDT osoblja prema određenim standardima. Ispitivanje provodi stručno osoblje koje se s obzirom na osposobljenost može svrstati unutar tri razine stupnja.

## **2.1. Vizualna metoda**

Vizualna metoda u većini slučajeva predstavlja prvi korak kod ispitivanja materijala u svakoj fazi proizvodnje, te služi za procjenu vanjskog izgleda dimenzija i površinskih nepravilnosti. Ova metoda se koristi kao preteča metoda ostalim naprednijim metodama i kao takva posjeduje određene svojstvene karakteristike kod pregleda ispitnog objekta. Budući da se ovom metodom mogu otkriti samo površinske nepravilnosti, može se primijeniti u kombinaciji s ostalim nerazornim metodama kako bi se postigao detaljan uvid u stanje materijala i osigurala kvaliteta te pouzdanost rezultata. [1]

Uz pomoć vizualne metode potrebno je ispitati i prepoznati nesukladnosti zavarenih spojeva prije početka zavarivanja, tijekom i nakon završetka postupka zavarivanja. Tumačenje i pouzdanost rezultata velikim dijelom ovisit će o sposobnostima ispitivača, no kako bi se postigla tražena preciznost u donošenju rezultata, potrebno je odabirom odgovarajuće tehnike smanjiti subjektivnost ispitivača na najmanju mjeru. Unutar vizualne kontrole (Slika 2.1) vrši se kontrola dimenzija i provjera proizvoda kako bi svi podaci o materijalu i oznakama proizvođača te procesu proizvodnje ispunjavali uvjete usklađenosti. Vizualna metoda se dijeli ovisno o načinu pregleda na direktnu i indirektnu tehniku. Direktna tehnika obuhvaća provedbu ispitivanja samog ispitivača bez opreme i dodatnih pomagala, dok se indirektna tehnika odnosi na ispitivanje uz pomoću uređaja i potrebnih pomagala koji omogućuju pregled nepristupačnih površina.



*Slika 2.1 Vizualna metoda [2]*

Postupak ispitivanja i pronalaženje nedostataka moguće je provesti uz pomoć optičkih alata i uređaja ili golim okom, a najčešće makro i mikro pogreške koje se mogu identificirati na površini materijala su:

- Nepravilan oblik zavarenog spoja
- Loša izvedba spojeva
- Pukotine
- Poroznost
- Pogrešne dimenzije
- Nepravilna završna obrada
- Raslojavanje premaza

Vizualna metoda se provodi na temelju analize interakcije svjetlosti i površine objekta koji se ispituje. Izvor svjetla ima ključan utjecaj na učinak ispitivanja, stoga rasvjeta dobivena pomoću bijelog ili umjetnog svjetla mora osigurati jasnu vidljivost i uvjete promatranja objekta.

Laserska interferometrija – optička holografija pripada nekontaktnim metodama, a temelji se na koherentnosti lasera čime se omogućuje brzo te precizno ispitivanje promjena koje su nastale površinskim ili potpovršinskim nesavršenostima tijekom udarnog djelovanja. Ova metoda služi još i za mjerenje veličina, oblika ispitivanog objekta. [1]

### **1.1.1. Optička pomagala i instrumenti**

Za detektiranje površinskih nepravilnosti najčešće korištena optička pomagala su: lupe i povećala, te prijenosni endoskopski i boroskopski uređaji. Također, uz pomagala moguća je upotreba računalno potpomognutih sustava (daljinsko upravljanje kamerom) koji služe za praćenje i kontrolu teško dostupnih mjesta.

Nedostaci vizualne metode ispitivanja odnose se na nemogućnost uvida ispod površine materijala te utvrđivanja potencijalnih nepravilnosti unutar materijala koje nisu vidljive golim okom ili pomoću pomagala. [2] Također bez dodatnih optičkih pomagala postoji mogućnost da se teško uoče svi površinski nedostaci i krivo interpretira rezultat pregleda. Na slici 2.2 je prikazan optički instrument (boroskop) koji se koristi prilikom potrebe za pregledom nepristupačnih mjesta unutrašnjosti objekta.



*Slika 2.2 Boroskop [3]*

Na slici 2.3. prikazan je savitljivi endoskop (fibroskop) koji se u odnosu na boroskop razlikuje po savitljivoj cijevi koja omogućuje pristup ispitivanju nedostupnih materijala unutar objekta kao što su: unutrašnjost spremnika, cjevovoda, kotlova, cisterni.



*Slika 2.3 Fibroskop [3]*

Primjena videoscopa (Slika 2.4) osigurava detaljno ispitivanje pomoću kamere koja se dovodi u unutrašnjost dijelova objekta u nedostupnim ili opasnim okruženjima, te snima površinu koja se istovremeno prikazuje na monitoru kako bi se u određenom trenutku postavili potrebni parametri ispitivanja i u konačnici dobila analiza rezultata.





*Slika 2.4 Videoskop [4]*

Budući da rezultati ispitivanja vizualnom metodom značajno ovise o načinu pripreme površine, važno je da ispitivana površina objekta bude pravilno pripremljena kako bi se uklonile nakupljene nečistoće te ne bi došlo do otežanog otkrivanja površinskih nedostataka.

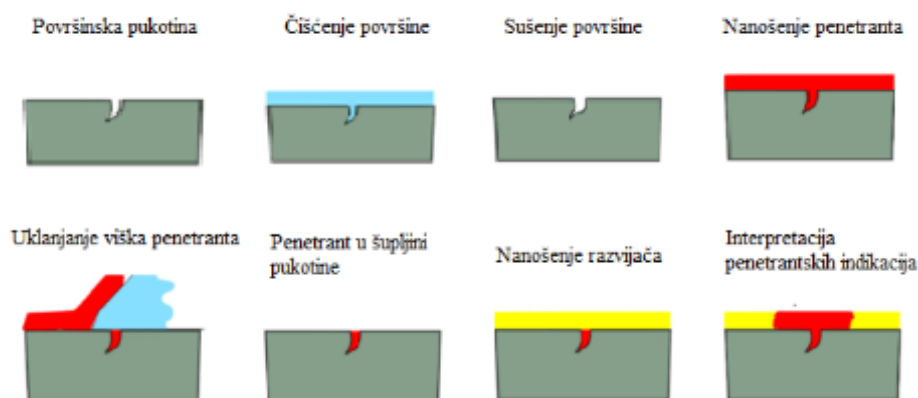
## **2.2. Penetrantska metoda**

Penetrantska kontrola često se provodi nakon vizualne kontrole s ciljem detektiranja najsitnijih površinskih otvorenih i nevidljivih pukotina, šupljina i poroziteta. Pogreške u materijalu mogu nastati tijekom toplinske obrade, zavarivanjem, brušenjem, uslijed preopterećenja materijala ili u eksploataciji. Također, penetrantska metoda može se izvoditi i za ispitivanje nepropusnosti konstrukcija. Osnovne značajke ove metode su brzina i jednostavnost, relativno niska cijena provođenja postupka uključujući i osjetljivost na male nedostatke na površini materijala. Postupak ispitivanja penetrantske metode provodi se na temelju kapilarnog učinka kod kojeg se ostvaruje sposobnost penetranta da prodire u slobodne prostore i nedostatke na površini materijala.

### **2.2.1. Koraci ispitivanja penetrantskom metodom**

Prije početka ispitivanja, vrlo je važno omogućiti prikladnu pripremu površine materijala kako bi se ispunio uvjet za pravilno prodiranje penetranta u površinske nepravilnosti te u konačnici otkrile indikacije koje ukazuju na površinske pogreške. Dakle, priprema površine je najvažniji korak za uspješno izvođenje penetrantske metode. Površina materijala zahtijeva detaljno čišćenje s ciljem otklanjanja svih nataloženih masti i nakupljenih nečistoća koje bi otežavale ispitivanje.

Odmah nakon pripreme površine slijedi nanošenje penetranta na površinu materijala koji se ostavlja odgovarajuće vrijeme da penetrira u potencijalne površinske nepravilnosti. Nadalje, potrebno je pažljivo ukloniti višak neupijenog penetranta sa površine uz pomoć ispiranja, ili korištenjem posebnih sredstava za uklanjanje. Sljedeći korak je nanošenje razvijaa pomoću kojeg se poboljšava izlaz penetranta iz prostora pukotina i povećava svjetlucanje kako bi se olakšala vidljivost tragova penetranta koji ukazuju na moguće prisutne pukotine. [1] Slika 2.5 prikazuje korake kod postupka ispitivanja penetrantskom metodom.



Slika 2.5 Postupak provođenja penetrantske metode [5]

Postoji nekoliko vrsta penetranta koji se mogu nanijeti na materijal u obliku obojenih tekućina, fluorescentnih tekućina, ulja i masti. Nakon završetka ispitivanja bilježe se rezultati ispitivanja te se zahtijeva naknadno čišćenje površine. Na slici 2.6 prikazano je ispitivanje obojenim penetrantom.



Slika 2.6 Ispitivanje obojenim penetrantom [6]

Najznačajnije prednosti penetrantske kontrole su:

- Brza i jednostavna primjena
- Pogodna za ispitivanje na raznim vrstama materijala (metalni, nemetalni, magnetski i ne magnetski, te elektro vodljivim i nevodljivim)
- Mogućnost primjene na kompleksnim strukturama i geometrijama
- Uspješno otkrivanje pogrešaka velikih površina i volumena konstrukcija
- Visoka osjetljivost na površinske nedostatke
- Ne zahtijeva posebnu opremu te relativno niska cijena opreme
- Prenosiva oprema omogućava rad na terenu

Nedostaci penetrantske kontrole obuhvaćeni su sljedećim:

- Rezultati ispitivanja ovise o pravilnoj pripremi površine i stanju ispitivanog materijala
- Nemogućnost otkrivanja dubljih pogrešaka u volumenu materijala
- Nije pogodna na poroznim materijalima
- Hrapavost, nečistoće, boje ili prljavštine na površini materijala mogu otežati penetraciju i identifikaciju nepravilnosti
- Mogućnost lažnih pukotina kod loše pripreme ili uklanjanja penetranta
- Kvaliteta ispitivanja ovisi o uvjetima promatranja
- Ispitivaču mora biti omogućen direktan pristup mjestu ispitivanja
- Rad s kemikalijama zahtijeva dodatan oprez
- Potrebno je čišćenje nakon kontrole

### **2.3. Magnetna metoda**

Magnetna metoda (Slika 2.7) se primjenjuje za potrebe brze identifikacije pogrešaka na ili neposredno ispod površine feromagnetskih materijala (željezo, nikal, i kobalt te neke od njihovih legura) pomoću magnetskog polja. Magnetnom metodom mogu se otkriti mnoge nepravilnosti koje su posljedica tehnoloških i toplinskih djelovanja, uključujući nepravilnosti nastale za vrijeme eksploatacije i umora materijala. Osnovno svojstvo magnetne metode, a ujedno i prednost u odnosu na ostale metode je da se prije ispitivanja ne zahtijeva posebna priprema površine. [1]

Prednosti magnetne metode su:

- Relativno brz i jeftin postupak
- Ne zahtijeva skupu opremu
- Nije potrebna veća razina pripreme površine
- Mogu se ispitati objekti složenih oblika
- Prijenosna oprema olakšava ispitivanje na terenu

Nedostaci magnetne metode su:

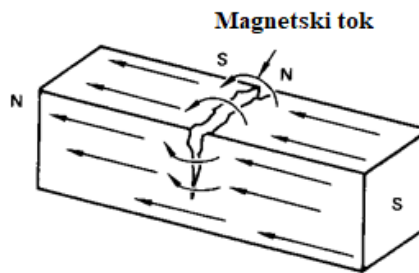
- Primjena metode samo na feromagnetnim materijalima
- Ne može otkriti dublje greške
- Orijentacija i snaga magnetskog polja su kritični
- Nakon ispitivanja potrebno je provesti demagnetizaciju materijala



*Slika 2.7 Magnetna metoda [7]*

### **2.3.1. Princip ispitivanja**

Pronalaženje nepravilnosti izvodi se puštanjem magnetskog polja kroz zavareni spoj te promatranjem promjena magnetskih silnica i mjesta s pojačanim grupiranjem magnetskih čestica koja su ujedno i mjesta formiranja pogrešaka. Kod ispitivanja homogenog materijala, tok magnetskih silnica ostaje neporemećen i paralelan, dok kod prisutnosti pogrešaka, dio magnetskih silnica otklanja se od pogrešaka prema površini materijala i tu stvara pojačano magnetsko polje (Slika 2.8). [1]



*Slika 2.8 Registracija izlaznog magnetskog polja u okolini pogreške [8]*

Prema tome kako bi se otkrili nedostaci koriste se sitno mljevene željezne čestice koje se nanose na ispitni objekte i u slučaju postojanja pogreške, nastat će nejednaka gustoća magnetskog polja i čestice će biti privučene unutar pukotine što će ukazivati na vidljivu indicaciju položaja pogreške u materijalu te njene približne veličine i oblik. Magnetske čestice na površini ispitnog objekta služe za bolju vidljivost i lakše uočavanje pogrešaka na način da magnetiziraju i usmjeravaju magnetske silnice.

Zbog visoke osjetljivosti magnetna metoda omogućuje da svaka pogreška do najsitnijih pukotina u materijalu, presijeca tok i pruža određeni otpor prolasku magnetskim silnicama. Veličina koncentracije ili nakupine indikacijskih magnetiziranih čestica iznad pogrešaka, uvjetovana je dubinom i položajem u materijalu te kutom ostvarivanja magnetskog polja. Za učinkovito otkrivanje pogrešaka važno je da magnetsko polje djeluje okomito na položaj grešaka. Tijekom ispitivanja sitnih pogrešaka ispod površine unutar materijala, razilaženja silnica okolo pogrešaka i prema površini materijala su nepotpuna i nedovoljna. Shodno tome, nastaju neznatne koncentracije čestica iznad pogrešaka, čime je smanjena mogućnost za njihovu detekciju. Upravo iz tog razloga otkrivanje uzdužno položenih pogrešaka u materijalu omogućuje poprečno djelovanje magnetskih silnica. [8]

Princip magnetne metode može se prikazati u nekoliko osnovnih koraka: [1]

- Priprema ispitne površine
- Postizanje zadovoljavajuće magnetizacije
- Registriranje promjene magnetskog polja uslijed deformacija magnetskih silnica u okolini pogreške
- Interpretacija i analiza otkrivene pogreške
- Provođenje demagnetizacije s ciljem pripreme objekta za obavljanje određene funkcije

### 2.3.2. Postupak magnetizacije i potrebna oprema

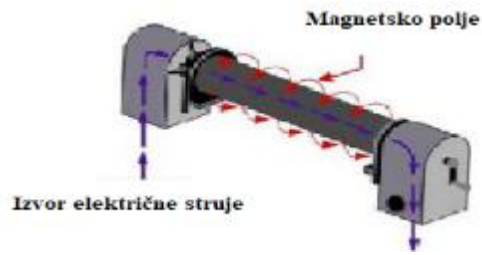
Vrlo velika upotreba magnetne metode doprinijela je raznim načinima stvaranja magnetskog polja, odnosno magnetizacije objekta, kao i tehnikama ispitivanja raznom opremom i uređajima. Tehnike obuhvaćaju izlaganje materijala magnetskom polju koje se ostvaruje primjenom permanentnog magneta, elektromagneta, te provodnim ili pomičnim strujama. Magnetizacija ispitnog objekta može se provoditi istosmjernom i izmjeničnom strujom. Glavna razlika je da se pomoću istosmjerne struje postiže jednosmjerno magnetsko polje i dublja penetracija što je korisno za pronalazak dubljih pukotina, dok se izmjenično strujom ostvaruje promjenjivo magnetsko polje pogodno za otkrivanje površinskih grešaka. [8]

Izbor potrebnog postupaka, vrsta opreme, jačina magnetskog polja i vrsta magnetnih čestica zahtijevaju poznavanje i uvelike ovise o sljedećim parametrima:

- Uvjetima ispitivanja
- Obliku objekta
- Dimenzijama
- Stanju površine
- Očekivanim pogreškama u ispitnom materijalu

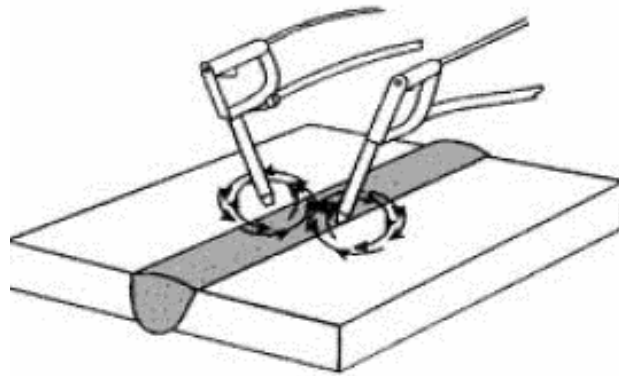
Mnogobrojni načini magnetizacije doveli su do raznolikosti opreme i uređaja koji se primjenjuje kod magnetne metode poput: uređaja za magnetizaciju oblika jarma ili elektromagneti, magnetometra, permanentnih magneta, kontaktnih elektroda, zavojnica, demagnetizatora i magnetskih čestica. Magnetne čestice mogu biti u određenoj boji, a nanose se na ispitnu površinu zavisno od postupka u suhom stanju ili kao suspenzija.

Prilikom osjetljivijih ispitivanja, tamo gdje se traže sitne pukotine primjenjuju se fluorescentne magnetske čestice. Uspostavljanje magnetskog polja u objektu može se izvesti primjenom raznih metoda, a najčešća podjela zasniva se na izravnoj i neizravnoj magnetizaciji. Kod izravnog magnetiziranja (Slika 2.9) struja prolazi izravno kroz objekt. Protok struje uzrokuje stvaranje kružnog magnetskog polja unutar i okolo vodiča. Upotrebom ove vrste magnetiziranja, potrebno je osigurati uspostavljanje i održavanje dobrog električnog kontakta između ispitne opreme i objekta ispitivanja. [8]



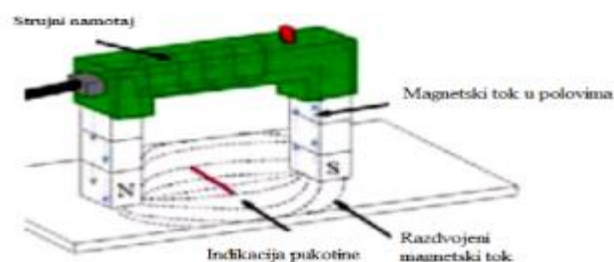
Slika 2.9 Izravna magnetizacija [8]

Ispitivanje elektrodnom uređajem (Slika 2.10) koristi elektrode postavljene u kontakt s objektom kroz koje prolazi električna struja te se tako stvara kružno elektromagnetsko polje. Između razmaka elektroda magnetsko polje doseže najveću širinu.



Slika 2.10 Magnetizacija elektrodnom uređajem [8]

Neizravna magnetizacija se postiže korištenjem jakog vanjskog magnetskog polja za stabilizaciju magnetskog polja unutar objekta. U ovu metodu spada korištenje permanentnih magneta čija je uporaba ograničena zbog nedostatka kontrole jakosti polja i poteškoća s postavljanjem magneta. Elektromagneti u obliku jarma (Slika 2.11) intenzivno se koriste u industriji te kada se magnet postavi na objekt, uspostavlja se magnetsko polje između sjevernog i južnog pola magneta. Važno je napomenuti da se ispitivanje objekta elektromagnetom koristi za otkrivanje pogrešaka svih smjerova, ali samo za površinske pogreške. [8]



Slika 2.11 Elektromagnetski jaram [8]

## 2.4. Ultrazvučna metoda

Ultrazvučna metoda je visoko usvojena metoda koja u današnjoj industriji zauzima najvažniju ulogu ispitivanja širokog spektra materijala i raznovrsnih proizvoda od kojih su najčešća ispitivanja zavarenih spojeva, limova, posuda pod tlakom, strojnih dijelova, otkivaka odljevaka, teških osovina i još mnogo drugih komponenti i sustava.

Budući da je ova metoda vrlo značajna i najkorištenija, zbog svoje visoke prilagodbe i osiguranja preciznosti rezultata, u nastavku ovog rada biti će obrađeni principi ultrazvučnog ispitivanja zavara, tehnike te prikaz mjerne opreme i interpretacija dobivenog rezultata. Važna posebnost ultrazvučne metode je što se mogu otkriti pukotine unutar materijala, njihova veličina, oblik i položaj te ispitati razne debljine materijala koje nisu izvedive ostalim metodama. Osim navedenih prednosti ultrazvučna metoda nudi mogućnost mjerenja debljine stijenke te se može primijeniti i za određivanje svojstva materijala (brzina vučnih valova, Youngov modul elastičnosti, modul smicanja), kao i za mjerenje zaostalih naprezanja.

### 2.4.1. Princip ispitivanja

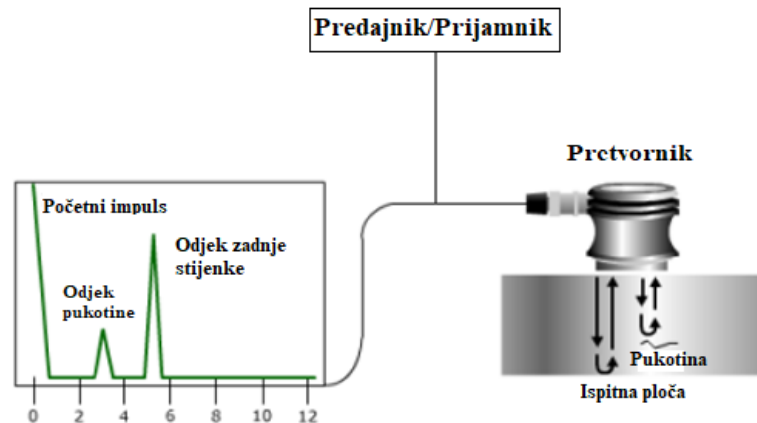
Za učinkovito obavljanje postupka ispitivanja ultrazvučnom metodom potrebno je osposobljeno osoblje koje osigurava pravilnu upotrebu opreme te interpretaciju rezultata u skladu s primijenjenim normama i propisima. Prije početka ispitivanja uz pomoć kalibracijskih blokova potrebno je izvršiti kalibraciju ultrazvučnog uređaja s obzirom na materijal koji se ispituje. Metoda ultrazvučnog ispitivanja se oslanja na principe ultrazvuka koji uključuje korištenje visokofrekventnih zvučnih valova za procjenu unutarnje strukture materijala bez nanošenja bilo kakve štete.

Primjena metode ultrazvučnog ispitivanja zasniva se svojstvu prolaza ultrazvučnih valova kroz homogene materijale. Za potrebe ispitivanja koriste se visokofrekventni zvučni valovi obično u rasponu od 0,5 do 15 MHz. Time je omogućeno praćenje odaslanih ultrazvučnih valova koji se prolaskom kroz materijal mogu djelomično ili potpuno reflektirati od unutarnjih granica nedostataka ili granica različitih sredstava (Slika 2.12). [1]

Shodno intenzitetu odraza i vremenu koje je potrebno za vraćanje reflektiranog vala moguće je odrediti karakteristike pogreške unutar materijala. Nastale promjene se detektiraju i analiziraju pomoću određenih grafičkih ili zvučnih signala na zaslonu ultrazvučnog uređaja. Analizom ovih signala te prema položaju, obliku i veličini amplitude signala na zaslonu može se identificirati vrsta pogreške te njezina orijentacija, položaj i veličina unutar materijala.



Vrlo visoka osjetljivost ultrazvučnog ispitivanja postiže na temelju karakteristike ultrazvučnih valova da se značajno reflektiraju od nepravilnosti koja je u smjeru širenja vala veličine valne duljine. Čimbenici koji utječu na preciznost rezultata su: ujednačenost brzine zvuka ispitnog materijala, stupnju raspršenja ili apsorpcije zvuka, stanje površine te način postupka kalibracije uređaja.



Slika 2.12 Princip ispitivanja ultrazvučnom metodom [9]

#### 2.4.2. Prednosti i nedostaci ultrazvučne metode

Prednosti koje se mogu postići primjenom ultrazvučnog ispitivanja su:

- Visoka pouzdanost i ponovljivost rezultata
- Učinkovitost prodiranja koja pruža otkrivanje pukotina duboko unutar materijala
- Visoka osjetljivost kojom je moguće utvrditi vrlo sitne nepravilnosti
- Višenamjenska metoda omogućuje uvid u svojstva materijala, kao i debljine stijenke
- U odnosu na ostale nerazorne metode dobiva se veća točnost u određivanju dubine unutarnjih pogrešaka
- Dobivaju se saznanja o veličini, obliku i orijentaciji pukotine
- Ispitivanje se može provoditi na terenu ili u pogonu tijekom proizvodnje
- Ne predstavlja opasnost za materijale i opremu u blizini

Kao i kod ostalih NDT metoda, ultrazvučno ispitivanje ima određene nedostatke poput:

- Iziskuje znanje korištenja opreme i certificirano osoblje za provedbu ispitivanja i analizu rezultata
- Moguća pojava lažnih pogrešaka koje se pogrešnom interpretacijom mogu zamijeniti stvarnim
- Priprema površine za ispitivanje utječe na osjetljivost ispitivanja
- Grubi postupak čišćenja površine može uzrokovati konkavna područja koja sprječavaju kontakt sonde i prijenos ultrazvuka u materijal
- U slučaju ispitivanja objekata u kojima se nalazi medij potrebno odstraniti medij osim ako nije propisano drugačije
- Kod objekata specifične konstrukcije i oblika otežano je ispitivati
- Potrebno pažljivo provesti postupak umjeravanja uređaja

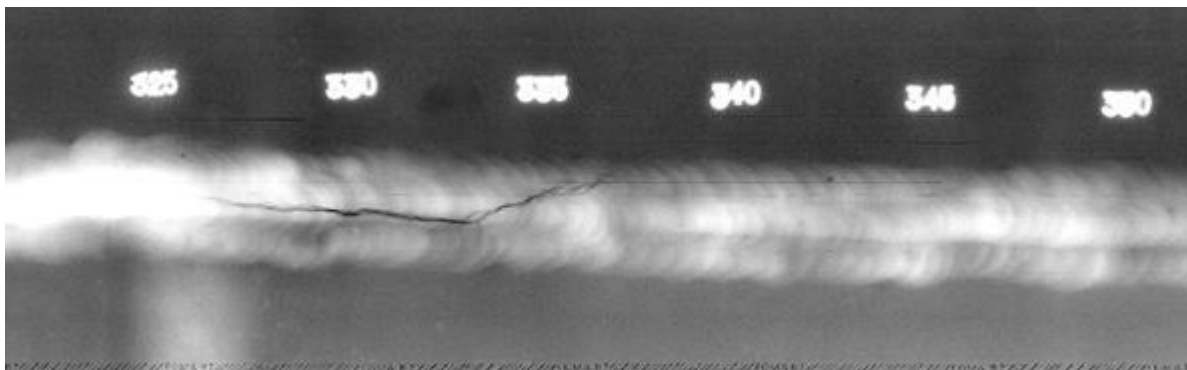
## 2.5. Radiografsko ispitivanje

Radiografskim ispitivanjem kontrolira se kvaliteta materijala kroz kvalitativno i kvantitativno praćenje pogrešaka na površini ili u unutrašnjosti volumena materijala. Ovim ispitivanjem moguće je otkriti diskontinuitete kao što su: pukotine, poroznost, i uključci u materijalima ili zavarenim spojevima. Radiografska metoda se temelji na postupku prozračivanja pomoću elektromagnetskog zračenja (X-zrake ili gama zrake) male valne duljine.

Korištenjem X zraka ispituju se tanki materijali i elementi manje debljine, dok se gama zrakama mogu ispitivati deblji objekti. Provođenje ispitivanja obuhvaća postavljanje filma osjetljivog na zračenje s jedne strane zavara i izvora zračenja s druge strane zavara. Nakon zračenja i razvijanja filma, na filmu se dobiju određeni kontrasti i različiti tonovi zacrnjenja odnosno slike unutarnje strukture zavara. Pritom količina zračenja koja dopire do filma kroz ispitni materijal utjecat će na zatamnjenost filma (gustoću). [10]

Intenzitet zračenja koju film prima i pojava različitih razina apsorpcije u pojedinim područjima ispitnog materijala ovisit će o određenim fizikalnim svojstvima poput: vrste, strukture, debljine ispitnog materijala, uključujući i vrstu, veličinu, oblik i položaj pogrešaka. Prema varijacijama u gustoći obrađenog filma utvrđuju se nastali diskontinuiteti.

Stoga će ispitivani materijal u području bez diskontinuiteta imati veću gustoću i količinu apsorbirane energije zračenja za razliku od pojedinih dijelova materijala gdje dolazi do promijene debljine uslijed diskontinuiteta. Samim time, područja sa diskontinuitetima u materijalu se prikazuju kao tamni obrisi na filmu, dok se dio materijala bez diskontinuiteta prikazuje kao svijetlo područje (Slika 2.13). [10]



*Slika 2.13 Radiografsko ispitivanje [11]*

Značajna prednost radiografske metode je što priprema ispitne površine obično nije potrebna te osigurava trajnu evidenciju kvalitete, procjene zavara.

Prednosti radiografske metode su:

- Visoka pouzdanost, prilagodljivost i točnost
- Otkrivanje površinskih i unutarnjih diskontinuiteta
- Ne zahtijeva se priprema ispitne površine
- Trajna dokumentacija rezultata ispitivanja
- Metoda prikladna za razne vrste materijala

Neki od nedostataka radiografske metode su:

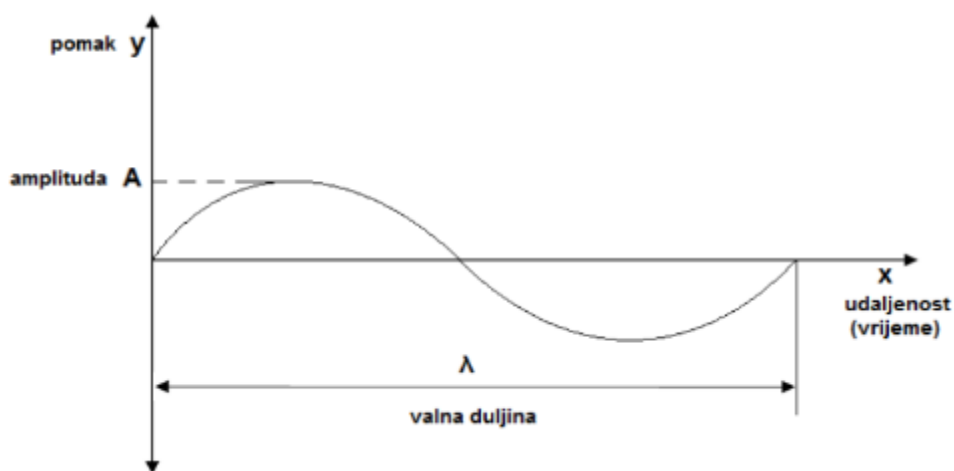
- Moguća ugrožena sigurnost ispitivača uslijed zračenja
- Potencijalna opasnost izlaganja radijaciji osoba u blizini ispitivanja
- Relativno skupa i složena oprema
- Spor postupak ispitivanja
- Obično nije naznačena dubina diskontinuiteta
- Zahtijeva pristup objema stranama ispitivanog objekta
- Visoki stupanj stručnosti ispitivača

### 3. Fizikalne osnove ultrazvuka

#### 3.1. Ultrazvučni izvori

Ultrazvuk je mehaničko elastično titranje materije koji sadrži razinu frekvencije višom od gornje granice slušne mogućnosti kod ljudi, a kreće se oko 20 kHz. Elektroakustički pretvarači odnose se na uređaje koji se koriste za pretvaranje zvuka. Podrazumijeva se da je izvor zvuka, odnosno ultrazvuka cijelo vrijeme u kontaktu sa sredstvom koje osigurava prijenos zvuka te sredstvo ima utjecaj na izvor silama reakcije i stvara prigušenje titraja. Dio spektra frekvencija koje proizvodi neki izvor zvuka uključuje visoke zvučne frekvencije, a spektar zvučnih frekvencija sačinjava boju zvuka. Titranje izvora ultrazvuka biti će iste frekvencije, ali različite faze u odnosu na čestice u sredstvu pobuđene ultrazvukom. Progresivni ultrazvučni val predstavlja nastanak i razvijanje prostorne razdiobe pomaka određenom brzinom prolaskom kroz medij. Također postoji ravni harmonički val koji nastaje kada je sinusoidan oblik rasporeda pomaka u smjeru širenja vala te u trenutku titranja pomaka čestica istom frekvencijom na plohu koja je okomita na smjer širenja vala. Razvijanje titraja iz jedne točke kružno u prostor uzrokuje nastanak kuglastog vala. [1]

Kod identifikacije nepravilnosti valna duljina (Slika 3.1) označava vrlo značajan parametar koji utječe na osjetljivost postupka ultrazvučnog ispitivanja. Iz tog razloga određivanje valne duljine neizostavan je zadatak kod pripreme postupka ispitivanja. Odjek odgovarajućeg intenziteta za određivanje i kontrolu svojstva pogreške postići će se u trenutku kada je veličina pogreške podjednaka polovini duljine vala koji se proširuje i doseže pogrešku.



Slika 3.1 Matematički prikaz vala [1]

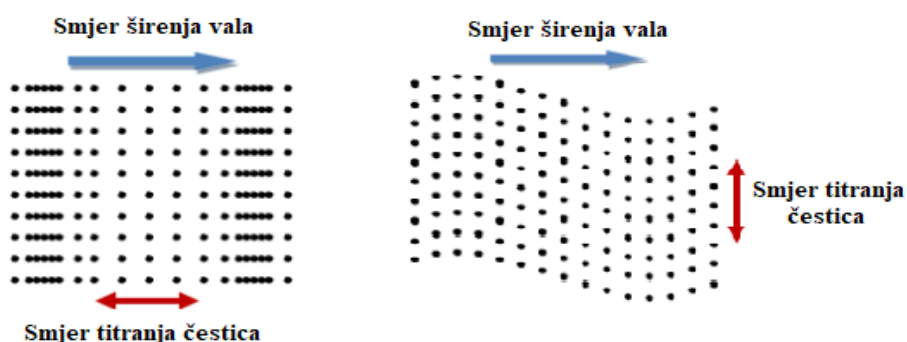
### 3.1.1. Stvaranje ultrazvuka

Za stvaranje ultrazvučnih valova najvažniju ulogu imaju sonde koje služe za emitiranje i odašiljanje snopa ultrazvuka na način da se prislanjanju na ispitivani materijal ili se uranjaju u tekućinu i generiraju titranje u materijal s kojim su u kontaktu. U tipičnim ultrazvučnim ispitivanjima za otkrivanje pogrešaka koristi se snop visokofrekventnih ultrazvučnih valova sa frekvencijama u rasponu od 0,1 do 50 MHz. [9] Budući da je poznato da se ultrazvučni valovi mogu širiti samo kroz sredstvo, nailaskom vala do granice ili pogreške unutar sredstva, reflektira se natrag do sonde pri čemu se analizira vrijeme kako bi se otkrile karakteristike pogreške.

### 3.2. Vrste valova

Širenje ultrazvučnih valova kroz sredstvo omogućeno je putem mehaničkih i elastičnih vibracija, a najčešće korišteni principi za dobivanje ultrazvučnih valova su piezoelektrični i magnetostriksijski efekt. Kod ultrazvučnog postupka ispitivanja i detekcije nepravilnosti u materijalu, ovisno o obliku, vrsti i dimenzijama materijala javljaju se najčešće sljedeće vrste valova (Slika 3.2), pojedinačno ili u kombinacijama, u cilju što učinkovitijeg otkrivanja pogrešaka:

- Longitudinalni val (L-val) – s titrajem čestica, sabijanja i širenja u smjeru širenja vala
- Transverzalni val (T-val) – titranje čestica okomito na glavni smjer širenja vala i brzinom upola manjom od longitudinalnih valova
- Površinski ili Rayleighovi val (R-val) – čestice titraju u kombinaciji longitudinalnog i transverzalnog vala, eliptički (u vodi kružno), na slobodnoj površini sredstva i u ravnini koja slijedi smjer gibanja na površinu
- Lambovi val – karakterizira ih kada dimenzije predmeta nisu velike uspoređujući ih sa valnom duljinom, posebice nakon što se jedna dimenzija smanji na red vrijednosti valne duljine [1]



Slika 3.2 Nastajanje longitudinalnog vala (lijevo) i nastajanje transverzalnog vala (desno) [9]

### 3.2.1. Frekvencija i brzina ultrazvučnih valova

Brzina valova predstavlja brzinu kojom se energija prenosi između dvije točke u sredstvu pomoću širenja valova. Parametri koji imaju najznačajniji utjecaj na brzinu širenja ultrazvučnih valova kroz sredstvo su vrsta vala, elastičnost i gustoća materijala, te u pojedinim materijalima brzina može ovisiti i o temperaturi. Prema tome fizičke karakteristike materijala kroz koji prolazi određeni val čine velik utjecaj na brzinu širenja valova. Slijedom toga moguće je mjeriti ili proračunati brzinu širenja vala i na osnovu dobivenih vrijednosti utvrditi karakteristike materijala ili locirati nehomogenosti u materijalu. Frekvencija vala jednaka je vrijednosti frekvencije titranja ili oscilaciji atoma sredstva u kojem se val širi. Veza između frekvencije, brzine i valne duljine prikazana je izrazom:

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (3.1)$$

gdje je:

$f$  - frekvencija [Hz]

$v$  - brzina [m/s]

$\lambda$  - valna duljina [m]

Iz izraza (3.1) se može primijetiti da je valna duljina izravno proporcionalna brzini vala, a obrnuto proporcionalna frekvenciji vala. Kod nekih je materijala brzina ultrazvučnih valova određena i poznata. Poznato je da valna duljina ima značajan učinak na mogućnost otkrivanja nehomogenosti te upravo iz tog razloga potrebno je podesiti frekvenciju sonde kojom će se kontrolirati vrijednost valne duljine. Kako bi se povećala mogućnost identifikacije indikacija, veličina indikacija mora biti veća od polovice valne duljine. Višom frekvencijom (kraćim valnim duljinama) uzrokuje se povećavanje osjetljivosti i razlučivosti odnosno na sposobnost sustava za lociranje nedostataka.

### 3.2.2. Akustička impedancija sredstva

Akustička impedancija predstavlja važno svojstvo kod širenja ultrazvučnih valova kroz sredstvo. To je dinamički otpor koji materijal pruža širenjem ultrazvučnog vala, a nastaje kao rezultat apsorpcije ultrazvučne energije u sredstvu. [9]

Akustička impedancija se definira kao umnožak gustoće materijala i brzine ultrazvučnih valova, što se može izraziti sljedećim izrazom:

$$Z = \rho \cdot v \quad (3.2)$$

gdje je:

$Z$  – karakteristična akustična impedancija [ $\text{Ns/m}^3$ ]

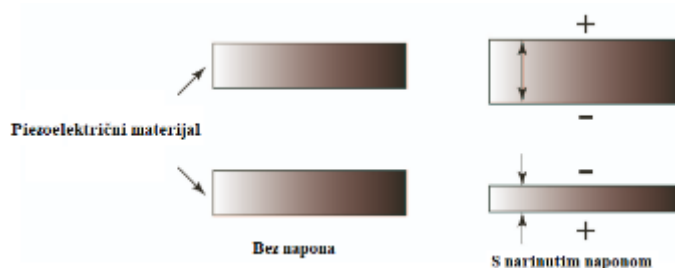
$\rho$  – gustoća materijala [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$  – brzina ultrazvuka u materijalu [ $\text{m/s}$ ]

U slučaju povećanja razlike u impedanciji sredstva dvaju materijala nastat će veći udio reflektirane energije ultrazvuka na granici između dvaju materijala. Primjerice impedancija vode ( $1,48 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) približno je 3000 puta veća od impedancije zraka ( $413 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ) što rezultira veći dijelom reflektirane energije i čujnosti zvukova stvorenih ispod površine vode. [9]

### 3.2.3. Piezoelektrični efekt

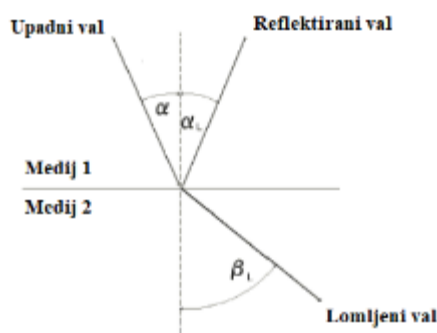
Za generiranje i detekciju ultrazvučnih valova najčešće se primjenjuje piezoelektrični efekt pretvorbe, tj. pojava u kojem određeni materijali mogu generirati električni potencijal kada su izloženi mehaničkim naprežanjima ili vibracijama. Glavni dio svake sonde je pretvarač izrađen od piezoelektričnog materijala koji služi kao primopredajnik ultrazvučne energije, odnosno omogućuje pretvaranje električne energije u mehaničku (ultrazvučne valove) i obratno. Dakle, kada se električni napon primijeni na pretvornik, dolazi do vibracije pretvornika na određenoj frekvenciji pri tom stvarajući ultrazvučne valove koji prolaze kroz ispitni materijal. Isto tako kod prijema reflektiranih valova, pretvornik koristi piezoelektrični efekt (Slika 3.3) kako bi pretvorio mehaničku energiju dolaznih valova u električne signale koji će omogućiti prikaz karakteristika prisutnih pogrešaka unutar materijala.



Slika 3.3 Piezoelektrični efekt [12]

### 3.3. Refleksija ultrazvučnih valova

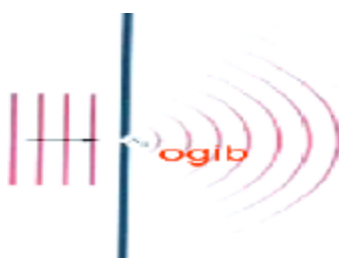
Na granici dvaju sredstava (Slika 3.4) dio energije ultrazvučnih valova reflektira, a dio energije se prenosi u drugo sredstvo. Na omjer količine refleksije i transmisije ultrazvučne energije znatno utječe vrsta materijala na graničnoj površini, odnosno od akustička impedancija materijala kroz koji prolaze valovi, i materijala u koje prelaze, te vrsta ultrazvučnih valova i način na koji dopiru na granicu sredstva. Ukoliko ultrazvučni valovi koji prolaze kroz materijal ispitivanja nailaze na graničnu površinu, nastat će sudar te će promijeniti svoj smjer i intenzitet (ultrazvučni tlak).



Slika 3.4 Lom i refleksija ultrazvučnih valova na granici loma [9]

### 3.4. Difrakcija ili ogib valova

Difrakcija ili ogib valova je svojstvo valnog gibanja koje se javlja kada ultrazvuk nailazi na prisutnu pukotinu u materijalu te dolazi do difrakcije ultrazvučnog vala od gornjeg i donjeg vrha pukotine. Prilikom dolaska valova do pukotine dolazi do ogibanja valova te njihovog prostiranja u prostor geometrijske sjene otvora. Pritom pukotina ili točka na otvoru postaje izvor novih sekundarnih sfernih valova koji se gibaju istom valnom brzinom. Ovaj princip gibanja valova ostvaren je Huygensovim načelom. Ukoliko je veličina otvora što manja u odnosu na valnu duljinu, učinak difrakcije i zakretanje valova biti izraženiji. Poznavanje principa difrakcije vala (Slika 3.5) nužno je kod provedbe ultrazvučnog ispitivanja metodom difrakcije ili proleta ultrazvuka – TOFD, jer se detektiranje diskontinuiteta unutar materijala ovom metode temelji upravo na pojavi difrakcije. [9]



Slika 3.5 Ogib valova [9]



## 4. Oprema za ultrazvučno ispitivanje

### 4.1. Ultrazvučni uređaj

Ultrazvučni uređaj (Slika 4.1) izvor je električnih impulsa visokog napona i kratkog trajanja potrebnih za aktivaciju ultrazvučnih sonda i osnova za prihvaćanje odbijenih signala koje prikazuje na zaslonu u vizualnom obliku kao razne prikaze rezultata. Kod planiranja postupka ispitivanja na ultrazvučnom uređaju mora se podesiti vremenski interval uređaja kako bi se odredila dužina puta ultrazvuka do reflektirajuće površine, uključujući razmak između generiranog pobudnog impulsa i primljenog impulsa, te u konačnici sam položaj pogreške.



Slika 4.1 Ultrazvučni uređaji [28]

### 4.2. Ultrazvučne sonde

Ultrazvučne sonde predstavljaju ključan i neizostavan element kod procesa ultrazvučnog ispitivanja zbog toga što sadrže piezokristal koji omogućava postupak generiranja, odašiljanja i primanja ultrazvučnih valova. Ultrazvučne sonde su akustički sklopovi koji su sastavljeni od osnovnih dijelova poput: pretvarača, bloka za prigušenje, elektrode, zaštitne maske i kućišta. Svaka sonda usmjerava snop pod određenim kutom, a podjela standardnih sonda uključuje: ravne sonde, dvostruke sonde, kutne sonde s jednostrukim i dvostrukim djelovanjem te se u primjeni sve češće koriste i specijalne sonde. Na slici 4.2 su prikazane najčešće razne vrste sonda (normalne jednostruke i dvostruke te kutne). Budući da pogreške prisutne unutar materijala mogu biti različitih oblika i usmjerenja ili paralelne sa smjerom širenja ultrazvučnog vala, potrebno je koristiti dvije ultrazvučne sonde ili specijalnu sondu kako bi se što jednostavnije otkrile uske pogreške.

Budući da postoje razne vrste sonda važno je odabrati odgovarajuću sondu ovisno o vrsti i obliku ispitnog materijala, području primjene, metodi ispitivanja, te vrsti pogrešaka koje treba otkriti.



*Slika 4.2 Razne vrste kutnih i ravnih sonda [28]*

#### **4.2.1. Normalna ili ravna sonda**

Primjena normalnih sonda uključuje emitiranje ultrazvučnih valova okomito na površinu ispitivanog materijala. Time se mogu otkriti nehomogenosti koje se nalaze u smjeru paralelnim s površnom materijala. S obzirom na način pobuđivanja normalne sonde dijele se na kontinuirano pobuđivane sonde, impulsne ili aperioidičke sonde koje se razlikuju prema vremenu trajanja naponskog impulsa pomoću kojeg se generiraju ultrazvučni valovi u pretvaraču. Raspon frekvencija kod ispitivanja ravnim sondama nalazi se u području od 0,5 do 20 MHz. Ravne sonde imaju široku primjenu kod ispitivanja debljine materijala i otkrivanja površinskih nesavršenosti. Na slici 4.3 je prikazana ravna kontaktna sonda sa frekvencijom 5 MHz i promjera kontakta 15,9 mm koja se primjenjuje za mjerenje debljine materijala.



*Slika 4.3 Ravna sonda sa frekvencijom 5 MHz [28]*

### 4.2.2. Kutna sonda

Kod kutnih sonda ultrazvučni valovi odašilju se u materijal pod određenim kutom ovisno o potrebama ispitivanja. Smjer odašiljanja i prijema ultrazvučnih valova pod određenim kutom prikazan je oznakom sonde uz dodatne karakteristike poput frekvencije i veličine kristala. U primjeni se pronalaze najčešće kutne sonde s kutom ulaza 35°, 45°, 60° i 70°. Uobičajene dimenzije sonde su vrijednosti promjera od 10 mm do 25 mm. Sve kutne sonde maju pripadajuću skalnu prema kojoj se definira izlazna točka sonde odnosno mjesto odašiljanja središnje zrake ultrazvučnog snopa. Bitna karakteristika kutnih sonde jest da imaju mogućnost proizvodnje longitudinalnih, transverzalnih, površinskih valova kao i njihove kombinacije. [1] Na slici 4.4 su prikazane kutne sonde od 70° veličine kristala 8x9 mm.



Slika 4.4 Kutne sonde od 70° [28]

### 4.2.3. Dvostruka sonda

Način konstrukcije dvostruke sonde koristi dvostruke elemente pretvornika ugrađenih u isto kućište od kojih jedan element djeluje kao odašiljač, a drugi istovremeno kao prijemnik. Pretvarači su izolirani jer se pri odašiljanju stvara visoki napon generatora impulsa koji bi blokirao pojačala. Veći kut nagiba sonde stvara bolje usmjeravanje i fokus ultrazvučnog snopa bliže površine, a sonda s manjim kutom nagiba nudi ispitivanje u većim dubinama materijala.[1] Budući da ove sonde omogućavaju bolje razdvajanje i odašiljanja i povratnih signala, postiže se veća fleksibilnost kod otkrivanja nepravilnosti. Na slici 4.5 prikazana je dvostruka sonda SEB4KF8.



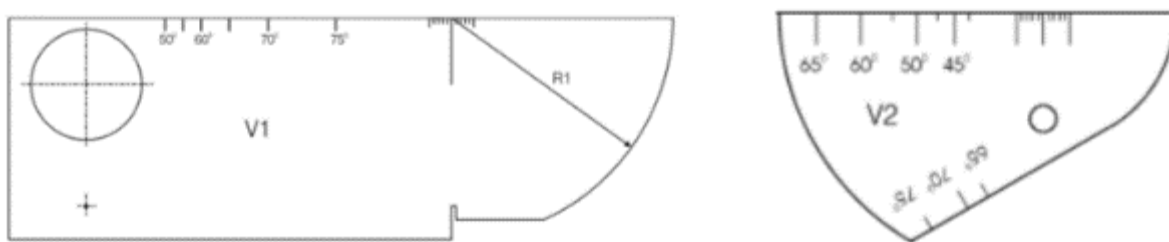
Slika 4.5 Dvostruka sonda SEB4KF8 [28]

#### 4.2.4. Specijalna sonda

Specijalne sonde služe za provedbu ispitivanja u slučajevima kada je konstrukcija zahtijevane geometrije te ispitivanje takvih složenih objekata ostalim sondama ne bi davalo najtočnije rezultate. Shodno tome izrađuju se specijalne sonde kojima se na lakši način otkrivaju točan položaj i dimenzije moguće indikacije. Ova vrsta sonda sadrži više piezoelektričnih elemenata čime se osigurava skeniranje pod više različitih kutova te se povećava mogućnost otkrivanja indikacije i smanjuje vrijeme ispitivanja. Važno je napomenuti da kut sonde ovisi o ispitnom objektu koji se ispituje.

#### 4.3. Kalibracijski blokovi

Za pripremu i podešavanje preciznosti svih karakteristika ultrazvučnog sustava te detektiranja položaja nepravilnosti unutar materijala neophodno je koristiti standardom propisane kalibracijske blokove V1 i V2 kako bi se proveo određen postupak kalibracije. Potrebno je rad ultrazvučnog sustava prilagoditi karakteristikama materijala koji se ispituje pomoću kalibracijskih blokova koji imaju konstantnu brzinu širenja ultrazvučnih valova sa unaprijed poznatim geometrijskim oblikom, dimenzijama i kvalitete površine. Da bi svi parametri bili zadovoljavajući, te da bi se postigla sposobnost dobivanja pouzdanih rezultata, kalibracijski blokovi izrađeni su sukladno normama u kojima se zahtijeva izrada bloka od istog ili sličnog materijala homogene strukture (najčešće ugljični čelik) kao i objekt koji će se ispitivati. Najčešće korišteni kalibracijski blokovi V1 i V2 za kalibraciju ultrazvučne opreme prikazani su na slici 4.6.



Slika 4.6 Kalibracijski blokovi V1 i V2 [8]

#### 4.4. Kontakno sredstvo

Priprema ispitne površine prije ispitivanja ključan je korak koji pruža efikasno provođenje i pouzdanost rezultata ispitivanja. Iz tog razloga nakon postupka čišćenja, ovisno o materijalu ispitivanja, nanosi se kontakno sredstvo u obliku vode ili gela u cilju poboljšanja akustične veze između ultrazvučne sonde i materijala. Osim što se poboljšava prijenos ultrazvučnih valova što je nužno za pravilno otkrivanje indikacija, smanjuje se trošenje kontaktne površine sonde.

## 5. Eksperimentalni dio

### 5.1. Opis rada

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva novom naprednom višepretvorničkom tehnikom i metodom odjeka. Detaljno je prikazan postupak pripreme ultrazvučnog sustava i podešavanje potrebnih parametara kod višepretvorničke metode i metode odjeka. Prikazani su postupci kalibracije ispitne osjetljivosti, podešavanje određivanje karakteristika, pripreme ispitne površine materijala i način vođenje sonde prilikom samog ispitivanja. Na kraju su prikazani dobiveni rezultati, način interpretacije i priložena su izvješća ispitivanja. Opisana je i prikazana sva ultrazvučna korištena oprema tijekom ispitivanja. Uz provedena ultrazvučna ispitivanja zavarenih spojeva, provedeno je i mjerenje debljine stijenke materijala regeneratora metodom odjeka. Višepretvorničkom tehnikom („Phased Array“) ispitan je prvi uzorak sučeljenog zavarenog spoja u obliku V-pripreme dobivenog TIG i EPP postupkom zavarivanja na primjeru regeneratora - izmjenjivač topline debljine 12 mm (Slika 5.1).



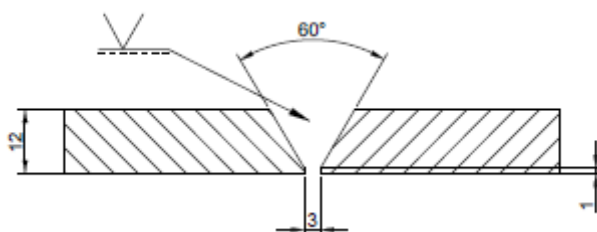
*Slika 5.1 Regenerator - izmjenjivač topline [28]*

Na slici 5.2 prikazan je sučeljeno zavaren V-zavar na plaštu regeneratora – izmjenjivača topline koji će biti ultrazvučno ispitan naprednom višepretvorničkom metodom.



Slika 5.2 Sučeljeni V-zavar na plaštu regeneratora-izmjenjivača topline [28]

Skica pripreme sučeljenog V-zavara za zavarivanje TIG i EPP postupkom na izmjenjivaču topline prikazana je na slici 5.3.



Slika 5.3 Skica pripreme sučeljenog V-zavara za zavarivanje TIG i EPP postupkom [28]

Parametri zavarivanja sučeljenog V-zavara na regeneratore prikazani su u tablici 5.1 i tablici 5.2

Tablica 5.1 Parametri TIG zavarivanja kod sučeljenog V zavarenog spoja

<b>Vrsta struje</b>	Istosmjerna
<b>Jakost struje</b>	120-180 A
<b>Napon zavarivanja</b>	12-15 V
<b>Brzina zavarivanja</b>	40-70 cm/min
<b>Protok plina</b>	14-18 l/min
<b>Vrsta žice</b>	ESAB Tigrod 13.09
<b>Promjer žice</b>	3,2 mm

Tablica 5.2 Parametri EPP zavarivanja kod sučeljenog V zavarenog spoja

<b>Jakost struje</b>	550-600 A
<b>Napon zavarivanja</b>	28-33 V
<b>Brzina zavarivanja</b>	40 cm/min
<b>Vrsta žice</b>	ESAB OK Autrod 12.20
<b>Promjer žice</b>	3 mm
<b>Vrsta praška</b>	ESAB OK Flux 10.71

Osnovni materijal za izradu izmjenjivača topline je sitnozrnati normalizirani konstrukcijski čelik oznake P355NH i debljine 12 mm. Čelik P355NH posjeduje vrlo dobru zavarljivost, žilavost i veliku otpornost na krti lom što ga čini visoko upotrebljivim u zahtijevanim područjima i visokom tlaku. Također, čelik P355NH pripada vrsti čelika koji se koristi za proizvodnju posuda za stlačeni plin (spremnici za LPG, propan, butan), tlačnih posuda, dijelova za parne kotlove, izmjenjivača topline, visokotlačne vodovodne cijevi i kompresore. Čelik P355NH isporučuje se u normaliziranom stanju, a kemijski sastav čelika P355NH naveden je u tablici 5.3.

Tablica 5.3 Kemijski sastav čelika P355NH [13]

P355NH													
C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	V
0,18	0,5	1,1 -1,7	0,025	0,015	0,02	0,012	0,3	0,3	0,08	0,05	0,5	0,03	0,1

Tablica 5.4 prikazuje najvažnija mehanička svojstva čelika P355NH.

Tablica 5.4 Mehanička svojstva čelika P355NH [13]

Mehanička svojstva čelika P355NH	
<b>Granica razvlačenja [MPa]</b>	355 MPa
<b>Vlačna čvrstoća [MPa]</b>	490 do 630 MPa
<b>Istezanje [%]</b>	21 %

Kod sučeljenog V-zavara pomoću TIG postupka zavaren je korijen zavara i korišten je dodatni materijal žica ESAB Tigrod 13.09 klasifikacijske oznake EN ISO 14171-A [29] te je EPP postupkom ostvarena popuna spoja uz žicu ESAB OK Autrod 12.20 u kombinaciji s praškom OK Flux 10.71. Kemijski sastav žice ESAB Tigrod13.09 prikazan je u tablici 5.5.

Tablica 5.5 Kemijski sastav žice ESAB Tigrod 13.09 [15]

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cu
Min. [%]	0,08	0,30	0,90	-	-	0,40	0,60
Max. [%]	0,12	0,70	1,30	0,020	0,020	-	0,35

Dodatni materijal za EPP postupak zavarivanja je nelegirana žica ESAB OK Autrod 12.20 čiji je kemijski sastav prikazan u tablici 5.6.

Tablica 5.6 Kemijski sastav žice ESAB OK Autrod 12.20 [16]

Kemijski element	C	Si	Mn	P	S
Min. [%]	0,08	-	0,90	-	-
Max. [%]	0,12	0,10	1,15	0,020	0,020

Drugo ultrazvučno ispitivanje zavara provedeno je pomoću metode odjeka na sučeljeno X-zavarenom spoju dobivenim MAG postupkom na primjeru podsklopa transformatora debljine 15 mm (Slika 5.4). Osnovni materijal je konstrukcijski niskouglični čelik S355J2+N koji zbog svoje prikladnosti za sve uobičajene postupke zavarivanja spada u skupinu najkorištenijih čelika u svijetu, te se široko primjenjuje za izradu čeličnih konstrukcija, izradu tlačnih posuda i kotlova, u području rudarstva, naftne ili plinske platforme i građevinske industrije za izradu mostova, prijenosnih tornjeva ili građevinskih strojeva. Niskouglični čelik S355J2+N karakterizira vrlo dobra zavarljivost, sposobnost hladnog oblikovanja, žilavost i dobra svojstva obradivosti. Također, čelik S355J2+N ima izvrsnu otpornost na napetosnu koroziju te je dostupan u različitim veličinama i oblicima.



Slika 5.4 Sučeljeno X-zavaren niskouglični čelik S355 J2+N [28]





Slika 5.5 Sučeljeni X-zavar zavaren u sredini podsklopa transformatora [28]

U tablici 5.7 može se vidjeti kemijski sastav čelika S355 J2+N.

Tablica 5.7 Kemijski sastav čelika S355 J2+N [17]

Materijal	max [%]								
	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	Al
S355 J2+N	0,22	0,55	1,6	0,3	0,035	0,035	0,3	0,08	0,02

Niskolegirani čelik S355J2+N2 pruža poboljšanu čvrstoću i žilavost, a njegova mehanička svojstva koja se ističu su navedena su u tablici 5.8.

Tablica 5.8 Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika S355 J2+N2 [18]

Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika S355J2+N2	
Granica razvlačenja [MPa]	315 do 355 MPa
Vlačna čvrstoća [MPa]	490 do 630 MPa
Istezanje [%]	21 %

Proizvođač, mjesto / Hersteller, Ort / Manufacturer			
Postupak zavarivanja (EN ISO 4063) Schweißverfahren / Welding procedure	135 MAG	Oznaka br. / Beleg Nr. / Marking No.	
WPQR Nr.		Zavarivač / Schweisser / Welder	
Vrsta spoja i zavara / Verbindungsart und Nahtart / Joint and Weld Type	BW	X	Položaj zavarivanja / Schweissposition / Welding Position
			PA

Br. Nr.	OM Grundwerkstoffe Basic material	Debljina Werkstückdicke Material thickness (mm)	Promjer cijevi Rohrdurchmesser Outside Diameter (mm)	Specifikacija materijala Spezifikation des Grundwerkstoffe Material specification	Grupa prema / Gruppe nach / Group acc.	
					CR ISO 15608	AD-Me.
1	S355J2 + N	10 ≤ t ≤ 15 mm	-	EN 10 025-2	1.2	W1
2	S355J2 + N	10 ≤ t ≤ 15 mm	-	EN 10 025-2	1.2	W1
Vrsta pripreme i čišćenja / Art der Vorbereitung und Reinigung / Method of Preparation and Cleaning				Rezanje i brušenje / schneiden und schleifen / Cutting and Grinding		

Priprema žlijeba (skica, crtež) / Einzelheiten der Fugenvorbereitung (Skizze, Zeichnung) / Weld Preparation Details (Sketch, drawing)

Oblik spoja / Gestaltung der Verbindung / Joint Design	Redoslijed zavarivanja / Schweißfolge / Welding Sequences

Podaci zavarivanja / Einzelheiten für Schweißen / Welding Details

Prolaz zavara / Schweiß- raupe / Run	Proces / Schweiß- prozess / Welding process	Ø DM / ø Zusatzwerk- stoffes / ø filler Material (mm)	Jakost struje / Stromstärke / Current (A)		Napon / Spannung / Voltage (V)		Korekcija napona / Spannung Korrektur / Voltage correction	Vrsta struje - polaritet / Stromart - Polung / Type of current - Polarity	Brzina žice / Drahtvorschub / Wire Feed Speed (m/min)	Brzina zavarivanja / Vorschub- Gesch- windigkeit / Travel speed (cm/min)		Unos toplote / Wärmein- bringung / Heat Input (kJ/cm)	
			min	max	min	max				min	max	min	max
z1	135	ø 1,2	90	- 110	15,5	- 16,5	-	= +	1,8 - 2,0	11,0	- 14,0	6,0	- 6,2
z2 -z3	135	ø 1,2	185	- 210	23,0	- 24,0	-	= +	6,8 - 7,2	36,0	- 42,0	5,6	- 5,8
z4 -z7	135	ø 1,2	215	- 235	27,5	- 28,5	-	= +	8,8	35,0	- 40,0	8,0	- 8,1

Dodatne napomene / Zusätzliche Bemerkungen:

Dodatni materijal / Zusatzwerkstoff / Filler material		Zaštitni plin Schutzgas / Designation Gas	Prašak Schweißpulver / Welding flux	Zaštita korijena Wurzelschutz / Root protection
Oznaka i standard Bezeichnung und Standard Designation and manufacture	G 48 4 M G4Si1; EN ISO 14341	M21; EN ISO 14175		
Oznaka i proizvođač Bezeichnung und Hersteller	Linde ; Ø1,2 mm	82 % Ar +18%CO2; Linde (Corgon)		

Posebne upute za sušenje / Sondenvorschriften für Trocknung / Special drying instructions	-			
Protok plina / Gasdurchflussmenge / Gas Flow Rate		15 - 18 l/min		
Razmak kontaktne vodilice / Kontaktlösenabstand / Distance contact tube			15 - 20 mm	

Vrsta i promjer W elektrode Wolframelektrode und Durchmesser Tungsten electrode type/size		-		Pojedinsti žlijebjenja Einzelheiten über Ausfugen Details of Back Gouging		-	
Pojedinsti podloge zavarivanja / Schweissbadsicherung einzelheiten / Backing details				-			
Temperatura predgrijavanja Vorwärmtemperatur Preheat Temperature		Tp		≥ 100 °C (RU 01 30 Uputa za predgrijavanje)		Temperatura međusloja Zwischenlagentemperatur Interpass Temperature	
						Ti ≤ 250 °C	
Naknadna toplinska obrada i/ili odžarivanje Wärmenachbehandlung und/oder Aushärten / Post-Weld Heat treatment and/or Ageing						X	
Proces / Napomena Verfahren / Bemerkungen Method / Remarks		Brzina zagrijavanja Aufheizrate / Heating Rate (°C/h)		Vrijeme držanja Haltezeit / Holding Time (min)		Temperatura držanja Haltezeit / Hold Temperature (°C)	
						Brzina hlađenja Abkühlrate / cooling Rate (°C/h)	
-		-		-		-	

Slika 5.6 Specifikacija postupka zavarivanja podsklopa transformatora [38]

Kod MAG postupka zavarivanja korišten je dodatni materijal žica proizvođača Linde, klasifikacijske oznake G 46 4 M G4Si1, prema standardu EN ISO 14341. Navedena žica promjera je 1,2 mm te se koristi za zavarivanje niskolegiranih i nelegiranih čelika, a kemijski sastav naveden je u tablici 5.9. Kao zaštitni plin prilikom MAG zavarivanja korištena je mješavina plinova 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>.

Tablica 5.9 Kemijski sastav žice G 46 4 M G4Si1 [19]

Kemijski sastav žice G 46 4 M G4Si1							
C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]	Cr [%]	Ni [%]
0,08	0,95	1,70	<0,020	<0,020	<0,025	<0,15	<0,15

Ultrazvučno ispitivanje zahtijeva da osoblje koje će rukovati opremom i provoditi ispitivanje mora biti stručno osposobljeno i završiti izobrazbu kako bi se ispitivanje provelo u skladu sa standardima. Od ispitivača se zahtijeva certifikacija prema normi HRN EN ISO 9712:2022 „Nerazorno ispitivanje – kvalifikacija i certifikacija NDT osoblja“. [30]

Time su stečeni uvjeti da će se postići pouzdanost rezultata odnosno pravilno otkrivanje potencijalnih pogrešaka i klasifikacija istih. U ovom radu ultrazvučno ispitivanje provedeno je sa stručnom osobom koja je certificirana, te ima položen UT stupanj 3.

## 5.2. Korištene metode i oprema za ultrazvučno ispitivanje zavara

Izbor potrebne opreme ovisi o nekoliko čimbenika kao što su ispitni objekt, metoda koja se primjenjuje, te svrsi i rezultatima koji se žele postići. Ultrazvučne metode uz pomoć kojih su provedena ispitivanja uzoraka zavarenih spojeva su napredna višepretvornička tehnika (Phased Array) i konvencionalna metoda odjeka (Pulse-Echo). Kod svakog ispitnog uzorka zavara detaljno su prikazane sonde, uređaji i ostala korištena oprema, načini pripreme ispitnog materijala uključujući postupak kalibracije mjernog uređaja, te sam princip ispitivanja i vođenja sonde. Na kraju ispitivanja provedena je analiza rezultata koja sadrži cjelovit uvid u procjenu kvalitete zavarenih spojeva kroz nekoliko prikaza signala kojima se pronalaze potencijalne nepravilnosti i dobiva pregled u stanje materijala.

Nadalje, osim postupka otkrivanja pogrešaka unutar materijala, prikazana je i mogućnost primjene ultrazvučne metode kod postupka mjerenja debljine stijenke. Način rada sustava i karakteristike ovih tehnike biti će detaljno opisane u nastavku rada.

Sustav opreme korištene u sklopu provedbe ultrazvučnog ispitivanja i mjerenja debljine materijala čini:

- Ultrazvučni uređaj OMNISCAN SX 1664PA
- Ultrazvučni uređaj USM Go+
- Ultrazvučni uređaj Krautkrämer USM 100
- Višepretvornička sonda s klinom
- Sonda za mjerenje debljine DA 512 EN
- Ravna sonda MB4S
- Kutna sonda MWB 60-4
- Pretvarač položaja ENC1-2.5-LM
- Kalibracijski blokovi V1 i V2
- Kontaktno sredstvo
- Ostala oprema

### 5.2.1. Višepretvornička metoda „Phased Array“

Ultrazvučno ispitivanje višepretvorničkom metodom (Phased Array Ultrasonic Testing - PAUT) – je napredna višepretvornička tehnika ultrazvučnog ispitivanja koja koristi višepretvorniču sondu za detaljan i pouzdan postupak ispitivanja unutarnje strukture i identifikacije diskontinuiteta ili promjena u materijalu. Za razliku od konvencionalnih sondi koje se sastoje od jednog pretvornika, višepretvornička metoda koristi softificiranu sondu koja se sastoji od niz ultrazvučnih elemenata (pretvarača) kojima se neovisno upravlja putem elektroničkog vremenskog određivanja impulsa kako bi se kontrolirala rezultirajuća zraka ultrazvučnog vala.

Svaki element je izoliran jedan od drugog, a njihovim pobuđivanjem na kontrolirani način u određenom slijedu može se generirati fokusirana zraka u željenom smjeru ultrazvuka čime se osigurava potpuno skeniranje materijala.

Ovim se načinom ispitivanja uz primjenu mnogo elemenata koji koriste vremensku odgodu zamjenjuje nekoliko konvencionalnih sondi i omogućuje upravljanje parametrima kao što su kut, oblik i fokus snopa uključujući usmjeravanje i skeniranje zraka s jednim sklopom sonde. Kut snopa ovisan je o vremenskom razmaku između impulsa pojedinih elemenata u sondi.

Upravo iz tih razloga ultrazvučno ispitivanje višepretvorničkom metodom (Slika 5.7) povećava efikasnost pregleda sposobnošću promjene upadnog kuta i položaja fokusiranja ultrazvučnog snopa sonde.

Identifikacija pogreške te njezine karakteristike utvrđuju se pomoću vremenske razlike između odašiljanja ultrazvučnih valova i prijema reflektiranih valova. Kada valovi naiđu na granicu ili pogrešku, djelomično se reflektiraju natrag prema pretvorniku. Kada se niz koristi kao prijamnik, razlika vremena u kojima impuls stiže do svakog elementa niza sadrži informacije o lokaciji izvora impulsa.



Slika 5.7 Ispitivanje višepretvorničkom sondom [20]

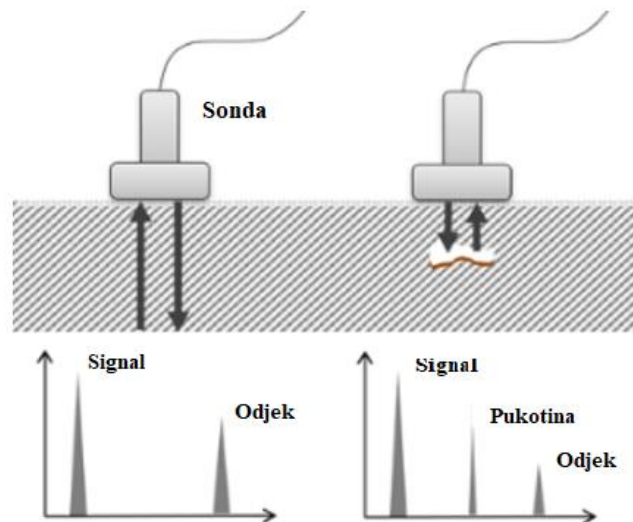
Kao takva glavne karakteristike višepretvorničke metode, a ujedno i prednosti u usporedbi s konvencionalnim ultrazvučnim metodama su:

- Elektroničko fokusiranje snopa na raznim kutovima čime se otklanja potreba za rotiranjem sonde u odnosu na konvencionalne sonde koje je potrebno fizički okretati kako bi se odredio snop u željenom smjeru
- Linearno i sektorsko skeniranje (upravljanje sondom) nudi prilagodbu oblika i veličine snopa te bolje dimenzioniranje na očekivanom mjestu indikacije
- Sektorsko skeniranje omogućuje pregled pod raznim kutovima u jednom prolazu
- Mogućnost korištenja pretvarača položaja koji bilježi podatke kontrole u stvarnom vremenu
- Povećana brzina i područje pokrivenosti ispitivanja
- Sposobnost prodiranja snopa na veće dubine poboljšava određivanje veličine kritičnih diskontinuiteta unutar volumena materijala
- Modificiranje spremljenih podešavanja se obavlja na brži način
- Detaljna vizualizacija i višestruki prikaz rezultata (A, B, C, D i S prikaz) generira dvodimenzionalne i trodimenzionalne prikaze koji prikazuju veličine i lokacije svih otkrivenih diskontinuiteta u realnom vremenu
- Brza i precizna analiza uz malo potrebnog podešavanja
- Visoka osjetljivost i ponovljivost rezultata zahvaljujući digitalnom spremanju podataka
- Fleksibilnost tehnike osigurava prilagodljivost širokom rasponu materijala
- Ispitivanje složenih geometrija i materijala velikih dimenzija
- Evidentiranje snimljenih rezultata

Sektorsko skeniranje (upravljanje sondom) može se koristiti za pregled objekata pod odgovarajućim kutovima što uvelike pojednostavljuje ispitivanje objekata složene geometrije. Sposobnost višepretvorničke metode da na precizan način odredi točnu lokaciju pukotine unutar zavora je ključna značajka ove metode.

### 5.2.2. Metoda odjeka

Metoda odjeka u praksi je još uvijek najkorištenija metoda ultrazvučnog ispitivanja. Razlog tome je visoka prilagodljivost uvjetima ispitivanja, nije prezahtjevna za obuku te manja cijena opreme u usporedbi sa višepretvorničkom metodom. Metoda odjeka (Slika 5.8) se zasniva na odašiljanju visokofrekventnih ultrazvučnih valova koji se dovode na materijal pod kutom ili okomito, te na slabljenju reflektiranog ultrazvučnog vala kao i praćenju vremena potrebnog da se ultrazvučni val reflektiran od granice sredstva vrati natrag do sonde. Ovim načinom mjerenja vremena odjeka dobivaju se informacije o dubini ili udaljenosti od granice pukotine. Prolaz impulsnih signala kroz ispitni materijal i primljeni signali kontroliraju se na ekranu ultrazvučnog uređaja na kojem su zabilježene indikacije pogrešaka, odnosno mjernih veličina. Za postupak ispitivanja se mogu koristiti dvije sonde (predajna i prijemna) ili samo jedna predajno-prijemna sonda što i je najčešći slučaj. Ovom metodom provode se ispitivanja u širokom rasponu od ispitivanja limova, odljevaka, otkivaka, do valjanih proizvoda, cijevi, i zavarenih spojeva koji su dobiveni od metala, plastike i keramičkih materijala.



Slika 5.8 Princip ispitivanja metodom odjeka [21]

### 5.2.3. Ultrazvučni uređaj OMNISCAN SX 1664PA

Uređaj OMNISCAN (Slika 5.9) proizvođača OLYMPUS je visokokvalitetni ultrazvučni uređaj koji se široko koristi kod ispitivanja višepretvorničkom metodom, a može se koristiti i kod konvencionalnih ultrazvučnih metoda. Značajna prednost je da se uspješno koristi kod ispitivanja složenih geometrija i oblika ispitivanog objekta. Dizajn sučelja nudi više interaktivni izbornik u kojem je moguće unositi tekst, vrijednosti, povećavati prikaze i upravljati parametrima.

Ovaj ultrazvučni uređaj koristi grupu elemenata koji se pobuđuju zasebno i na taj način ostvaruje mogućnost višestruku kontrolu zvučnog snopa. Shodno tome precizna kontrola snopa utječe na bolji fokus, kut i veće područje te rezultira poboljšanom detekcijom indikacija. Sveobuhvatni podaci u stvarnom vremenu vidljivi su na zaslonu uređaja s vizualizacijom presjeka dijela koji je obuhvaćen iz više kutova. Funkcija izrade izvješća pospješuje prikupljanje i pohranjivanje podataka ispitivanja.



*Slika 5.9 Ultrazvučni uređaj OMNISCAN SX 1664PA [28]*



Glavna prednosti su:

- Automatsko prepoznavanje sonde
- Složeno skeniranje pruža veću pokrivenost i mogućnost otkrivanja indikacija
- Ispitivanje debljih materijala
- Kraće vrijeme podešavanja i kalibracije u odnosu na konvencionalne metode
- Veća brzina pregleda i analiza rezultata
- Sektorsko skeniranje

Tehničke karakteristike ultrazvučnog uređaja OMNISCAN SX 1664PA su prikazane u tablici 5.10.

Tablica 5.10 Tehničke karakteristike ultrazvučnog uređaja OMNISCAN SX 1664PA [22]

<b>Dimenzije [mm]</b>	267 x 208 x 94 mm
<b>Masa [kg]</b>	3,4 kg
<b>Zaslon</b>	TFT LCD
<b>Rezolucija [piksela]</b>	800 x 600 piksela
<b>Radna temperatura [°C]</b>	-10°C – 45 °C
<b>Broj elemenata</b>	64
<b>Oblikovanje snopa</b>	Linearni ili sektorski
<b>Pojačanje [dB]</b>	0 - 80 dB

#### 5.2.4. Višepretvornička sonda s klinom od 36°

Postoji mnogo različitih višepretvorničkih odnosno sonda s faznim nizom, a razlikuju se prema frekvenciji rada, broju elemenata, obliku i potrebama ispitivanja. Najčešći raspon frekvencija za sonde s faznim nizom kreće se od 0,5 do 18 MHz, te se isporučuju sa 16, 32, 64, 128, ili 256 elemenata. U odnosu na normalnu sondu elementi su mnogo manji, a njihovim povećanjem osigurava se veća pokrivenost ispitnog područja kao i usmjeravanje ultrazvučnog snopa. Ispitivanje je provedeno višepretvorničkom sondom (Slika 5.10) koja se smješta na polimerni klin i pričvršćuje nehrđajućim vijcima. Konstrukcija sonde izvedena je na način da se unutar kućišta smješta 16 elemenata koji nisu ovisni jedni o drugima i izvršavaju odašiljanje i primanje signala u određenim vremenskim odgodama kako bi se poboljšala osjetljivost i provelo ispitivanje cijelog volumena zavara. Frekvencija sonde iznosi 4 MHz, a korak između elemenata 0,5 mm.



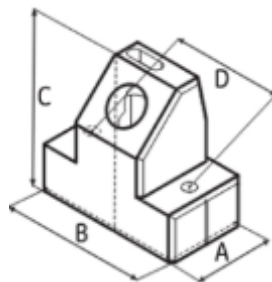
Slika 5.10 Višepretvornička sonda s klinom od 36° [28]

Ovakva izvedba sonde (Slika 5.10) pridonosi bržem ispitivanju, većoj osjetljivosti, te može pružiti rezultate ispitivanja s izvrsnim faktorom ponovljivosti. Karakteristike sonde značajno utječu na dubinu prodiranja, razlučivost i kvalitetu slike. Manje frekvencije pridonose boljem prodiranju u materijal, dok se većim frekvencijama postiže kraća valna duljina i bolja rezolucija. Minimalni otisak sonde i mogućnost zakretanja ultrazvučnog snopa bez potrebe za ručnim pomicanjem sonde će doprinijeti lakšem ispitivanju u slučajevima kada je ograničen pristup vođenja sonde.

Tehničke karakteristike korištene višepretvorničke sonde prikazane su u tablici 5.11, a dimenzije na slici 5.11.

Tablica 5.11 Tehničke karakteristike višepretvorničke sonde [23]

Frekvencija [MHz]	Broj elemenata	Korak elemenata [mm]	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
4 MHz	16	0,5 mm	15 mm	28 mm	27 mm	21 mm



Slika 5.11 Dimenzije višepretvorničke sonde [23]

Kut klina iznosi 36°, a uloga klina je da generira impulse u površinu ispitnog materijala i omogućuje usmjeravanje snopa pod određenim kutom. Klin sinkronizira kretanje sonde s prikupljenim podacima skeniranja pri 32 koraka/mm.

Također, klin omogućuje bočno elektroničko skeniranje čime se eliminira potreba za ručnim okretanjem sonde. Klinovi se mogu prilagoditi za stvaranje različitih lomljenih kutova sa određenim oblicima. Također, korištenjem klina se osigurava zaštita od oštećenja kontaktne površine sonde.

### **Ostvarenje kontakta sonde na ispitnoj površini:**

- Veličina sonde – veličina kontaktne površine
- Zakrivljenost ispitne površine
- Korištenje kontaktnog sredstva
- Trošenje sonde – promjena geometrije snopa sonde
- Skeniranje (ispitivanje) preko boje (zaštitnih premaza)
- Pristup samo s jedne strane

Izbor sonde i njezinim kutom određuje se frekvencija ultrazvučnih impulsa.

### **5.2.5. Pretvarač položaja ENC1-2.5-LM**

Primjena pretvarača položaja ENC1-2.5-LM (Slika 5.12) omogućuje pravilno pozicioniranje i dimenzioniranje neusklađenosti u osi skeniranja. Isto tako, pretvarač položaja uvelike pojednostavljuje i usklađuje praćenje podataka za određen položaj kao i lociranje točnog mjesta potencijalne nesavršenosti unutar zavarenog spoja. Pretvarač položaja je izrađen od nehrđajućeg čelika i može obavljati sinkronizaciju prikupljenih podataka s pomicanjem sonde, najbitnije tehničke karakteristike prikazane su tablicom 5.12.



*Slika 5.12 Pretvarač položaja ENC1-2.5-LM [28]*

*Tablica 5.12 Tehničke karakteristike pretvarača položaja ENC1-2.5-LM [24]*

Širina	28,7 mm
Visina	27 mm
Duljina osi skeniranja	27 mm
Dopuštenje	12 koraka/mm
Razlučivost pretvarača položaja	32 koraka/mm
Udaljenost između sonde	0-55 mm

Višepretvornička sonda povezana s pretvaračem položaja (Slika 5.13 ) nudi brojne prednosti poput:

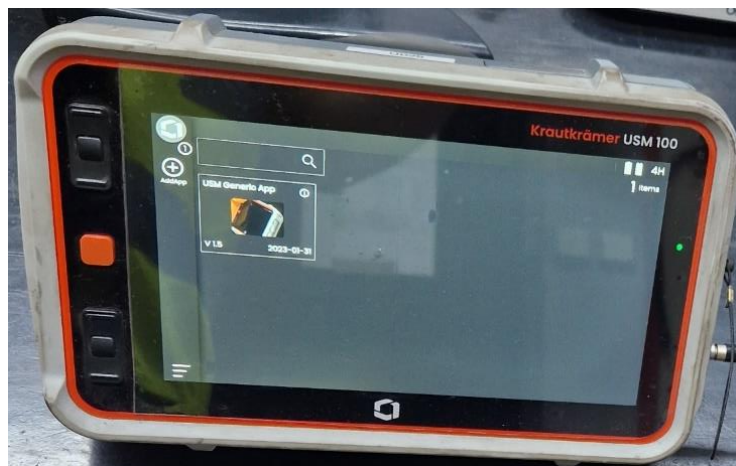
- Pravilno vođenje sonde
- Održavanje mjernog područja
- Precizan fokus snopa
- Točnije otkrivanje mjesta nesavršenosti



*Slika 5.13 Višepretvornička sonda povezana s pretvaračem položaja spremna za ispitivanje [28]*

### 5.2.6. Ultrazvučni uređaj Krautkrämer USM 100

Prilikom ultrazvučnog ispitivanja metodom odjeka sučeljenog X-zavara dobivenog MAG postupkom korišten je ultrazvučni uređaj Krautkramer USM 100 (Slika 5.14) koji predstavlja napredan uređaj iz serije USM te nudi moderno sučelje s preciznim očitanjem signala. Najvažnije karakteristike ovog uređaja navedene su u tablici 5.13.



Slika 5.14 Ultrazvučni uređaj Krautkramer USM 100 [28]

Tablica 5.13 Tehničke karakteristike ultrazvuog uređaj Krautkramer USM 100 [25]

<b>Dimenzije [mm]</b>	216 x 138 x 60 mm
<b>Masa [kg]</b>	1,2 kg
<b>Zaslon</b>	TFT LCD
<b>Rezolucija [pikseli]</b>	1024 x 600 piksela
<b>Frekvencija [Hz]</b>	10 – 2000 Hz
<b>Raspon debljine materijala [mm]</b>	3 – 15 000 mm
<b>Raspon brzine zvuka [m/s]</b>	250 – 16 000 m/s
<b>Prikazi signala</b>	A,B,C
<b>Postupci mjerenja</b>	TCG, DAC,DGS, AWS, API
<b>Radna temperatura [°C]</b>	-10°C – 50 °C

### 5.2.7. Kutna sonda MWB 60-4 i ravna sonda MB4S

Kutna sonda MWB 60-4 (Slika 5.15) od 60° i frekvencije 4 MHz korištena je kod ispitivanja sučeljenog X-zavara. Ultrazvučna sonda MWB 60-4 ima raspon mjerenja od 3 mm do 4 600 mm, a ostale tehničke karakteristike navedene su u tablici 5.14.



Slika 5.15 Kutna sonda MWB 60-4 [28]

Tablica 5.14 Tehničke karakteristike kutne sonde MWB 60-4 [26]

Frekvencija [MHz]	Kut sonde [°]	Veličina kristala [mm]	Raspon mjerenja [mm]	Kontaktna površina [mm]
4 MHz	60°	8 x 9 mm	3 - 4 600 mm	24 x 13,5 mm

Važno je uzeti u obzir da debljina osnovnog materijala ima uvelike utjecaj na izbor kuta sonde, kao i mogućnost da kut sonde osigura ispitivanje zavara sa što manje udaljenosti. U tablici 5.15 je navedeno koji kut sonde treba odabrati prema rasponu debljine osnovnog materijala.

Tablica 5.15 Odabir kuta sonde prema debljini osnovnog materijala [1]

Debljina osnovnog materijala	Kut sonde
6-15 mm	60 - 70°
16-35 mm	45 - 60°
> 35 mm	45°

Prije ispitivanja kutnom sondom potrebno je provjeriti ravnom sondom MB4S (Slika 5.16) područje ispitivanja osnovnog materijala zbog potencijalnih dvoplasnosti koji bi otežavala daljnje ispitivanje zavara.



Slika 5.16 Ravna sonda MB4S [28]

U tablici 5.16 prikazani su tehnički podaci ravne sonde MB4S za ispitivanje dvoplasnosti.

Tablica 5.16 Tehničke karakteristike ravne sonde MB4S [27]

Frekvencija [MHz]	Veličina kristala [mm]	Promjer kontaktne površine [mm]	Raspon temperatura [°C]	Raspon mjerenja debljina [mm]
4 MHz	10 mm	15 mm	5 - 50°C	15 - 1500 mm

### 5.2.8. Kalibracijski blokovi

U sklopu pripreme ultrazvučnog sustava i provjere značajki opreme potrebno je provesti postupak kalibracije neposredno pred ispitivanje. Preduvjet za kalibraciju i određivanje karakteristika ultrazvučnog sustava jest primjenjivati standardne kalibracijske blokove V1 (EN ISO 2400:2013) i V2 (EN ISO 7963:2022). [31] [32]

Vremenska baza i osjetljivost sustava su elementi koji se kalibriraju kod ultrazvučnog sustava i pri tome se koriste umjetno izrađeni reflektori koji se ugrađuju u etalone poput: stražnjeg zida (zadnja stijenka), kružnog luka na kalibracijskom bloku, provrt ravnog dna (FBH) ili bočni bušeni provrt (SDH).

U svrhu provedbe eksperimentalnog dijela rada za kalibraciju i podešavanje parametara ultrazvučnog sustava korišten je kalibracijski blok V2 (Slika 5.18).



*Slika 5.17 Kalibracijski blok V1 [28]*



*Slika 5.18 Kalibracijski blok V2 [28]*

### **5.2.9. Kontaktno sredstvo**

Korištenjem kontaktnog sredstva - gela oznake ZG-F (Slika 5.19) osiguran je dobar prijenos ultrazvučne energije iz sonde u materijal koji se ispituje. Zatim ultrazvuk putuje kroz materijal pri brzini koja je karakteristična sve do nailaska na neku promjenu u homogenosti materijala. Primjena gela ne smije uzrokovati nastanak korozije ili naknadna oštećenja površine koja bi mogla postati mjesta inicirajućih mikro pukotina. Vrlo je važno da se kontaktno sredstvo primjenjuje na jednak način za svako ispitivanje kako bi se izbjegle različitosti u debljini sredstva i moguće pogreške u rezultatima. Budući da se kod podešavanja uređaja i provedbe ispitivanja zahtijevaju isti uvjeti kontakta, koristi se mala količina kontaktnog sredstva i ostvaruje konstantan pritisak na sondu.





*Slika 5.19 Kontaktno sredstvo ZG-F [28]*

## 5.2.10. Ostala oprema

Na slici 5.20 je prikazan konektor sonde koji se priključuje na stražnju stranu uređaja.



*Slika 5.20 Konektor za sondu [28]*

Konektor omogućuje prepoznavanje sonde i slanje glavnih karakteristika sonde višepretvorničkom uređaju radi bržih podešavanja.



*Slika 5.21 Ulaz za konektor na ultrazvučnom uređaju [28]*

Koaksijalni kablovi (Slika 5.22) potrebni kod provođenja mjerenja debljine stijenke materijala.



Slika 5.22 Koaksijalni kablovi [28]

### 5.3. Mjerenje debljine stijenke uređajem USM Go+ i sondom DA 512 EN

Postupak mjerenja debljine stijenke materijala pomoću ultrazvučnog uređaja provodi se u cilju osiguranja kvalitete strojarskih proizvoda, uređaja ili komponenti tijekom pojedinih faza proizvodnje ili u eksploatacijskim uvjetima. Tokom životnog vijeka konstrukcije izloženost mehanizmima trošenja poput abrazije, korozije ili kavitacije dovodi do stanjenja stijenke i u tom je slučaju potrebno izvršiti kontrolu odnosno mjerenje debljine stijenke.

Mjerenje se obavlja sigurno, bez oštećenja ili negativnih posljedica na rad konstrukcije. Kod mjerenja debljine stijenke korišten je ultrazvučni uređaj USM Go+ (Slika 5.23) i standardna ravna sonda oznake DA 512 EN (Slika 5.24) koja je prikazana sa odgovarajućim priključnim kabelom.



Slika 5.23 Ultrazvučni uređaj USM Go+ [28]

Ultrazvučni uređaj USM Go+ je višenamjenski prijenosni uređaj koji je svojim dimenzijama i masom prilagođen za rad u skućenim prostorima. Zbog toga se vrlo često koristi za postupak mjerenja debljine stijenke u raznim industrijskim područjima. Posjeduje širok raspon frekvencije ponavljanja impulsa, a ostale tehničke karakteristike uređaja USM Go+ navedene su u tablici 5.17.

*Tablica 5.17 Tehničke karakteristike ultrazvučnog uređaja USM Go+ [25]*

<b>Rezolucija zaslona [piksela]</b>	800 x 480 piksela
<b>Dimenzije [mm]</b>	175 x 111 x 50 mm
<b>Masa [g]</b>	850 g
<b>Radna temperatura [°C]</b>	0 – 50 °C
<b>Frekvencija [MHz]</b>	0,2 – 18 MHz
<b>Maksimalno pojačanje dB</b>	110 dB
<b>Prigušivanje [Ω]</b>	50 – 1000 Ω
<b>Priključci za sonde</b>	Dva LEMO-00

Mjerenje debljine ostvareno je pomoću dvostruke ravne kontaktne sonde oznake DA 512 EN (Slika 5.24) koja se sastoji od dva piezoelektrična elementa pri čemu jedan odašilje ultrazvučnu energiju u površinu materijala, dok drugi prima odbijene ultrazvučne impulse od zadnje strane stijenke mjernog materijala. Ova vrsta sonde odabrana je iz razloga jer se najčešće primjenjuje za mjerenje debljina, naročito zbog toga jer je debljina materijala manja od 50 mm.

Budući da ravnu sondu karakterizira odašiljanje impulsa okomito na površinu materijala, izlazni kut sonde je 0°. Radna frekvencija sonde je 7,5 MHz što osigurava vrlo dobru razlučivost i odnos signal/šum. Ovakva vrsta sonde sa dva elementa omogućava veću preciznost i pouzdane rezultate mjerenja.



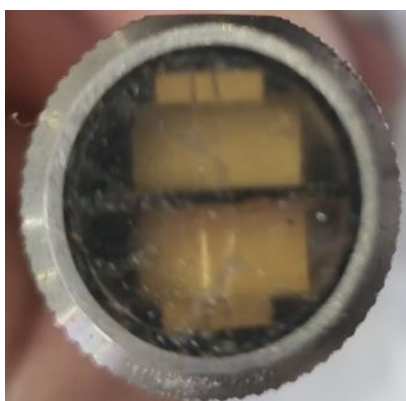
*Slika 5.24 Ultrazvučna sonda DA 512 EN [28]*

Ravne sonde moraju biti izrađene na način da je mrtva zona što manja, primjerice 15 % od debljine ravnog proizvoda. Najbitnije tehničke karakteristike sonde DA 512 EN prikazane su u tablici 5.18.

*Tablica 5.18 Tehničke karakteristike sonde DA 512 [27]*

<b>Frekvencija [MHz]</b>	7,5 MHz
<b>Raspon mjerenja [mm]</b>	0,6 – 60 mm
<b>Radna temperatura [°C]</b>	-20 – 70 °C
<b>Promjer kontaktne površine [mm]</b>	7,5 mm

Na slici 5.25 je prikazana površina sonde koja dolazi u kontakt s ispitnim materijalom tijekom provođenja ultrazvučnog mjerenja debljine. Može se vidjeti da sonda ima dva piezokristala na temelju kojih se ostvaruje princip mjerenja debljine materijala.



*Slika 5.25 Kontaktna površina sonde [28]*

Kod pokretanja uređaja (Slika 5.26) moguće je odabrati mogućnost otkrivanja pukotine ili mjerenje debljine stijenke. Prema tome radi potrebe mjerenja debljine stijenke na uređaju je odabrana upravo ova opcija.



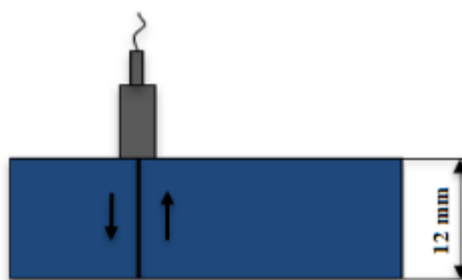
*Slika 5.26 Prikaz odabira opcije mjerenja stijenke [28]*

Prije samog postupka mjerenja potrebno je nanijeti kontaktno sredstvo (gel) na površinu materijala gdje će se mjeriti debljina stijenke. Nanošenjem kontaktnog sredstva (Slika 5.27) omogućen je bolji kontakt između sonde i materijala što je važno za neometan prolaz ultrazvučnih valova.



*Slika 5.27 Nanošenje kontaktnog sredstva na ispitnu površinu [28]*

Princip mjerenja debljine stijenke (Slika 5.28) zasnovan je na metodi odjeka prema kojoj se odaslani ultrazvučni valovi reflektiraju nailaskom na različite nehomogenosti, u ovom slučaju od zadnje stijenke materijala. Ultrazvučna sonda obavlja funkciju generiranja ultrazvuka u materijal kao i primanje povratnih valova koje pretvara u električne impulse radi mogućnosti prikaza rezultata na ekranu uređaja. S obzirom da je brzina ultrazvučnih valova poznata, na temelju mjerenja slabljenja intenziteta ultrazvučnog signala (amplituda) kao i potrebnog vremena da se odbijeni signal vrati natrag određuje se debljina stijenke materijala na proizvodu.



Slika 5.28 Princip mjerenja debljine stijenke [28]

Postavljanjem brzine ultrazvučnih longitudinalnih valova na 5914 m/s ostvareno je podešavanje ultrazvučnog mjernog područja. Sonda se prislanja na materijal kako bi se ostvario kontakt i izvršilo mjerenje. Na slici 5.29 je predložen postupak ultrazvučnog mjerenja debljine stijenke izmjenjivača topline i može se vidjeti da izmjerena debljina stijenke iznosi 11,98 mm. Ultrazvučni uređaj primljene impulse pretvara u analogni i digitalni oblik te prikazuje na zaslonu. Debljina materijala predstavlja umnožak brzine u materijalu i vremena prolaska impulsa, te je podijeljena s brojem ciklusa prolaska impulsa kroz debljinu materijala.

Budući da je brzina rasprostiranja ultrazvuka kroz promatrani materijal nepromjenjiva može se izračunati vremenska razlika između emitiranja i povratka odbijenog ultrazvučnog vala. Primjerice, ako se mjeri debljina materijala 12 mm, tada ultrazvučni signal prelazi put od 24 mm. Prema tome put od 24 mm ultrazvučni signal brzine 5 914 m/s prijeđe za 4,1  $\mu$ s.

Na osnovu izmjerene vrijednosti omogućena je procjena cjelovitosti materijala i kontrola dimenzija kako bi se u potpunosti postigla pouzdanost kod izvršavanja funkcije proizvoda. Važno je istaknuti da se mjerenje ukoliko je potrebno može ponoviti više puta s visokim faktorom točnošću.



Slika 5.29 Postupak mjerenja debljine stijenke [28]

## **5.4. Postupak ultrazvučnog ispitivanja višepretvorničkom tehnikom „Phased Array“ sučeljenog V-zavara dobiven TIG i EPP postupkom**

### **5.4.1. Priprema sustava za ispitivanje i podešavanje parametara**

Kvaliteta pripreme ultrazvučnog sustava za ispitivanje izravno utječe na procjenu stanja i uvid u dobivene vrijednosti i rezultate mjerenja. Prema tome za potrebe ispitivanja postoji nekoliko čimbenika na koje je potrebno obratiti pozornost u fazi pripreme i neposredno pred početak ultrazvučnog ispitivanja, a to su:

- Izbor sonde
- Kontrola elemenata ultrazvučnog sustava
- Podešavanje parametara uređaja (pojačanje, osjetljivost, brzina prijenosa valova, postavljanje vremena)
- Radna frekvencija
- Postupak kalibracije
- Priprema ispitne površine (kontaktno sredstvo)

Radi postizanja odgovarajućih uvjeta ispitivanja i točnosti otkrivanja indikacija, prije započinjanja postupka ultrazvučnog ispitivanja zavarenih spojeva, potrebno je provesti vizualni pregled elemenata ultrazvučnog sustava zbog mogućih nedostataka koji bi se odrazili na uporabljivost sustava.

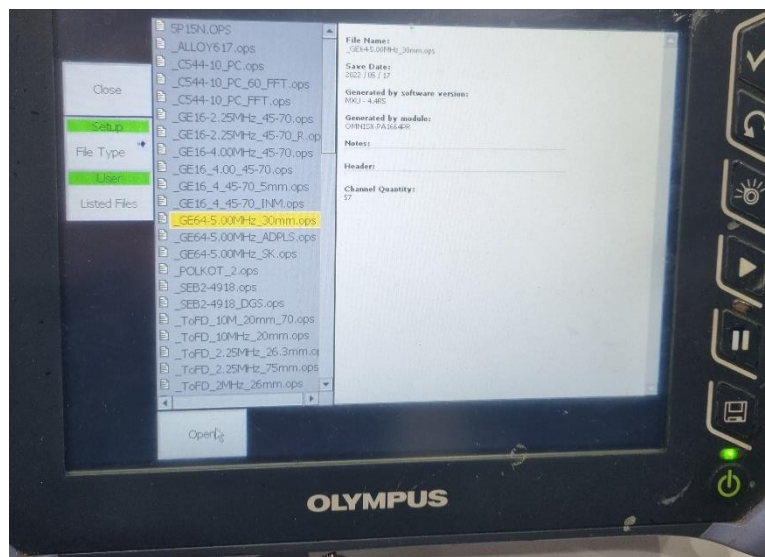
Stoga predradnja u tehnologiji kontrole i nadzor ispravnosti rada opreme obuhvaća karakteristike ispitnog sustava:

- Provjera radnih karakteristika – obuhvaća aktivnost kojom se definira odstupanje nazivnih vrijednosti radnih karakteristika pojedinog ultrazvučnog sustava unutar granica tolerancije
- Linearnost horizontalne i vertikalne osi ekrana
- Rezoluciju
- Osjetljivost i odnos signal – šum

Uvjeti površine moraju osiguravati minimalno dva uzastopna odjeka od zadnje stijenke bez većih razlika na bilo kojem dijelu bez unutarnjih nepravilnosti.

Podešavanje parametara ispitnog sustava prvi je i neophodan postupak prije provedbe ultrazvučnog ispitivanja. Tijekom pripreme sustava za ispitivanje uređaj je potrebno podesiti na određene parametre kao što su: vrsta sonde i njezina frekvencija, mjerno područje, brzina i pojačanje zvuka. Ovime se ostvaruje preduvjet za pregled te osigurava točnost i pouzdanost rezultata.

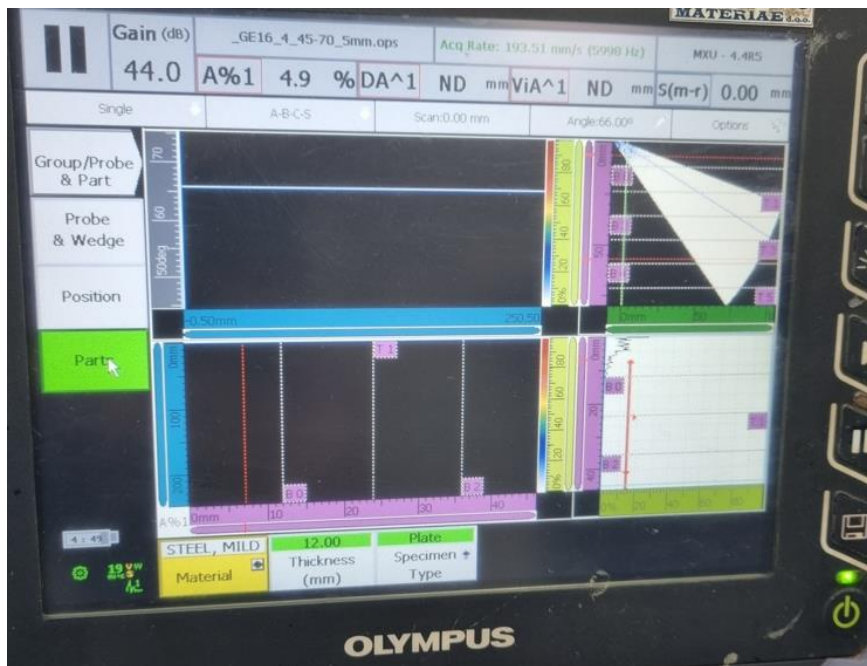
Postavljanje parametara potrebnih za ultrazvučno ispitivanje višepretvorničkom metodom započinje unosom sonde i odabirom višestrukog prikaza rezultata. U postavkama uređaja nalazi se izbornik sa navedenim sondama te je potrebno odabrati odgovarajuću sondu s kojom će se izvršiti ispitivanje (Slika 5.30).



Slika 5.30 Odabir odgovarajuće sonde [28]

U sljedećem koraku postavlja se vrsta i debljina materijala te se odabire niskouglični čelik sa unosom debljine materijala na 12 mm što se može vidjeti iz slike 5.31. Odgovarajuća debljina omogućuje ispravne oznake položaja koje će biti prikazane na S prikazu.





Slika 5.31 Odabir niskougličnog čelika i debljine 12 mm [28]

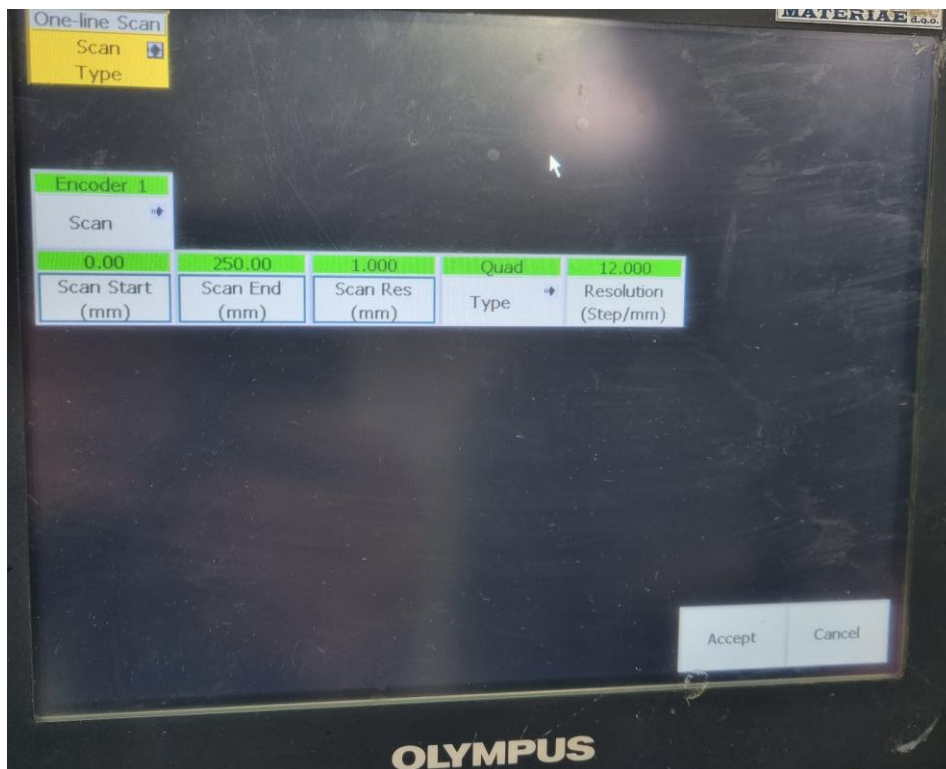
Nakon odabira debljine podešava se pojačanje s kojim će se provoditi ispitivanje, te je vrijednost pojačanja 44 dB što se može vidjeti na mjerneoj liniji. Zatim se regulira fokus snopa, minimalni i maksimalni kut odnosno raspon kutova u materijalu koji je postavljen od  $45^\circ$  do  $75^\circ$ , a optimalan korak kuta postavlja se na  $1^\circ$  (Slika 5.32). Korak kuta odnosi se na rezoluciju kuta koja je vrlo bitna kod S prikaza gdje se ultrazvučni snop usmjerava kroz niz kutova. Korak kuta moguće je postaviti i na manju vrijednost na primjer  $0,5^\circ$ , ali time će se usporiti cijeli postupak prijenosa ultrazvučnih valova i rad cjelokupnog sustava.



Slika 5.32 Postavljanje raspona kutova u materijalu od  $45^\circ$  do  $75^\circ$  i optimalnog koraka kuta od  $1^\circ$

[28]

Zatim je potrebno definirati vrstu pretvarača položaja pomoću kojeg će se obavljati ispitivanje. Isto tako kod podešavanja parametara važno je definirati duljinu skeniranja, tako da će kod vođenja sonde početna točka biti na 0 mm, a završna na 250 mm što će se iscrtavati na ekranu tijekom ispitivanja (Slika 5.33). Provedbom ovih postupaka provjere radnih karakteristika i podešavanja određenih parametara ostvaren je preduvjet za učinkovito korištenje sustava. Standardna brzina prolaza ultrazvučnih valova unosi se ovisno o kalibracijskom bloku koji mora biti istog materijala kao i ispitni materijal. Brzina ultrazvuka u materijalu postavljena je na 193,51 mm/s.



Slika 5.33 Podešavanje duljine skeniranja, početna točka 0 mm, a završna 250 mm [28]

Postavljanje parametara osjetljivosti pri elektroničkom skeniranju nudi prikaz jednake amplitude impulsa svakog ultrazvučnog snopa. Fokusiranje može značajno poboljšati omjer signala i šuma u zahtjevnim primjenama, a elektroničko skeniranje C-prikaz slika. Prilagođavanje raspona kuta snopa postiže se digitalnim načinom usmjeravajući snop vertikalno ili horizontalno ovisno o obliku zavarenog spoja.

## 5.4.2. Priprema ispitne površine

Točnost rezultata i osjetljivost ispitivanja uvelike ovisi o stupnju pripreme ispitne površine odnosno o kontaktnoj površini materijala na koju naliže sonda. Da bi se izbjegle pogreške pri ispitivanju, dodirna površina materijala mora osigurati kvalitetnu interakciju sa sondom. Priprema materijala neovisno o kvaliteti površine obično uključuje temeljito čišćenje površine od svih nakupljeni nečistoća, prašine i odmašćivanje. Također, ukoliko se čestice strojne obrade ili premazi antikorozivne zaštite nalaze na površini potrebno ih je ukloniti kako bi se omogućio bolji pristup ispitivanju.

Stoga se nanosi kontaktno sredstvo koje omogućava poboljšanje ultrazvučnih valova između ultrazvučne sonde i ispitnog materijala. Najčešće se nanosi ulje ili gel, ovisno o primjeni i materijalu koji se pregledava.

Gruba površina u odnosu na gladu površinu zahtijeva viskoznije sredstvo poput gela ili masti. Kontaktno sredstvo eliminira zračne raspore koji mogu odbijati ultrazvučne valove i pritom stvarati lažne signale. Time se sprječava ometanje prijenosa ultrazvučnih valova kroz materijal i pridonosi efikasnom ispitivanju odnosno smanjenju trošenju ultrazvučne sonde. Na slici 5.34 je prikazan gel COUPLANT FYp koji je potrebno pomiješati sa vodom kako bi se mogao premazati po ispitnoj površini.



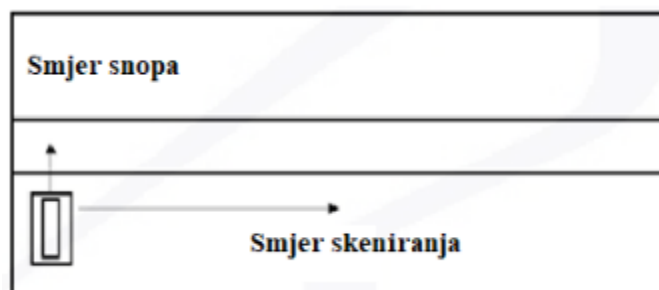
Slika 5.34 Kontaktno sredstvo COUPLANT FYp [28]

### 5.4.3. Ultrazvučno ispitivanje sučeljenog V-zavara višepretvorničkom sondom

Prvo ultrazvučno ispitivanje provedeno je na sučeljenom V-zavaru na plaštu regeneratora, naprednom višepretvorničkom metodom koja nudi visoku pouzdanost u otkrivanju mogućih nehomogenosti unutar strukture materijala. Ispitivanje zavarenih spojeva višepretvorničkom metodom provedeno je sukladno zahtjevima norme HRN EN ISO 13588:2019. [33]

Nakon ispravnog podešavanja ultrazvučnog sustava (uređaj, ispitna sonda, pretvarač položaja i konekcijski kabel) pristupa se ispitivanju zavarenog spoja.

Specijalna sonda koja obavlja ulogu odašiljanja i primanja ultrazvučnih valova, postavlja se na ispitnu površinu preko koje se nalazi kontaktno sredstvo. Ispravno nalijeganje ultrazvučne glave sonde pruža međusobni kontakt između sonde i ispitnog materijala te je neophodno za dobivanje točnih rezultata. Potrebno je prilagoditi skeniranje odnosno pomicanje sonde po ispitnom materijalu pazeći da sonda ne dodiruje zavar. Postupak ultrazvučnog ispitivanja zavarenog spoja provodi se ručnim pomicanjem višepretvorničke sonde paralelno sa duž središnje osi zavarenog spoja, dok je smjer snopa okomit na zavar. Postupak skeniranja i smjer odašiljanja snopa može se vidjeti iz slike 5.35.



Slika 5.35 Postupak skeniranja zavara višepretvorničkom sondom [33]

S ciljem skeniranja cijelog presjeka zavarenog spoja uključujući i zonu utjecaja topline potrebno je odrediti područje skeniranja tako da područje skeniranja obuhvaća najmanje 10 mm materijala sa svake strane zavara (Slika 5.36). Kako bi sonda u potpunosti osigurala skeniranje cijelog zavara, brzina skeniranja ne smije biti veća od 200 mm/s. Brzina skeniranja ovisi o zahtjevima osjetljivosti i veličini moguće indikacije tokom ispitivanja.



*Slika 5.36 Vođenje sonde prilikom skeniranja zavara [28]*

Na slici 5.37 prikazan je postupak ispitivanja višepretvorničkom sondom sa druge strane zavara i time je ispitivanje kvalitetnije i nudi bolji prikaz rezultata.



*Slika 5.37 Postupak ispitivanja višepretvorničkom sondom [28]*

## 5.5. Postupak ultrazvučnog ispitivanja metodom odjeka sučeljenog X-zavara dobivenog MAG postupkom

### 5.5.1. Priprema sustava za ispitivanje i postupak kalibracije

Da bi se uspješno provelo ultrazvučno ispitivanje, potrebno je izvršiti postupak kalibracije ultrazvučnog sustava odnosno podesiti mjerno područje u svrhu određivanja lokacije i dimenzija nepravilnosti u volumenu ispitnog materijala. Kalibracija predstavlja postupak pomoću kojeg se postavljanjem pojedinih regulatora na ultrazvučnom uređaju ostvaruje linearno pridjeljivanje dimenzija ispitnog uzorka horizontalnoj skali zaslona.

Za razliku od višepretvorničkog uređaja koji ima mogućnost da se sonda odabere iz memorije uređaja, kod konvencionalnih ultrazvučnih uređaja potrebno je izvršiti kalibraciju sonde svaki puta kada se koristi druga sonda ili se mijenjaju karakteristike pojedinih elemenata.

Ovisno o veličini predmeta ispitivanja unutar skale zaslona uređaja za različite slučajeve se pridružuju razna mjerna područja.

Postupak kalibracije osjetljivosti sonde se izvodio pomoću DGS („Distance Gain Size“) metode koja koristi kalibracijske etalone i DGS dijagram, te se njome određuje referentna linija na ultrazvučnom uređaju. Svaka sonda ima svoju DGS krivulju.

Za pripremu ultrazvučnog sustava, kalibracijski reflektori koji se mogu koristiti su:

- Zadnja stijenka referentnog bloka ili objekta ispitivanja (ravne sonde)
- 25 mm radijus na kalibracijskom bloku K2 (kutne sonde frekvencije 4 MHz)
- 100 mm radijus na referentnom bloku K1 (ostale kutne sonde)
- Bočno bušeni provrti na kalibracijskim blokovima V1 i V2 (za sve sonde)

Na temelju debljine objekta te za kutnu sonde od 60° potrebno je odrediti minimalno mjerno područje - MP<sub>min</sub> prema izrazu:

$$MP_{\min}=1,2 \cdot \frac{2 \cdot d}{\cos \beta} \quad (7.1)$$

Potrebno je podesiti brzinu ultrazvučnih valova u materijalu odnosno transverzalnih valova na vrijednost 3248 m/s. Potom se mora unijeti debljina („Thickness“) materijala koji će se ispitivati na vrijednost 15 mm, kao i mjerno područje („Display Range“) u iznosu od 90 mm (Slika 5.38). Vrlo bitno je prilagoditi pojačanje („Gain Adjustment“) na 30 dB kako bi se optimizirala kvaliteta signala i otkrile sitne nepravilnosti.



Slika 5.38 Unos debljine materijala ispitivanja u iznosu od 15 mm [28]

Potrebno je odabrati baždarnu debljinu prema potrebi, u ovom slučaju za baždarenje korišten je kalibracijski blok V2 (umjetni reflektor kružni luk R25) te je iz tog razloga odabrana debljina 25 mm. Potrebno je pronaći najjači signal na radijusu 25 mm (Slika 5.39), odnosno krivulju čija maksimalna točka ima visinu 80% visine ekrana (referentna linija). Budući da se koristi etalon V2 i kalibracijski reflektor radijus kružnog luka dolazi do reflektivnosti u odnosu na stražnji zid te je zbog toga za određeni kut sonde potrebno korigirati dodatno pojačanje za korekcijsku radijus-stražnji zid, kao što je prikazano u tablici 5.19.

Tablica 5.19 Korigiranje dodatnog pojačanja za određeni kut sonde [1]

Kut	Sonda MWB 4 MHz
45°	R2/-2 dB
60°	R2/0 dB
70°	R2/+2 dB



Slika 5.39 Unos baždarenog radijusa R25/V2 i prikaz najjačeg signala [28]

Sonda je postavljena na površinu etalona V2 tako da se središnja zraka ultrazvučnog snopa poklapa s većim radijusom (Slika 5.40). Tijekom pomicanja sonde po površini etalona uzdužno naprijed i natrag, te uz održavanje sonde na kontaktnu površinu etalona, sondu je potrebno zaustaviti u položaju koji će postići najveću amplitudu signala zbog odraza zakrivljene plohe. Sa skale na referentnom bloku V2, očita se žarište, tj. indeks sonde (udaljenost izlazne točke od čela sonde) i može se vidjeti da se poklapa sa 12,5 mm.



Slika 5.40 Određivanje izlazne točke kutne sonde na kalibracijskom bloku V2 [28]

Potom izlazna točka sonde  $x=12,5$  mm unosi se u ultrazvučni uređaj i na taj način završena je kalibracija udaljenosti (Slika 5.41).





Slika 5.41 Amplituda signala kod kalibracije kutne sonde [28]

Sljedeći korak je podesiti kut ultrazvučnog snopa sonde tako da se na skali u stupnjevima kalibracijskog bloka V2 pronađe najveća amplituda signala. Sondu se postavlja na nazivnu vrijednost kuta na etalonu te se centar sonde promjera 5 mm mora podudarati sa  $60^\circ$  na odgovarajućoj skali (Slika 5.42). U tom položaju sonde izvodi se interpolacija oznake izlazne točke u odnosu na oznake nazivnih kutova etalona, pri čemu se bilježe odstupanja od nazivnog kuta. Na dozvoljeno odstupanje kuta snopa utječu ispitni zahtjevi, te se odstupanje uobičajeno prihvaća unutar  $\pm 2^\circ$ . Tada se na uređaju (Slika 5.43) pojavljuje najveći signal što je znak da je postupak kalibracije uspješno proveden te se može pristupiti ispitivanju zavarenih spojeva.



Slika 5.42 Kalibracija kuta sonde na kalibracijskom bloku V2 [28]



Slika 5.43 Prikaz najvećeg signala kod postavljanja kuta ultrazvučnog snopa [28]

Kako bi sonda uspješno odašiljala ultrazvučne valove u materijal potrebno je pripremiti ispitnu površinu nanošenjem kontaktnog sredstva – gela oznake ZG-F (Slika 5.44).



Slika 5.44 Nanošenje kontaktnog sredstva – gela oznake ZG-F na ispitnu površinu [28]

### 5.5.2. Ultrazvučno ispitivanje sučeljenog X-zavara metodom odjeka ravnom sondom MB4S i kutnom sondom od 60°

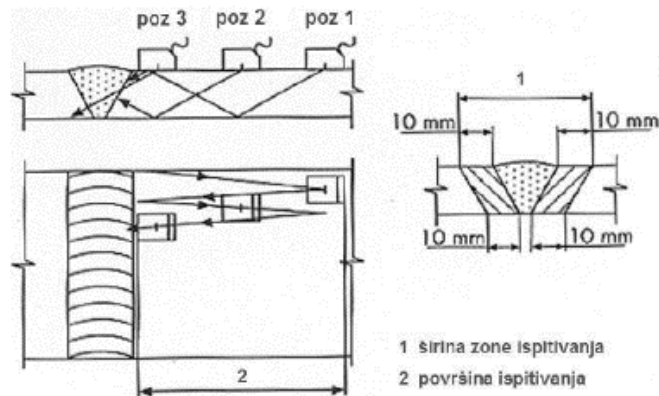
Drugo ispitivanje provedeno je metodom odjeka pomoću ravne sonde MB4S promjera 10 mm i kutne sonde od 60° na primjeru podsklopa transformatora koji je zavaren sučeljenim X-zavarom. Ispitivanje zavarenih spojeva ultrazvučnom metodom provodi se sukladno zahtjevima norme EN ISO 17640, dok se za ocjenu rezultata primjenjuje norma EN ISO 11666. [34], [35]

Na početku ispitivanja ravnom sondom (Slika 5.45) vrši se ispitivanje osnovnog materijala u području zone skeniranja i područja do zavara zbog potencijalnih dvoslojnosti (dvoplasnosti) koje obično nastaju paralelno s površinom materijala koji se valja ili otkiva. Mogući uzroci dvoslojnosti mogu biti raznog tipa kao što su: šupljine skupljanja, plinski mjehurići ili nemetalni uključci iz polaznog materijala zbog postupaka valjanja ili kovanja u kojima se materijal razvlači. Ovim se načinom ispitivanja ravnom sondom osigurava da kod kasnijeg ispitivanja zavara neće doći do ometanja odašiljanja ultrazvučnog snopa i skeniranja kutnom sondom. Isto tako, ovo je vrlo važno jer se time sprječava mogućnost pojave lažne pogreške te u konačnici pogrešna analiza rezultata. Princip ispitivanja se temelji na refleksiji u najčešćem slučaju longitudinalnih valova u smjeru koji je okomit na ispitnu površinu.

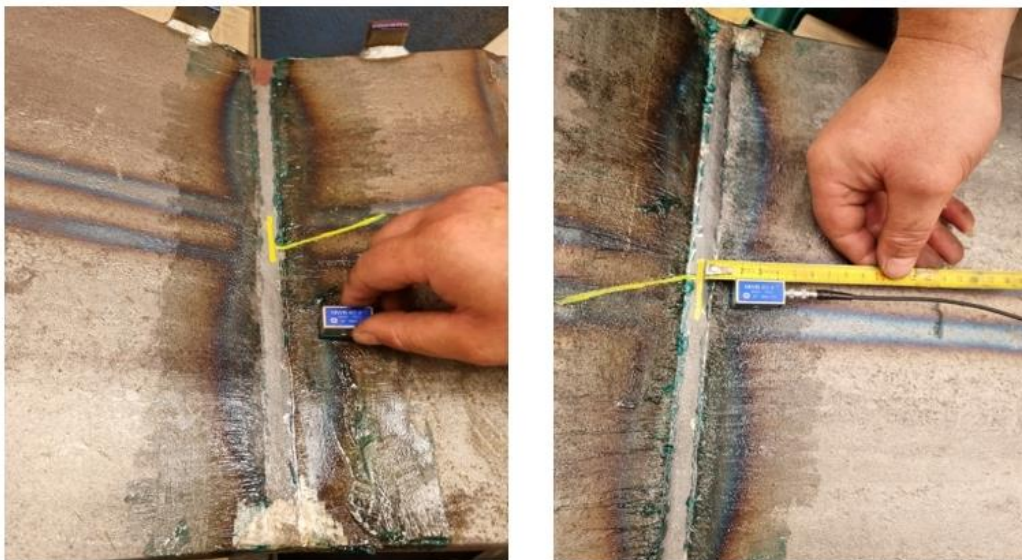


Slika 5.45 Ispitivanje ravnom sondom zbog mogućih dvoslojnosti [28]

Budući da nisu detektirane nehomogenosti u osnovnom materijalu daljnji postupak je ispitivanje zavara kutnom sondom MWB 60-4. Vođenje sonde ostvaruje se ručnim rasterskim pomicanjem kutne sonde. Smjer skeniranja zavara je okomit na os zavara u slučaju kada se žele otkriti uzdužne nepravilnosti, dok se za otkrivanje poprečnih nepravilnosti koristi smjer približno paralelan sa osi zavara (Slika 5.46). U slučaju skeniranja kutnom sondom u smjeru okomito na os zavara potrebno je rotirati sondu do  $10^\circ$  što se bitno razlikuje u odnosu na višepretvorničku sondu koju nije potrebno rotirati. Sukladno prema zahtjevima norme EN ISO 17640 najmanji volumen skeniranja iznosi 10 mm sa obje strane zavarenog spoja kako bi se u potpunosti zona utjecaja topline i cijeli presjek zavara (Slika 5.47). Kod duljine od 10 postotne širine sonde ostvaruje se minimalno preklapanja skeniranja. Najveća brzina skeniranja smije iznositi 150 mm/s.



Slika 5.46 Volumen skeniranja zavara [1]



Slika 5.47 Položaj i način vođenja sonde prilikom skeniranja zavara [28]

## 5.6. Analiza rezultata i izvještaj o ispitivanju

Tijekom skeniranja ultrazvučni uređaj prikuplja podatke i stvara različite načine prikaza signala. Ispitivač analizira rezultate skeniranja u cilju otkrivanja bilo kakve indikacije pukotine unutar materijala. Pravilna interpretacija rezultata zahtijeva visoku razinu obuke i dobro poznavanje ultrazvučnog postupka ispitivanja zavarenih spojeva.

Prilikom prikazivanja rezultata kod višepretvorničke metode korišten je kombinirani A-B-C-S prikaz rezultata (Slika 5.48), a istovremeno postizanje više oblika prikaza stvara presjek ispitnog zavara i nudi mogućnost lakšeg otkrivanja položaja i veličine pogrešaka.

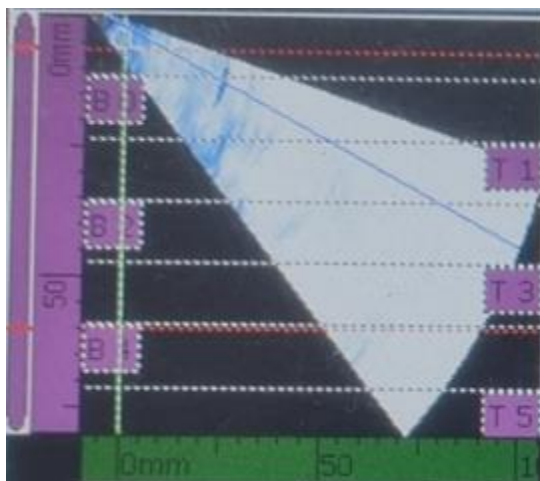


Slika 5.48 Višestruki prikaz rezultata višepretvorničkom metodom [28]

Detaljno otkrivanje indikacija nudi A prikaz koji se može odabrati u kombinaciji sa S prikazom. A-prikaz obuhvaća amplitude reflektiranih valova tijekom vremena i prikazuje dubinu signala prolaskom kroz materijal. B prikaz (bočni pogled) označava poprečni presjek uzorka za određeni kut u odnosu na simetralu, te se sastoji od niza naslaganih A skenova i za takav prikaz kod ispitivanja višepretvorničkom metodom nije potrebno pomicati sondu kao kod konvencionalnih metoda gdje je pomicanje sonde obavezno. Najčešće je horizontalna os duljina (pozicija) sonde tijekom skeniranja duž površine ispitnog materijala, a vertikalna os predstavlja putanju ultrazvuka ili vrijeme.

Područje na zaslonu u kojem se nalazi indikacija prikazano je razvučene veličine zbog širenja snopa. Kod oblikovanja C-prikaza (pogled odozgo) indikacije su označene kao visoki reflektirani signali kroz crvene i žute amplitude. Na horizontalnoj osi naznačena je udaljenost od ishodišta sonde, a na vertikalnoj kut ultrazvučnog snopa. Svaki kut odgovara jednom B skenu.

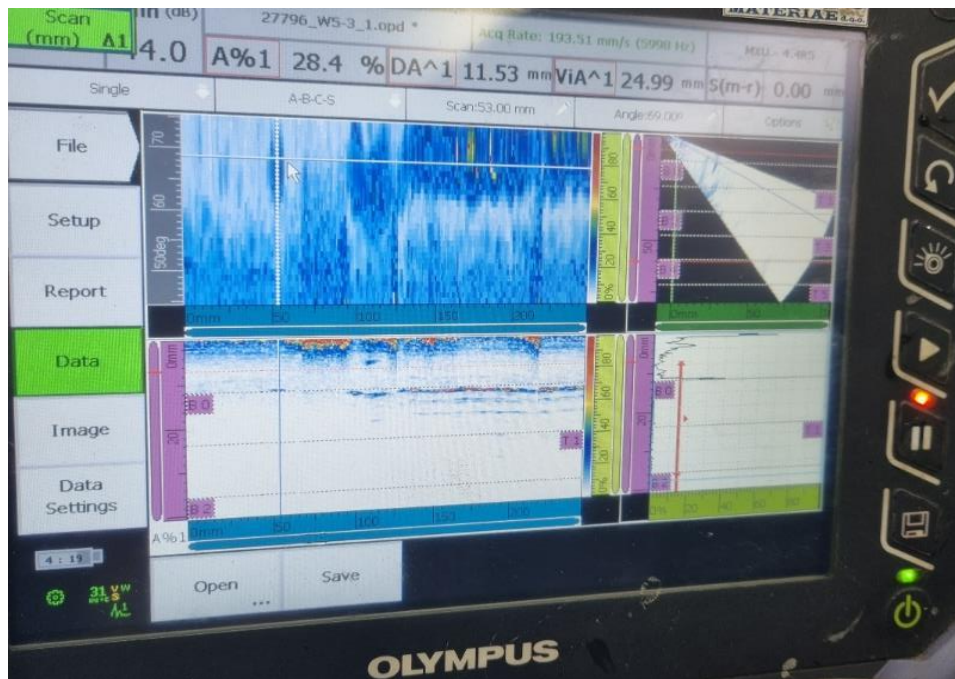
Velike brzine prihvaćanja podataka generiranja rezultata omogućuju efikasno ispitivanje većih područja ispitivanja visokom razlučivosti. Za analizu rezultata kod višepretvorničke metode karakterističan je S-prikaz (sektorsko skeniranje) koji predstavlja 2D prikaz svih A skenova i omogućuje uvid u poprečni presjek zavara dobiven skeniranjem pod raznim rasponom kutova snopa kako bi se optimizirala mogućnost otkrivanja indikacija (Slika 5.49). Horizontalna os odnosi se na projiciranu udaljenost, dok vertikalna os predstavlja dubinu ispitivanja. Ovakav prikaz označava kretanje zrake snopa i otkriva stvarne položaje reflektora iscrtavanjem podataka iz različitih kutova u isto vrijeme i time osigurava prikladnost za vizualizaciju i usporedbu dobivenih rezultata.



Slika 5.49 S-prikaz rezultata ispitivanja V-zavara [28]

Odjek prolaska kroz cijelu debljinu zavara iscrtan je na prikazima rezultata kao i promjene intenziteta amplitude što ukazuje na potencijalu nesavršenost unutar materijala. Različite palete boja označavaju skokove amplituda i time se naslućuje mogućnost postojanja indikacija.

Na slici 5.50 se može vidjeti da postoji sitna nepravilnost odnosno indikacija koja se nalazi 25 mm od čela sonde i na dubini 11,53 mm. Budući da debljina materijala iznosi 12 mm, detektirana indikacija nalazi se u korijenu zavara. Pojačanje je postavljeno na 44 dB što je vrlo visoka osjetljivost tako da se radi o vrlo sitnoj nepravilnosti.



Slika 5.50 Prikaz indikacije na dubini 11,53 mm i 25 mm od čela sonde [28]

Otkrivene indikacije su plinske šupljine ili plinske pore kuglastog oblika koje pripadaju skupini oznake EN 2011 prema normi HRN EN ISO 6520-1:2008. Detektirane pojedinačne plinske pore određene su promjera ekvivalentne veličine reflektora –  $d_{ERS} \leq 1,5$  mm. Procjenjuje se da je na uzrok pojave indikacija utjecala geometrija same konstrukcije. Prema normi HRN EN ISO 19285:2017 nepravilnosti se klasificiraju kao prihvatljive.

Na slici 5.51 kod ultrazvučnog ispitivanja metodom odjeka sučeljenog X-zavara nema naglih skokova amplituda signala, što upućuje da unutar volumena zavara nisu utvrđene indikacije nepravilnosti koje bi se morale klasificirati.



Slika 5.51 A-prikaz dobiven metodom odjeka [28]

Nakon završetka ispitivanja, oblikuje se izvještaj o ispitivanju u kojem su prikazani i navedeni podaci o metodi ispitivanja, parametrima, svim nepravilnostima koje su otkrivene tijekom ispitivanja uključujući vrstu nepravilnosti, te lokaciju i njezinu veličinu. Također nalaze se i podaci o materijalu i zavarenom spoju.

IZVJEŠTAJ O ULTRAZVUČNOM (UT) ISPITIVANJU ULTRASONIC TEST (UT) REPORT											
1. OPĆI PODACI GENERAL DATA											
Objekt / Predmet: Object / Position:		REGENERATOR									
Naručilac / Posrednik: Customer / Manufacturer:					Naručitelj hr./Ugovor: Order No. / Contract No.:						
Nacrtni broj: Drawing No.:	27796-0101	Oznaka materijala: Material code:	SA-438 Q1 WPL1 / SA-333 Q1 R1 SA-158 LP2 G.1 / P2330H / P2330H / SA-1326 / P3229H	Nazivna debljina: Nominal thickness:	12,0	[mm]					
Norma - tehnika ispitivanja: Standard - testing technique:	HRN EN ISO 13588:2019	Radna uputa: Operating instruction:	SOP-UT-185.04-EN	Vrsta spoja: Weld type:	BW						
Kriterij prihvatljivosti: Acceptance criteria:	HRN EN ISO 19285:2017	Specifični zahtjevi: Special requirements:	nema / none	Tehnika zavarivanja: Welding technique:	141, 136						
2. PARAMETRI ISPITIVANJA TESTING PARAMETERS											
Uređaj: serijski broj: Instrument: serial No.:		1 OMNISCAN SX 1GG4PA; #QC-0081011 2 --		Tehnika ispitivanja: Testing technique:		CV PA TdB Insc		Toplotna obrada: Heat treatment:			
Sonda: serijski broj: Probe: serial No.:		1 GE P8-4M15G0.SP.#20CEBARD 2 --		Balzarni blokovi: Calibration blocks:		S1 S2 X X		Opseg ispitivanja: Scope of testing:			
Klinički / kutni: Bevel(s) / angle(s):		1 WPA-18° ± 0,2 2 --		Raspodjeljeni kutovi: Angle range / step:		1 45-70 ± 1,0 2 --		Razmak sondi - PCS: Probe centre spacing-PCS:			
Reflektor - vrsta/veličina: Reflector - type / size:		1 RS 100 500 0 2 --		Nazivna frekvencija: Nominal frequency:		1 4,0 1 -- (MHz) 2 --		Širina - dužina / rezolucija: Scan - length / resolution:			
Presečna veličina: Size estimated by:		1 DAC 100 100 100 200 200 2 --		Maks. brz. skeniranja: Max. scanning speed:		1 100 3 -- (mm/s) 2 --		Ref. pojačanje - V <sub>0</sub> : Reference gain - V <sub>0</sub> :			
Mjerna područja: Testing range(s):		1 CV-F1 30 LP03.0 -- (mm) 2 --		Vidna rat. amplituda: Reference amplitude height:		1 BN 100 RR -- (%) 2 --		Radno pojačanje - V <sub>1</sub> : Testing gain - V <sub>1</sub> :			
Stanje: kvaliteta površine: Surface condition quality:		1 ER20 / clean 2 --		Smjer(ovi) skeniranja: Scanning direction(s):		1 A, S, 3A 2 --		Korekcija prijenosa: Transfer correction:			
Ograničenja (opis): Limitations (description):		1 nema / none 2 --		Kontaktne sredstvo: Type of couplant:		1 ELITE F7p 2 --		Temperatura površine: Surface temperature:			
3. REZULTATI ISPITIVANJA TESTING RESULTS											
R.br. No.	Oznaka spoja Joint mark	Parametri nepravilnosti / Parameters of imperfections					vrsta prema type acc. to HRN EN ISO 6520.1	ocjena / result			Napomena Note
		početak / position x [mm]	y [mm]	dužina / length [mm]	širina / depth [mm]	amplituda amplitude [ERS max / dB]		NI	NHI	RI	
1	W5-3 / W1-8	-	-	-	-	-	-	X			
2	W7-1 / W1-6	-	-	-	-	-	-	X			
3	W7-1 / W1-7	-	-	-	-	-	-	X			
4	W7-1 / W1-10	-	-	-	-	-	-	X			
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4. SKICA - NAPOMENA - KOMENTAR SKETCH - NOTE - COMMENT											
<p>Napravilnosti detektirane u ispitanoj dijelu završenih spojeva su kako slijedi:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>indikacija zbog geometrije</li> <li>2011 - pojedinačne pore, d<sub>100</sub> ≤ 1,5 mm</li> </ul> <p>Defected imperfections in the inspected part of the welded joints are as follows:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>indications due to the geometry</li> <li>2011 - gas pores, d<sub>100</sub> ≤ 1,5 mm</li> </ul>											
5. OPIS OZNAKA DESCRIPTION OF MARKS											
Kritični Assessment:	CV	- konvencionalni UT sustav - conventional UT system	PA	- fiksiprotivni UT sustav - Phased Array UT system	ToFD	- tehnika difrakcije - Time of Flight Diffraction					
	DAC	- korekcija (karakter) amplitude u odjajnom dijelu - distance amplitude correction factor	TCG	- korekcija pojačanja u svim smjerovima - Time Corrected Gain	DGS	- odjajnom pojačanje-veličina - Distance Gain Size					
	FBH	- novi tipovi (dva tipa) reflektora - Flat Bottom Hole (two shapes reflector)	SDH	- bočni pramen / zrcal - Side Refl. Hole	ERS	- ravnokutna veličina reflektora - Equalized Reflector Size					
	BW	- odjak od zadnje stijenke - Back Wall echo	LW	- lateral val - Lateral Wave	PCS	- razmak središta UT sonda sredi - Probe Centre Spacing					
	NI	- nema nepravilnosti - No Imperfections	NHI	- prihvatljive nepravilnosti - Non Reportable Acceptable Imperfections	RI	- neprihvatljive nepravilnosti - Reportable Unacceptable Imperfections					

Slika 5.52 Izvještaj o ultrazvučnom ispitivanju višepretvorničkom metodom [38]



<b>IZVJEŠĆE O ULTRAZVUČNOM ISPITIVANJU</b> ULTRASCHALL - PRÜFBERICHT	Izvešće br. / Bericht Nr.:	001/24
	Narudžba br. / Bestellung	
	List / Blatt:	1 / 2

Naručilj: / Besteller:		
Ispitni objekt / Poluproizvod: / Prüfobjekt / Halbzeug: Podsklop transformatora		Crtež br. / Zeichnung Nr.:
Materijal: / Werkstoff:		Ispitna debljina: / Prüfdicke: 15 mm
Ispitivanje: / Prüfung:	Prije toplinske obrade: / Vor Wärmebehandlung:	Broj pozicije: / Pos. Nr.:
	Nakon toplinske obrade: / Nach Wärmebehandlung:	
	Bez toplinske obrade: / Ohne Wärmebehandlung: x	
Opseg ispitivanja: / Prüfumfang: 100%	Vrsta zavara: / Nahtart: BW	
Ispitano prema: / Prüfung Durchgeführt nach: EN ISO 17640:2018	Zavarivač: / Schweisser:	
Kriterij prihvatljivosti: / Zulässigkeitsgrenze: EN ISO 11666:2018 (Level 2)	Grupa ocjenjivanja / Bewertungsgruppe	
Lokacije ispitivanja: / Prüfungsorte:	Stanje ispitne površine: / Prüflaechezustand: Sačmareno / Kugelgestrahlt	
Ispitni uređaj: / Gerät: Krautkrämer USN 100	Kontaktno sredstvo: / Koppelmittel: ZG-F	
	Chargen-Nr.:	
Ispitne sonde / Udaljenost o: / Prüfsonde / Schallaustrittspunkt: MWB 60 - 4 / 13 mm / MB 4S	Referentni reflektor: / Registriergrenze: K1; KSR 1,5mm	
Podešavanje uređaja i ispitne osjetljivosti na: / Gerät und Empfindlichkeitseinstellung an: K2; 25 mm Radius	Korekcija prijenosa: / Transferkorrektur: +2 dB	

Interpretacija rezultata: / Beurteilung:		E = Prihvatljivo / Akzeptierbar E <sub>1</sub> = Prihvatljivo nakon popravka / Zulässig nach Reparatur NE = Nedoželjene nepravilnosti / Nicht zulässig								
Br. objekta / reflektora	Dimenzije	Udaljenost od referentne točke	Uzdužno / poprečno	Visina eha	Registrirana duljina	Dubina od površine	Signal s jedne ili obje strane	Nalaz / Entdeckung		Napomena / Bemerkung
								E	NE	
								X		

Slika 5.53 Izveštaj o ultrazvučnom ispitivanju metodom odjeka [38]

## 6. Zaključak

Zahvaljujući sposobnosti preciznog otkrivanja nepravilnosti, višepretvornička metoda i konvencionalna metoda odjeka prikazane ovime radom su vrlo svestrane ultrazvučne metode koje se primjenjuju u različitim industrijskim područjima za ispitivanje zavarenih spojeva i procjenu stanja materijala. Ove metode predstavljaju vrijedan alat osiguranja kvalitete i kao takve zauzimaju vrlo bitnu ulogu kod detaljnog ispitivanja zavarenih spojeva, čime pružaju visoku sigurnost i nude preventivno održavanje konstrukcija. Metode su vrlo fleksibilne i moguće ih je primijeniti na raznolikim materijalima i složenim geometrijama što je potvrđeno ovim radom u kojem se ultrazvučna višepretvornička metoda provela na konstrukciji izmjenjivaču topline velike mase, dok se metodom odjeka ispitivao manji element odnosno podsklop transformatora.

Posljedično poznavanje pripreme sustava i razumijevanje fizikalnih principa te ultrazvučnih parametara koji utječu na točnost rezultata ultrazvučnog ispitivanja pokazuju se ključnim postupkom kod procjene rezultata ispitivanja. Stoga pravilan odabir opreme ultrazvučnog sustava od izbora kuta, veličine i frekvencije sonde do potrebnog uređaja i određivanja osjetljivosti kod kalibracije uz pomoć određenog kalibracijskog bloka osnova su za provođenje ultrazvučnog ispitivanja. Priprema površine skeniranja i upotreba odgovarajućeg kontaktnog sredstva važan su uvjet za postizanje površinskog kontakta koji omogućuje kvalitetan prijenos ultrazvučnih valova u materijal i dobivanje kvalitetnog intenziteta odašiljačke zrake. Zbog svoje konstrukcije sastavljene od niz odašiljača i prijamnika koji su vremenski podešeni (fazni), višepretvorničke sonde obrađuju mnogo signala odjednom i time se ostvaruje veća pokrivenost materijala i brzina skeniranja, te se smanjuje vrijeme ispitivanja.

Posebice učinkovitost višepretvorničke metode se očituje kod interpretacije zbog toga što se signali prikazuju iz više kutova (A, B, C, D, i S prikaz), te je na takav način tijekom ispitivanja višepretvorničkom metodom detektirana indikacija pojedinačne pore čiji je uzrok nastanka sama geometrija konstrukcije. Izvješće ispitivanja višepretvorničkom metodom prikazuje rezultate ispitivanja u slikovnom obliku što je velika prednost kod prikazivanja položaja i veličine detektirane indikacije. Posebice S-prikaz koji dodatno pomaže u kontroli određivanja grešaka zbog svog generiranja oblika i prikaza ultrazvučnog snopa. Na temelju dobivenih rezultata, kao i cijelokupnog postupka ispitivanja naprednom višepretvorničkom metodom i metodom odjeka može se zaključiti da su ove metode nezamjenjive kod kontrole kvalitete zavarenih spojeva i procjene životnog vijeka konstrukcije, te da će biti u budućnosti još naprednije i učinkovitije.

## 7. Literatura

- [1] Krstelj, V.: Ultrazvučna kontrola, FSB, Zagreb, 2003
- [2] X weld d.o.o. „Nerazorna ispitivanja“, <https://xweld.hr/usluge/ispitivanje-zavarenih-spojeva>
- [3] Proinstal Škarec d.o.o. „Vodiči za zavarivanje“, <https://proinstal.hr/endskop-protiv-boroskopa/>
- [4] EDC d.o.o. „Videoskopi“, <https://www.edc.hr/videoscopes/>
- [5] OnestopNDT, „Procedure for Liquid Penetrant Testing“, 24.12.2020.  
<https://www.onestopndt.com/ndt-articles/liquid-penetrant-examination-procedure>
- [6] DD EKSPERT j.d.o.o. „Nerazorna ispitivanja-NDT“, <https://dd-ekspert.hr/nerazorna-ispitivanja-ndt>
- [7] Flyability, „WHAT IS NDT (NON-DESTRUCTIVE TESTING)?“  
<https://www.flyability.com/ndt#visual>
- [8] Dr. Ala Hijazi: „Magnetic Particle Testing“, <https://eis.hu.edu.jo/ACUploads/10526/Magnetic%20Particle%20Testing.pdf>
- [9] Dr. Ala Hijazi: „Ultrasonic Testing“, <https://eis.hu.edu.jo/ACUploads/10526/Ultrasonic%20Testing.pdf>
- [10] The British Institute of Non-Destructive Testing – Radiography, <https://www.bindt.org/What-is-NDT/Radiography/>
- [11] Sentinel Inspection Services Ltd, <https://www.sentinelltd.co.nz/non-destructive-testing/>
- [12] <https://www.vroque.co/post/piezoelectric-effect-through-compression-of-a-piezoelectric-material>
- [13] Gnee Stainless Steel, <https://www.gneesteel.com/products/steel-plate/boiler-pressure-vessel-steel/p355nh-steel.html>
- [14] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5243>
- [15] Rapid Welding and Industrial Supplies Ltd, <https://www.rapidwelding.com/ESAB-OK-Tigrod-13-09-2-4mm-TIG-Wire-5Kg-Pack-ER80S-G/130924R150>
- [16] Product Data Sheet, „OK Flux 10.71/OK Autrod“12.20  
<https://www.rapidwelding.com/files/1220402800.pdf>
- [17] [https://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=850](https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=850)
- [18] Proinstal Škarec d.o.o., „Svojstva čelika S355 J2+N“, <https://proinstal.hr/s355j2-celik-1-0577-svojstva/>
- [19] Welding & Welder, <https://www.weldingandwelder.com/product/weld-star-sg3-g4si1-wire-15kg-plastic/>

- [20] Eddyfi Technologies, „Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)“  
<https://www.eddyfi.com/en/technology/phased-array-ultrasonic-testing-paut>
- [21] [https://material-properties.org/what-is-ultrasonic-testing-pulse-echo-method-definition/?utm\\_content=cmp-true](https://material-properties.org/what-is-ultrasonic-testing-pulse-echo-method-definition/?utm_content=cmp-true)
- [22] Evident, „OmniScan SX“, <https://www.olympus-ims.com/en/omniscan-sx/>
- [23] [https://www.bakerhughes.com/sites/bakerhughes/files/202305/bhcs34593\\_phased\\_array\\_catalog\\_r6.pdf](https://www.bakerhughes.com/sites/bakerhughes/files/202305/bhcs34593_phased_array_catalog_r6.pdf)
- [24] Evident, „Mini-Wheel“, <https://www.olympus-ims.com/en/scanners/mini-wheel/>
- [25] Waygate Technologies, „Krautkrämer USM 100“  
[https://dam.bakerhughes.com/m/186bbc2c3ae4fbf2/original/Krautkramer-USM-100-User-Manual\\_EN.pdf](https://dam.bakerhughes.com/m/186bbc2c3ae4fbf2/original/Krautkramer-USM-100-User-Manual_EN.pdf)
- [26] <https://aerofabndt.com/product/mwb-60-4e/>
- [27] Jess W. Jackson & Assoc., Inc., <https://www.jwjndt.com/product/da-512-transducer/>
- [28] Vlastita arhiva fotografija
- [29] Norma EN ISO 14171, „Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje -- Elektrode od pune žice, žice punjene praškom i kombinacije žica/prašak za elektrolučno zavarivanje pod praškom nelegiranih i sitnozrnatih čelika -- Razredba (ISO 14171:2016; EN ISO 14171:2016)“
- [30] Norma HRN EN ISO 9712:2022, „Nerazorno ispitivanje -- Kvalifikacija i certifikacija NDT osoblja (ISO 9712:2021; EN ISO 9712:2022)“
- [31] Norma HRN EN ISO 2400:2013, „Nerazorno ispitivanje -- Ultrazvučno ispitivanje -- Specifikacija za radni etalon br. 1 (ISO 2400:2012; EN ISO 2400:2012)“
- [32] Norma HRN EN ISO 7963:2022, „Nerazorno ispitivanje -- Ispitivanje ultrazvukom -- Specifikacija radnog etalona br. 2 (ISO 7963:2022; EN ISO 7963:2022)“
- [33] Norma HRN EN ISO 13588:2019, „Nerazorno ispitivanje zavara -- Ultrazvučno ispitivanje - - Upotreba automatske višepretvorničke tehnologije (ISO 13588:2019; EN ISO 13588:2019)“
- [34] Norma HRN EN ISO 17640:2018, „Nerazorno ispitivanje zavara -- Ultrazvučno ispitivanje - - Tehnike, razine ispitivanja i ocjenjivanje (ISO 17640:2018; EN ISO 17640:2018)“
- [35] Norma HRN EN ISO 11666:2018, „Nerazorno ispitivanje zavarenih spojeva -- Ultrazvučno ispitivanje -- Razine prihvatljivosti (ISO 11666:2018; EN ISO 11666:2018)“
- [36] Norma HRN EN ISO 19285:2017, „Nerazorno ispitivanje zavara -- Ultrazvučno ispitivanje višepretvorničkom tehnikom (PAUT) -- Kriteriji prihvatljivosti (ISO 19285:2017; EN ISO 19285:2017)“

[37] Norma HRN EN ISO 6520-1:2008, „Zavarivanje i srodni procesi -- Razredba geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima -- 1. dio: Zavarivanje taljenjem (ISO 6520-1:2007; EN ISO 6520-1:2007)“

[38] Interni podaci poduzeća EKO MEĐIMURJE d.d.

## Popis slika

Slika 2.1 Vizualna metoda [2] .....	4
Slika 2.2 Boroskop [3].....	5
Slika 2.3 Fibroskop [3] .....	5
Slika 2.4 Videoskop [4].....	6
Slika 2.5 Postupak provođenja penetrantske metode [5].....	7
Slika 2.6 Ispitivanje obojenim penetrantom [6] .....	7
Slika 2.7 Magnetna metoda [7].....	9
Slika 2.8 Registracija izlaznog magnetskog polja u okolini pogreške [8].....	10
Slika 2.9 Izravna magnetizacija [8] .....	12
Slika 2.10 Magnetizacija elektrodnim uređajem [8] .....	12
Slika 2.11 Elektromagnetski jaram [8] .....	12
Slika 2.12 Princip ispitivanja ultrazvučnom metodom [9].....	14
Slika 2.13 Radiografsko ispitivanje [11] .....	16
Slika 3.1 Matematički prikaz vala [1] .....	17
Slika 3.2 Nastajanje longitudinalnog vala (lijevo) i nastajanje transverzalnog vala (desno) [9] ..	18
Slika 3.3 Piezoelektrični efekt [12] .....	20
Slika 3.4 Lom i refleksija ultrazvučnih valova na granici loma [9] .....	21
Slika 3.5 Ogib valova [9].....	21
Slika 4.1 Ultrazvučni uređaji [28] .....	22
Slika 4.2 Razne vrste kutnih i ravnih sonda [28].....	23
Slika 4.3 Ravna sonda sa frekvencijom 5 MHz [28].....	23
Slika 4.4 Kutne sonde od 70° .....	24
Slika 4.5 Dvostruka sonda SEB4KF8.....	24
Slika 4.6 Kalibracijski blokovi V1 i V2 [8].....	25
Slika 5.1 Regenerator - izmjenjivač topline [28].....	26
Slika 5.2 Sučeljeni V-zavar na plaštu regeneratorskog izmjenjivača topline [28] .....	27
Slika 5.3 Skica pripreme sučeljenog V-zavara za zavarivanje TIG i EPP postupkom [28].....	27
Slika 5.4 Sučeljeno X-zavaren niskouglični čelik S355 J2+N [28] .....	29
Slika 5.5 Sučeljeni X-zavar zavaren u sredini podsklopa transformatora [28] .....	30
Slika 5.6 Specifikacija postupka zavarivanja podsklopa transformatora [38].....	32
Slika 5.7 Ispitivanje višepretvorničkom sondom [20].....	34
Slika 5.8 Princip ispitivanja metodom odjeka [21] .....	36
Slika 5.9 Ultrazvučni uređaj OMNISCAN SX 1664PA [28].....	37

Slika 5.10 Višepretvornička sonda s klinom od 36° [28] .....	39
Slika 5.11 Dimenzije višepretvorničke sonde [23].....	39
Slika 5.12 Pretvarač položaja ENC1-2.5-LM [28] .....	41
Slika 5.13 Višepretvornička sonda povezana s pretvaračem položaja spremna za ispitivanje [28] .....	41
Slika 5.14 Ultrazvučni uređaj Krautkramer USM 100 [28] .....	42
Slika 5.15 Kutna sonda MWB 60-4 [28].....	43
Slika 5.16 Ravna sonda MB4S [28] .....	44
Slika 5.17 Kalibracijski blok V1[28].....	45
Slika 5.18 Kalibracijski blok V2 [28].....	45
Slika 5.19 Kontaktno sredstvo ZG-F [28] .....	46
Slika 5.20 Konektor za sondu [28] .....	46
Slika 5.21 Ulaz za konektor na ultrazvučnom uređaju [28] .....	46
Slika 5.22 Koaksijalni kablovi [28].....	47
Slika 5.23 Ultrazvučni uređaj USM Go+ [28].....	47
Slika 5.24 Ultrazvučna sonda DA 512 EN [28] .....	48
Slika 5.25 Kontaktna površina sonde [28].....	49
Slika 5.26 Prikaz odabira opcije mjerenja stijenke [28] .....	50
Slika 5.27 Nanošenje kontaktnog sredstva na ispitnu površinu [28].....	50
Slika 5.28 Princip mjerenja debljine stijenke [28] .....	51
Slika 5.29 Postupak mjerenja debljine stijenke [28] .....	51
Slika 5.30 Odabir odgovarajuće sonde [28] .....	53
Slika 5.31 Odabir niskougličnog čelika i debljine 12 mm [28].....	54
Slika 5.32 Postavljanje raspona kutova u materijalu od 45° do 75° i optimalnog koraka kuta od 1° [28].....	54
Slika 5.33 Podešavanje duljine skeniranja, početna točka 0 mm, a završna 250 mm [28] .....	55
Slika 5.34 Kontaktno sredstvo COUPLANT FYp [28].....	56
Slika 5.35 Postupak skeniranja zavara višepretvorničkom sondom [33] .....	57
Slika 5.36 Vođenje sonde prilikom skeniranja zavara [28].....	58
Slika 5.37 Postupak ispitivanja višepretvorničkom sondom [28] .....	58
Slika 5.38 Unos debljine materijala ispitivanja u iznosu od 15 mm [28].....	60
Slika 5.39 Unos baždarenog radijusa R25/V2 i prikaz najjačeg signala [28] .....	61
Slika 5.40 Određivanje izlazne točke kutne sonde na kalibracijskom bloku V2 [28].....	61
Slika 5.41 Amplituda signala kod kalibracije kutne sonde [28].....	62
Slika 5.42 Kalibracija kuta sonde na kalibracijskom bloku V2 [28].....	62

Slika 5.43 Prikaz najvećeg signala kod postavljanja kuta ultrazvučnog snopa [28] .....	63
Slika 5.44 Nanošenje kontaktnog sredstva – gela oznake ZG-F na ispitnu površinu [28].....	63
Slika 5.45 Ispitivanje ravnom sondom zbog mogućih dvoslojnosti [28] .....	64
Slika 5.46 Volumen skeniranja zavara [1].....	65
Slika 5.47 Položaj i način vođenja sonde prilikom skeniranja zavara [28] .....	65
Slika 5.48 Višestruki prikaz rezultata višepretvorničkom metodom [28] .....	66
Slika 5.49 S-prikaz rezultata ispitivanja V-zavara [28].....	67
Slika 5.50 Prikaz indikacije na dubini 11,53 mm i 25 mm od čela sonde [28] .....	68
Slika 5.51 A-prikaz dobiven metodom odjeka [28] .....	68
Slika 5.52 Izvještaj o ultrazvučnom ispitivanju višepretvorničkom metodom [38].....	69
Slika 5.53 Izvještaj o ultrazvučnom ispitivanju metodom odjeka [38] .....	70



## Popis tablica

Tablica 5.1 Parametri TIG zavarivanja kod sučeljenog V zavarenog spoja.....	27
Tablica 5.2 Parametri EPP zavarivanja kod sučeljenog V zavarenog spoja.....	28
Tablica 5.3 Kemijski sastav čelika P355NH [13].....	28
Tablica 5.4 Mehanička svojstva čelika P355NH [13] .....	28
Tablica 5.5 Kemijski sastav žice ESAB Tigrod 13.09 [15].....	29
Tablica 5.6 Kemijski sastav žice ESAB OK Autrod 12.20 [16] .....	29
Tablica 5.7 Kemijski sastav čelika S355 J2+N [17].....	30
Tablica 5.8 Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika S355 J2+N2 [18].....	30
Tablica 5.9 Kemijski sastav žice G 46 4 M G4Si1 [19] .....	32
Tablica 5.10 Tehničke karakteristike ultrazvučnog uređaja OMNISCAN SX 1664PA [22].....	38
Tablica 5.11 Tehničke karakteristike višepretvorničke sonde [23] .....	39
Tablica 5.12 Tehničke karakteristike pretvarača položaja ENC1-2.5-LM [24] .....	41
Tablica 5.13 Tehničke karakteristike ultrazvuog uređaj Krautkramer USM 100 [25].....	42
Tablica 5.14 Tehničke karakteristike kutne sonde MWB 60-4 [26] .....	43
Tablica 5.15 Odabir kuta sonde prema debljini osnovnog materijala [1] .....	43
Tablica 5.16 Tehničke karakteristike ravne sonde MB4S [27] .....	44
Tablica 5.17 Tehničke karakteristike ultrazvučnog uređaja USM Go+ [25] .....	48
Tablica 5.18 Tehničke karakteristike sonde DA 512 [27].....	49
Tablica 5.19 Korigiranje dodatnog pjačanja za određeni kut sonde [1].....	60



#### IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Igor Ištvan (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom

Primjena ultrazvučne kontrole zavarenih spojeva u proizvodnji izmjenjivača topline (*upisati naslov*) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(*upisati ime i prezime*)

Igor Ištvan  
(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.