

Ultrazvučna kontrola zavarenih spojeva

Vinko, Evald

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:234781>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





Sveučilište Sjever

Završni rad br. 388/PS/2022

Ultrazvučna kontrola zavarenih spojeva

Evald Vinko, 0336014662

Varaždin, rujan 2022. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 388/PS/2022

Ultrazvučna kontrola zavarenih spojeva

Student

Evald Vinko, 0336014662

Mentor

doc. dr. sc. Matija Bušić

Varaždin, rujan 2022. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Evald Vinko

JMBAG 1522/336

DATUM 29.08.2022.

KOLEGIJ Tehnologija III

NASLOV RADA Ultrazvučna kontrola zavarenih spojeva

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Ultrasonic testing of welds

MENTOR dr. sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc.dr.sc. Jasna Leder Horina, predsjednica povjerenstva
2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
3. dipl. ing. stroj. Marko Horvat, član povjerenstva
4. doc.dr.sc. Tomislav Veliki, zamjenski član povjerenstva
- 5.

Zadatak završnog rada

BROJ 388/PS/2022

OPIS

U završnom radu potrebno je, na temelju dostupne literature, definirati postupke ispitivanja zavarenih spojeva metodama bez razaranja. Opisati sve metode ispitivanja 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. Opisati kako se priprema oprema i ispitni uzorak za ispitivanje.

U praktičnom dijelu rada opisati ultrazvučno ispitivanje na gotovim zavarenim spojevima. 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.

ZADATAK URUČEN

31.08.2022



POTPIS MENTORA

M. Bušić

SVEUČILIŠTE
SJEVER



IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski 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, Evald Vinko (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ića završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ULTRAZVUČNA KONTROLA ZAVARENIH SPOJEVA (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Evald Vinko

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Evald Vinko (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ULTRAZVUČNA KONTROLA ZAVARENIH SPOJEVA (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Evald Vinko

(vlastoručni potpis)

Predgovor

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu i znanje koje sam stekao na Sveučilištu Sjever. Želio bih se ovim putem zahvaliti svojem mentoru, prof. dr. sc. Matiji Bušiću, na ukazanom povjerenju, korisnim savjetima te primjedbama tijekom izrade ovog završnog rada.

Zahvaljujem poduzeću Quality Assurance Team d. o. o. i vlasniku tog poduzeća Ivanu Hačeku koji mi je pomogao pri izradi eksperimentalnog dijela završnog rada.

Posebno bi se zahvalio roditeljima, sestrama te prijateljima na pruženoj potpori i strpljenju tijekom studiranja.

Sažetak

Ovaj završni rad podijeljen je na nekoliko cjelina. U prvom dijelu ukratko su opisane NDT metode, razrađena je fizika ultrazvuka koja obuhvaća harmonijsko titranje, vrste valova i osnovne akustične parametre te refleksiju i prelamanje valova. Nakon toga slijedi upoznavanje sa ultrazvučnom opremom, od ultrazvučnog uređaja, vrstama sonde do kontaktnog sredstva. Na kraju teorijskog dijela ilustrirane su tri ultrazvučne metode, pojašnjeni najznačajniji prikazi signala i opisana je priprema ultrazvučnog sustava za ispitivanje. Na kraju završnog rada nalazi se eksperimentalni dio u kojem je izveden postupak ispitivanja zavara.

Ključne riječi: Kontrola bez razaranja, ultrazvuk, pogreška, diskontinuitet, granična površina, ultrazvučni valovi, ultrazvučne sonde, ispitni objekt

Summary

This final paper is divided in several parts. In the first part, NDT methods are shortly described, the physics of ultrasound, which includes harmonic vibrations, types of ultrasonic waves and basic acoustic parameters, as well as reflection and refraction of ultrasonic waves, is elaborated. The following is introduction to the ultrasound equipment, all the way from the ultrasound device, type of probes to couplant. At the end of theoretical part, three ultrasound methods are presented, the most common data presentations are explained, and the preparation for ultrasonic testing is described. At the end of the final paper, there is an experimental part in which the welding test procedure was performed.

Keywords: Non destructive testing, ultrasound, flaws, discontinuity, interface, ultrasound waves, ultrasound probe, test subject, test specimen

Popis korištenih kratica

KBR	Kontrola bez razaranja
NDT	Non-Destructive Testing
EC	Ispitivanje vrtložnim strujama (elektromagnetsko ispitivanje)
RT	Radiografsko ispitivanje
AVG	udaljenost-pojačanje-veličina (njem. Abstand-Verstärkung-Grosse)
DGS	udaljenost-pojačanje-veličina (engl. Distance-Gain-Size)

Popis fizikalnih veličina

Oznaka	Jedinica	Opis
f	Hz	frekvencija
T	-	period titranja
λ	m	valna duljina
E	GPa	modul elastičnosti
G	GPa	modul smicanja
K	GPa	modul kompresibilnosti za tekućine
Z	Ns/m ³	karakteristična akustična impedancija
ρ	kg/m ³	gustoća materijala
v	m/s	brzina ultrazvuka u materijalu
A	m	amplituda titranja čestice
ω	rad/s	kutna frekvencija
I	W/m ²	intenzitet ultrazvuka
R	-	faktor refleksije
f_K	Hz	karakteristična frekvencija pretvarača
γ	°	kut divergencije
D_{ef}	mm	efektivni promjer pretvarača

Sadržaj

Evald Vinko, 0336014662	1
Predgovor	I
Sažetak	II
Popis korištenih kratica	IV
Sadržaj	V
1.UVOD	1
2.KONTROLA BEZ RAZARANJA	2
2.1.Optičke metode	3
2.1.1.Vizualna metoda	3
2.1.2.Laserska interferometrija	5
2.2.Zvučne i ultrazvučne metode	7
2.2.1.Akustička emisija	7
2.2.2.Ultrazvučne metode	8
2.3.Električne i/ili magnetske metode	9
2.3.1.Magnetske metode	9
2.3.2.Elektromagnetske metode-metoda vrtložnih struja	10
2.4.Radijacijske metode	12
2.4.1.Radiografija	12
2.4.2.Radiografske tehnike	13
2.5.Penetrantske – kapilarne metode	14
2.5.1.Metoda penetrantske kontrole	14
2.6.Toplinske metode	16
2.6.1.Termografija	16
3.ULTRAZVUČNA KONTROLA	17
3.1.Princip rada	17
3.2.Fizika ultrazvuka	17
3.2.1.Harmoničko titranje	17
3.2.2.Valovi	21
3.2.3.Osnovni akustički parametri	24
3.2.4.Refleksija i prelamanje valova	28
4.Ultrazvučna oprema	33
4.1.Ultrazvučni uređaj	33
4.2.Nastajanje i prijem ultrazvučnih valova	34
4.3.Vrste sondi	36
4.3.1.Ravna sonda	36
4.3.2.Kutna sonda	36
4.3.3.Dvostruke sonde	37
4.3.4.Karakteristike sondi	38
4.4.Etaloni	41
4.5.Kontaktno sredstvo	42

4.6. Metoda odjeka	43
4.7. Metoda prozvučivanja	44
4.8. Metoda rezonancije	45
5. Način prikaza primljenog signala	46
5.1.A – prikaz	46
5.2.B – prikaz	47
5.3.C-prikaz	48
6. Priprema ultrazvučnog sustava za ispitivanje	49
6.1. Izbor ispitnog sustava	49
6.2. Umjeravanje	49
7. Eksperimentalni dio	51
7.1. Oprema za ispitivanje	52
7.1.1. Ultrazvučni uređaj KRAUTKRAMER GE USM 35XS	52
7.1.2. Kutna sonda A4P8x9A60 oznake JKG117	53
7.1.3. Kutna sonda A4P8x9A70 oznake JKG120	54
7.1.4. Dvostruka sonda DA4P8x14LA45FS25 oznake JHE373	55
7.1.5. Etaloni V2	56
7.1.6. Kontaktno sredstvo	56
7.1.7. Ostala oprema	57
7.2. Plan aktivnosti:	57
7.3. Određivanje opsega ispitivanja i standarda prihvatljivosti	58
7.4. Provođenje ispitivanja	59
7.4.1. Ispitivanje kutnom sondom od 60° oznake JKG117	59
7.4.2. Ispitivanje kutnom sondom od 70° oznake JKG120	64
7.4.3. Ispitivanje dvostrukom sondom od 45°	65
7.5. Izvješće o ispitivanju	67
8. Zaključak	69
9. Literatura	70

1. UVOD

Zavarivanje je jedno od najkorištenijih postupaka spajanja metala današnjice. Opseg zavarivanja samo na jednom proizvodu može biti iznimno velik. Primjerice, na postrojenjima velikih nuklearnih elektrana, rafinerija ili termoelektrana ima i na tisuće zavarenih spojeva cijevi pod tlakom. Potrebno je da samo jedan zavareni spoj popusti, za izazivanje totalnog kolapsa ili u gorem slučaju razorno oštećenje s velikim posljedicama za okolinu, ljude i imovinu.

Kako bi se spriječile takve havarije potrebno je provoditi određena ispitivanja. Za ispitivanje zavara koristi se tzv. defektoskopija odnosno kontrola bez razaranja (NDT). Osim što se koriste za otkrivanje pogrešaka, NDT metode smanjuju troškove te su vrlo važan faktor pri praćenju kvalitete u svrhu pronalaženja nepravilnosti nastalih uslijed tehnoloških i eksploatacijskih uvjeta.

Od svih NDT metoda, ultrazvučna metoda pokazala se kao najraširenija, kojoj je i namijenjen ovaj završni rad. Razlog tako visoke upotrebe metode je velika sposobnost prilagodbe, iznimno visoka osjetljivost te pouzdanost rezultata. [1]

Na početku ovog završnog rada opisane su najčešće metode kontrole bez razaranja. Nakon toga slijedi obrada ultrazvučne kontrole, a završetak rada je eksperimentalni koji opisuje praktičnu primjenu ultrazvučne kontrole zavarenog sučeonog spoja.

2. KONTROLA BEZ RAZARANJA

Kontrole bez razaranja (KBR) ili NDT (od eng. Non-Destructive Testing) se odnose na niz kontrolnih metoda koje kontrolorima omogućuju procjenu i prikupljanje podataka o materijalu, sustavu ili komponenti pri čemu ne dolazi do narušavanja funkcionalnosti ispitivanog objekta. To je interdisciplinarno područje koje igra važnu ulogu u osiguravanju da konstrukcijske komponente i sustavi vrše svoju funkciju pouzdano i na isplativ način. NDT inženjeri odnosno kontrolori određuju i provode ispitivanja koja pronalaze i karakteriziraju stanja materijala i pukotine koje mogu uzrokovati primjerice pad aviona, otkazivanje reaktora, iskakanje vozila iz šina, eksplozije cjevovoda i sl. Nisu sve NDT metode jednako pogodne za otkrivanje određenih vrsta pogrešaka, zbog toga se, osobito kod izuzetno “odgovornih“ konstrukcija, ispitivanje provodi kombiniranjem dviju ili više metoda. [15]

Stalnim razvojem tehnologije, otkrivanjem novih materijala, proizvodnjom sve složenijih konstrukcija, razvijen je znatan broj različitih metoda i tehnika nerazornih ispitivanja. Svaka je metoda, odnosno tehnika unutar metode namijenjena otkrivanju različitih vrsti pogrešaka, određenim mjerenjima ili utvrđivanju stanja materijala, odnosno konstrukcija.[1]

S obzirom da u praksi nazivi nekih metoda i tehnika imaju više naziva, njihova sistematizacija je teško ostvariva. No ipak, prihvaćena je sljedeća podjela koja se zasniva na interakciji materijala i unesene energije ili sredstva s kojim je materijal doveden u kontakt:

- optičke metode
- zvučne i ultrazvučne metode
- elektro/ili magnetske metode
- radijacijske metode
- kapilarne metode
- toplinske metode.

Osim gore navedenih, unutar svake skupine postoji daljnja podjela. Ovisno o ispitivanom, mjerenom ili traženom objektu često se unutar metode nalaze podmetode ili tehnike.

Kontrola bez razaranja postala je neizostavan dio mnogih industrija. Važan je čimbenik u kontroli kvalitete ne samo gotovog proizvoda, već i za kontrolu poluproizvoda, kao i za kontrolu

sirovca odnosno materijala na samom početku proizvodnje. Dakle, kako bi se zadovoljila tražena kvaliteta, potrebno je primjenjivanje KBR metoda u svim fazama proizvodnog procesa.

Stručnosti osoblja u kontroli bez razaranja obraća se posebna pozornost zbog velike odgovornosti ispitivača, a obavezno provjeravanje i potvrđivanje znanja propisano je, te se provodi u skladu s odgovarajućim normama.[1]

2.1. Optičke metode

2.1.1. Vizualna metoda

Vizualna kontrola najstarija je metoda od svih nerazornih kontrola. Već pred više od tisuću godina, obrtnici su koristeći svoj vid kontrolirali kvalitetu svojih proizvoda, u suštini to je i osnova današnje vizualne kontrole.

Vizualna kontrola, ili kako se često naziva vizualna ispitivanje, podrazumijeva promatranje površina na proizvodima ili sastavnim dijelovima složenih proizvoda s ciljem uočavanja pogrešaka, analizom otkrivenih pogrešaka i donošenje zaključaka. To je uobičajeni korak u procesu proizvodnje, koji se provodi u odgovarajućoj fazi proizvodnje ili nakon završene obrade.

Svrha vizualne kontrole upotrebljava se za:

- utvrđivanje pripadnosti i usklađenosti
- provjera mjera
- otkrivanje tehnoloških pogrešaka na vanjskim i unutarnjim površinama objekta
- otkrivanje pogrešaka zbog eksploatacije
- utvrđivanje stanja objekta temeljem promjena na površini [1].

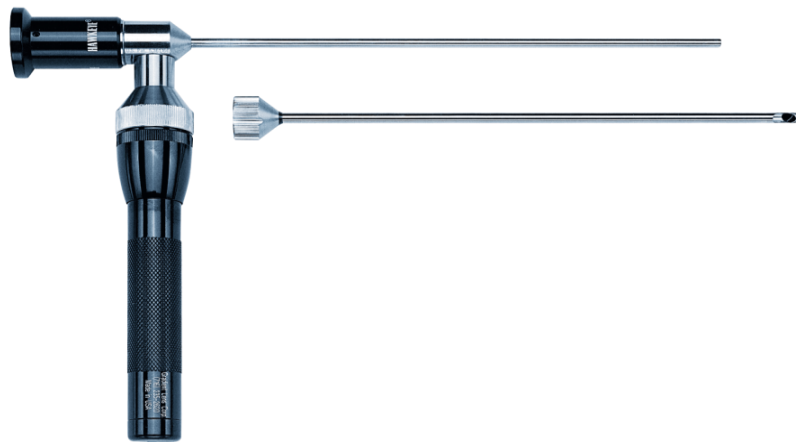


Slika 1. Vizualna kontrola [2]

U osnovi postoje dvije različite tehnike vizualne kontrole: direktna i indirektna vizualna kontrola.

- direktna vizualna kontrola je kontrola kod koje nema prekida dovoda svjetlosnih zraka od površine koja se ispituje do oka ispitivača.
- indirektna vizualna kontrola je vizualna kontrola kod koje dolazi do prekida dovoda svjetlosnih zraka od površine koja se ispituje do oka ispitivača.

Kod indirektno kontrole koriste se optički uređaji manje ili veće moći razlučivanja, kao što su uobičajene lupe i povećala, boroskopi i endoskopi. Ta pomagala mogu biti spojena sa kamerama i općenito sustavom za daljinski prijenos slike, čime se omogućava ispitivanje površina nedostupnih izravnom pregledu.



Slika 2. Boreoskop Hawkeye [3]

Glavni nedostatak ove metode je nemogućnost otkrivanja pogrešaka odnosno diskontinuiteta ispod površine ispitivanog objekta, stoga osoblje vizualne kontrole mora biti dovoljno iskusno i obrazovano. No, u praksi, ova bi metoda trebala biti neizostavni korak prije provođenja ostalih metoda nerazornih ispitivanja.

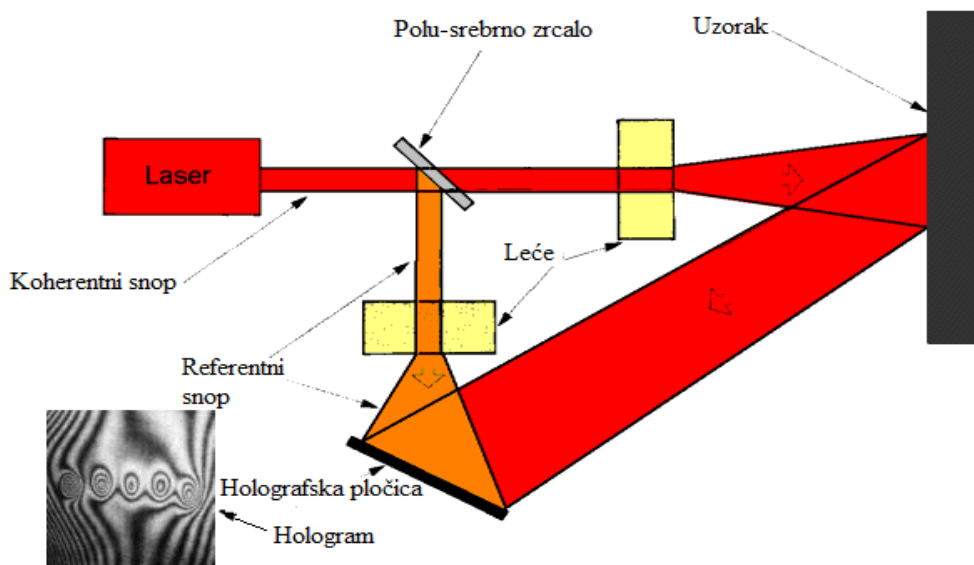
2.1.2. Laserska interferometrija

Laserska interferometrija ili optička holografija jedna je od najpreciznijih metoda za mjerenje udaljenosti. Poznata je kao brza, nedestruktivna tehnika vrlo pogodna za primjenu. U osnovi laserska interferometrija mjeri deformacije na površini predmeta, ali zbog visoke osjetljivosti moguće je otkrivanje podpovršinskih i unutarnjih nedostataka u metalnim i kompozitnim uzorcima.

Metoda holografije se temelji na stvaranju dvaju koherentnih snopova iz lasera od kojih se jedan usmjerava na predmet ispitivanja, a drugi služi kao referentni. Refleksija svjetlosti s površine materijala nosi informaciju o stanju površine. Kada se ova dva snopa ponovno spoje interferencijom, daju hologram koji se registrira na različite načine, ovisno o vrsti ispitivanja i

potrebi dokumentiranja, bilo registriranjem na film namijenjen holografskom zapisu ili stvaranjem trodimenzionalnog prikaza osvjetljavanjem laserom. Propuštanjem koherentne svjetlosti kroz hologram može se postići rekonstrukcija slike predmeta u prostoru. Koherentna se svjetlost prolazom kroz mrežu maksimuma i minimuma amplitudno modelira i difraktira. Hologram dobre kvalitete zadivljuje svojom trodimenzionalnošću kao i značajkom da razbijanjem holograma u dijelove, svaki djelić sadrži cjelovitu informaciju i može poslužiti za rekonstrukciju i postizanje cjelovite slike objekta. [1]

Pošto se radi o nekontaktnoj metodi, moguće je ispitivanje nepristupačnih površina objekata, npr. zbog povišene temperature, opasnosti od ionizirajućeg zračenja ili u slučaju ispitivanja pod vodom.



Slika 3. Optička holografija [4]

Laserska interferometrija primjenjuje se u zrakoplovstvu za otkrivanje štete uzrokovane nesrećom, detektiranje korozije, raslojavanja, pukotina u kompozitima, lopaticama turbina, kućištima raketnih motora, gumama i mnogim drugim industrijama.

2.2. Zvučne i ultrazvučne metode

2.2.1. Akustička emisija

Zvučne i ultrazvučne metode koriste elastično-mehaničke titraje koji se u objektu ispitivanja stvaraju na različite načine ili se unose u objekt ispitivanja, frekvencija se kreće od zvučnih do ultrazvučnih. [1]

Najprije se na ispitivani objekt postavljaju senzori čija je dužnost pretvorba elastičnih valova u električne signale koje registrira akustični prijemnik. Valovi nastaju kada se ispitivani objekt podvrgne naprezanju, obično nešto većem od maksimalnog radnog, mehaničkim ili toplinskim djelovanjem. Kako naprezanje raste dolazi do oslobađanja energije elastičnim valovima zbog širenja pukotina. Takva se metoda sve češće primjenjuje u procjeni cjelovitosti strukture.

Prednosti akustične emisije:

- mogućnost otkrivanja diskontinuiteta u mehanizmima, uključujući pukotine, slojevitosti, naljepljivanja u zavarenim spojevima, koroziju u ranoj fazi stvaranja prije nego što stvori značajnije probleme
- ispitivanje se može izvoditi bez prekida rada ispitivanog objekta
- ispitivanje objekata velikih dimenzija
- ispitivanje je moguće izvoditi u opasnim uvjetima, kao što su povišene temperature, visoki pritisci i na mjestima korozivnog i nuklearnog djelovanja.

Nedostaci akustične emisije:

- nije moguće otkriti diskontinuitete koji su možda prisutni ali se pod opterećenjima ne šire
- ispitivanje može biti znatno duže od ostalih kontrola bez razaranja.

2.2.2. Ultrazvučne metode

Ultrazvučna metoda je postupak ispitivanja pri kojoj se ultrazvučni valovi šalju u materijal odnosno objekt koji se ispituje. Ti visokofrekventni valovi prolaze kroz materijal i odbijaju se od šupljina (zraka), granice zrna ili granične površine što omogućuje ispitivaču odrediti debljinu objekta, diskontinuitete te njihov položaj.



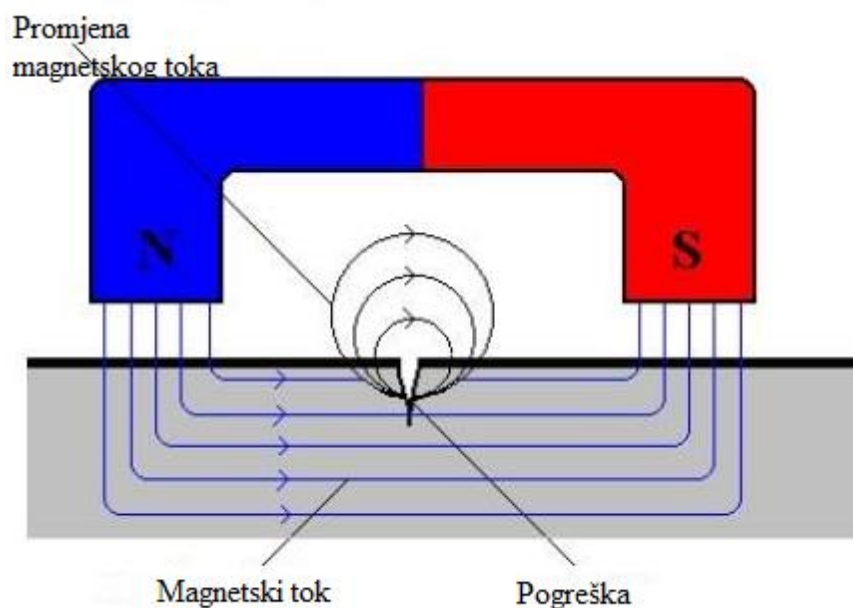
Slika 4. Ultrazvučna kontrola

2.3. Električne i/ili magnetske metode

2.3.1. Magnetske metode

Ispitivanje magnetskim česticama metoda je kontrole bez razaranja namijenjena pronalasku nepravilnosti odnosno diskontinuiteta na površini koji nisu vidljivi golim okom. Osim na površini moguća je kontrola do 2 mm dubine ispitnog objekta. Relativno je jednostavna metoda koja ne traži posebnu pripremu ispitivane površine.

Objekt ispitivanja je moguće magnetizirati elektromagnetom, permanentnim magnetom, provodnim ili pomičnim strujama. Ovisno o greškama koje očekujemo, odabire se istosmjerna ili izmjenična struja odgovarajućeg valnog oblika. Magnetsko se polje u većini slučajeva registrira primjenom feromagnetnih čestica koje nanošenjem na objekt ispitivanja formiraju indikacije pogrešaka., kontrasta dovoljnog za uočavanje.



5. Magnetska metoda

Izbor načina magnetiziranja i tehnike rada ovisi o parametrima pogreške koji treba otkriti. Objekt se može magnetizirati lokalno ili u cjelini, što ovisi o značajkama objekta i ispitivanja. [1]

Kod magnetiziranja ispitivanog objekta potrebno je voditi računa da se magnetne silnice usmjeravaju okomito na očekivane pogreške. Da bi se navedeni uvjet zadovoljio osim uzdužnog i kružnog magnetnog polja može se koristiti i tzv. kombinirano magnetno polje.

Postupak metode može se prikazati u pet temeljnih točaka:

- priprema objekta za ispitivanje
- postizanje odgovarajućeg magnetske indukcije
- registracija izlaznog magnetskog polja zbog deformacije silnica magnetske indukcije u okolini pogreške
- interpretacija indikacije, mjerenje pogreške
- demagnetizacija i priprema objekta ispitivanja za daljnju namjenu. [1]

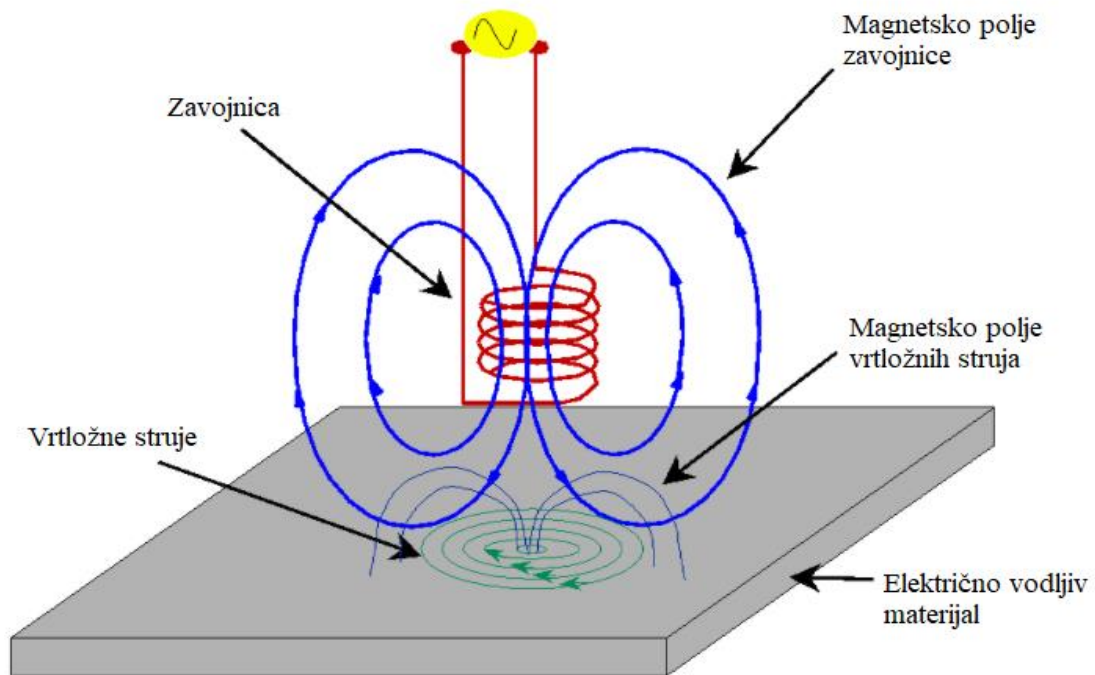
Ekonomična je i brza metoda koja je svoju primjenu pronašla u zrakoplovnoj, automobilskoj, nuklearnoj i petrokemijskoj industriji. Ispituju se dakle, radilice, bregaste osovine, klipnjače, zupčanici motora, navojna vretena, klinovi, spojevi cjevovoda (zavareni spojevi). Vrlo je osjetljiva metoda ispitivanja, no najveća mana je nemogućnost ispitivanja obojenih i nemagnetičnih željeznih materijala poput austenitnih nehrđajućih čelika.

2.3.2. Elektromagnetske metode-metoda vrtložnih struja

Metode vrtložnih struja (eng. Eddy Current Testing-EC) zbog svoje svestranosti i praktičnosti koriste se u održavanju raznih strojeva, od onih u energetskim postrojenjima do zrakoplova.

EC metoda bazira se na elektromagnetskoj indukciji. Ispitivanje se provodi pomoću sonde u kojoj je smještena zavojnica kroz koji prolazi izmjenična električna struja i oko nje se stvara magnetsko polje. Kada se u to magnetsko polje stavi električni vodljiv materijal, u njemu se stvaraju vrtložne struje. Te vrtložne struje teku zatvorenim kružnim putanjama i suprotstavljaju se magnetskom polju zavojnice u sondi, što rezultira promjenom napona u zavojnici. Ako se u putanji vrtložnih struja nađe nepravilnost ili oštećenje u materijalu, vrtložne struje će teći ometano i u

zavojnici će doći do promjene napona. Upravo mjerenjem napona ili jakost struje u zavojnici možemo odrediti nalazi li se u ispitnom predmetu oštećenje ili ne.



Slika 6. Metoda vrtložnih struja [6]

Neke od prednosti ispitivanja vrtložnim strujama:

- osjetljivost na male pukotine i diskontinuitete
- otkrivanje površinskih i podpovršinskih nepravilnosti
- ispitivanje daje trenutne rezultate
- oprema je lako prenosiva
- potrebna je minimalna priprema ispitnog objekta
- ispitna sonda ne treba biti u kontaktu sa objektom koji se ispituje
- mogućnost ispitivanja objekata složenih oblika i veličina

Neki od nedostataka odnosno ograničenja ispitivanja vrtložnim strujama:

- mogućnost ispitivanja samo električno vodljivih materijala
- dubina ispitivanja je ograničena
- nemogućnost otkrivanja pogrešaka koje leže paralelno s namotajem zavojnice.

2.4. Radijacijske metode

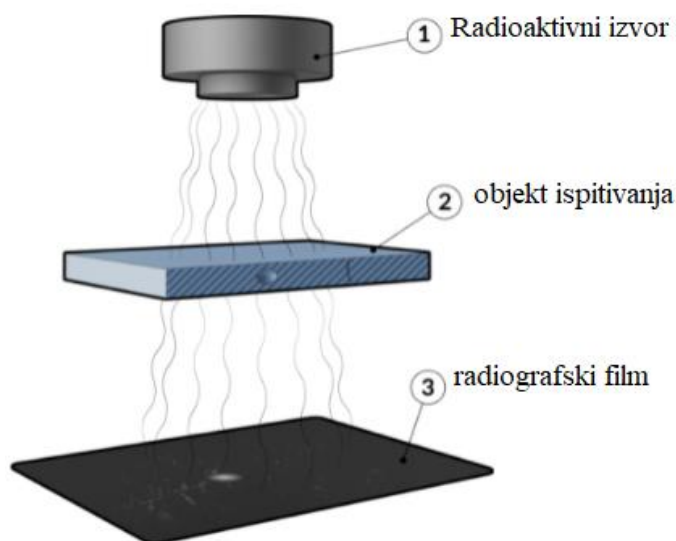
2.4.1. Radiografija

Radiografsko ispitivanje (RT) (slika 7.) je poznato kao i industrijski rendgenska metoda. U ovom postupku elektromagnetno zračenje kratke valne duljine se primjenjuje na materijal kako bi se pronašli skriveni defekti u materijalu. Ova metoda bez razaranja, koja se često primjenjuje u industriji, koristi rendgenski uređaj ili radioaktivni izvor. Kod metode radiografskog ispitivanja mjeri se količina zračenja koja se emitira iza ispitivanog materijala. Procjenom promjena intenziteta zračenja dobivaju se informacije o debljini materijala ili o sastavu materijalu.

Kada elektromagnetni valovi visoke energije prođu u materijal, pojavljuje se unutrašnja slika materijala kroz koji prolazi zračenje kroz filmove osjetljive na zračenje s druge strane materijala. Ova slika je uzrokovana prazninama ili promjenom gustoće u materijalu. Metoda je primjenjiva na sve materijale, metalne i nemetalne.

Slična metoda je i metoda neutronske radiografske ispitivanja. Neutroni se koriste u ovoj metodi umjesto fotona. Ova metoda je poželjna zato što neutroni lako prolaze kroz olovo i čelik, ali se zadržavaju vodom, uljem ili plastikom. Koristeći rendgenske zrake, detalji u materijalu su jasno otkriveni.

Radiografska kontrola je visoko osjetljiva metoda i rezultati ispitivanja se mogu trajno evidentirati što je razlog velike primjene u industriji. [7]



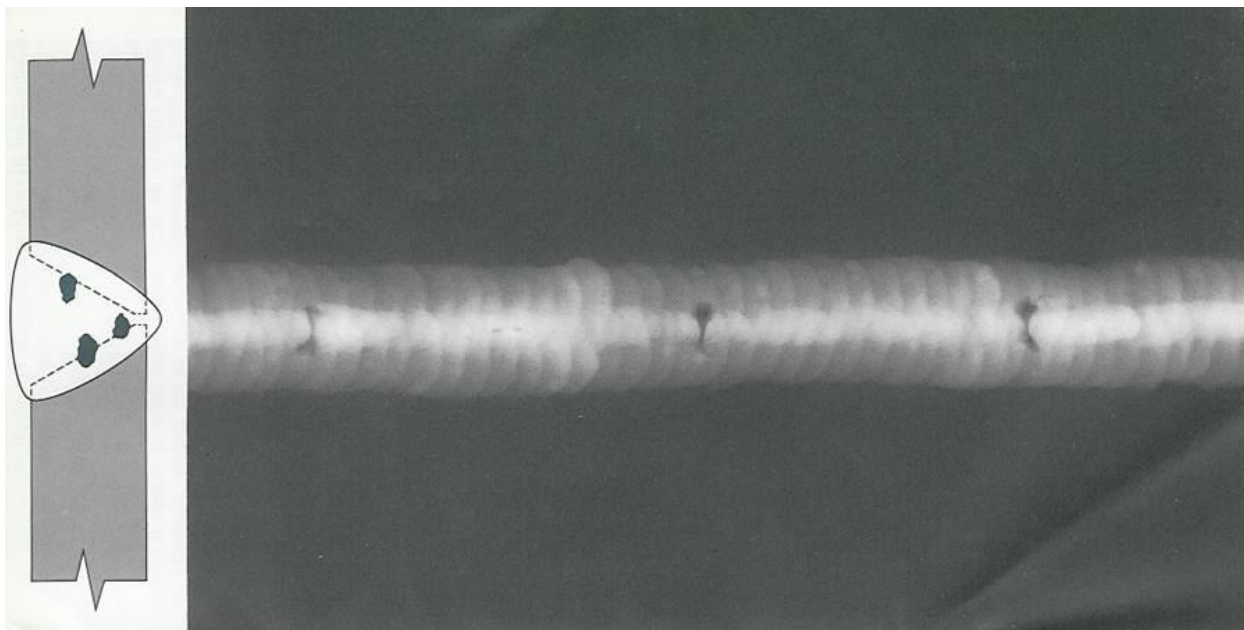
Slika 7. Princip radiografskog ispitivanja [7]

2.4.2. Radiografske tehnike

Specijalne rendgenske cijevi s fokusom izrazito malog presjeka koriste se za radiografiju visokog razlučivanja. Mikrofokus do veličine promjera 10 μm omogućuje korištenje uvećanja jer je oština radiograma zadovoljavajuća. Međutim, ova tehnika nazvana μ - fokusna radiografija rjeđe je u upotrebi radi slabe učinkovitosti takvih rendgenskih uređaja.

Radiometrija se koristi primjenom prikladnog radijacijskog detektora, najčešće u tehnici transmisijskog zračenja.

Tomografija je tehnika koja registrira izlazno zračenje u velikom broj različitih smjerova, digitalizira i obrađuje podatke dajući mogućnost formiranja rendgenske snimke uz računarsku podršku. Metoda nije u široj primjeni u industriji, već je na razini istraživačkih laboratorija.[1]



Slika 8. Primjer rendgenskog snimka zavora [7]

2.5. Penetrantske – kapilarne metode

2.5.1. Metoda penetrantske kontrole

Ispitivanje tekućim penetrantima je jedna od metoda ispitivanja bez razaranja pomoću koje se otkrivaju pogreške u materijalima koje su otvorene prema površini materijala.

Određene tekućine imaju sposobnost penetracije u prazan prostor pukotina otvorenih prema površini materijala. Ova se sposobnost koristi da bi se veoma uske, oku nevidljive pukotine na površini objekta koji se ispituje, učinile vidljivima. Dakle, ako se pukotine odnosno diskontinuiteti ispune spomenutim tekućinama, a zatim se tekućine iz njih podižu na principu kapilarnog učinka, na mjestima gdje se nalaze pogreške pojavit će se indikacije na površini materijala.

Teško da se bilo koja druga metoda ispitivanja koristi toliko često kao ispitivanje tekućim penetrantima. Istovremeno ispitivanje tekućim penetrantima je i najjednostavnija metoda bez razaranja. Međutim, upravo iz tog razloga mnogi često podcjenjuju mogućnosti ove metode, te smatraju da je mogu provoditi i osobe koje nisu dovoljno educirane.

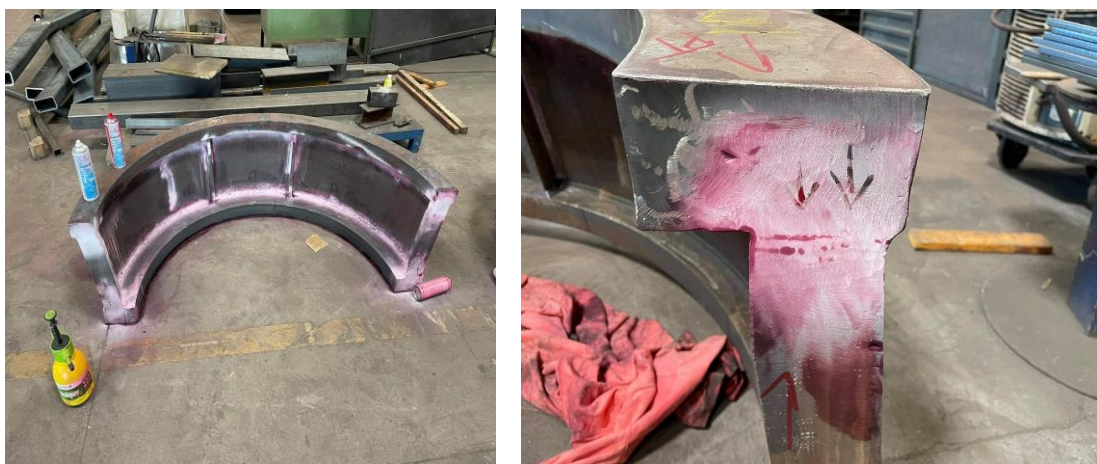
Svaka površina koju treba ispitati tekućim penetrantima mora se pripremiti, kako bi se uklonile sve eventualne nečistoće, koje mogu utjecati na proces postupka ispitivanja. Na pripremljenu površinu nanosi se tekući penetrant i ostavlja se da stoji na površini dovoljno dugo, dok eventualne pukotine ne budu ispunjene što je bolje moguće. Nakon isteka odgovarajućeg vremena penetracije, sav višak penetranta koji prekriva površinu se uklanja, tako da površina djeluje čisto, ali da se tekući penetrant zadrži unutar pukotina. Sljedeći korak je nanošenje razvijaača na površinu koja se ispituje. Razvijaač izvlači tekući penetrant na površinu tvoreći penetrantsku indikaciju. Slijedi inspekcija površine koja podrazumijeva uočavanje, indikacija koje predstavljaju ustvari uvećanu dvodimenzionalnu sliku pogrešaka, njihovo mjerenje, određivanje položaja i bilježenje tih podataka. Na kraju ispitivanja površina se čisti, kako bi se sa nje uklonili zaostali penetranti i razvijaač. [8]

Dakle, svako ispitivanje penetrantima odvija se kroz šest koraka:

- čišćenje površine
- nanošenje tekućeg penetranta i penetracija
- odstranjivanje viška penetranta
- nanošenje razvijачa
- interpretacija penetrantskih indikacija
- završno čišćenje.

Najčešće korišteni sustavi: [1]

- vodom perivi penetrant-fluorescentni
- poslijeemulgirajući penetrant-fluorescentni
- poslijeemulgirajući penetrant-obojeni.



Slika 9. Primjer penetrantske kontrole zavora vrata turbine

2.6. Toplinske metode

2.6.1. Termografija

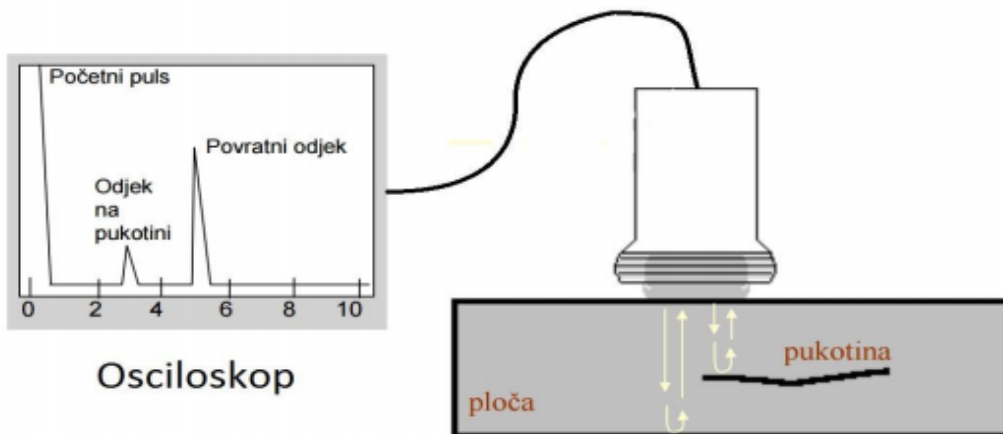
Termografska metoda daje informaciju temeljem snimanja rasporeda temperature na površini objekta ispitivanja. Najčešće se koriste posebne TV kamere s infracrvenim detektorom i lećama koje transmitiraju infracrveno svjetlo. Varijacija temperature se obično transformira u varijaciju boja na slici. Temperature razlike veličine 0,1 K se standardno dobro registriraju.

Najčešća primjena je za praćenje distribucije temperaturnog polja na površini objekata koji rade na visokim temperaturama, radi postizanja potrebne pravilnosti, za otkrivanje pukotina, oštećenja i nehomogenosti koje se vide u nepravilnoj distribuciji temperaturnog polja i za otkrivanje objekata pod zemljom ili ugrađenih u drugo sredstvo. Primjena toplinskog impulsa dobivenog laserom rabi se za otkrivanje laminacije i nepravilnosti u rasporedu ojačanja kompozitnih dijela površine za najmanje 10 K u kratko vrijeme pokazuje postojeće pogreške, u realnom vremenu, nepravilnošću zagrijavanja. [1]

3. ULTRAZVUČNA KONTROLA

3.1. Princip rada

Ultrazvučnim uređajem proizvodi se visokonaponski impuls koji se unosi u piezokristal ultrazvučnog pretvarača. Piezokristal električni impuls pretvara u mehaničke titraje ultrazvučnih frekvencija iznad 2000 Hz. Titraji (energija) se u različitim materijalima prostiru kao ultrazvučni valovi. Takvi valovi reflektiraju snop ili dio snopa od granične površine, ili nehomogenosti u materijalu. Piezokristal pretvara reflektirani val u električni signal i u obliku amplituda (slika 10.) daje prikaz na ekranu kalibriranog ultrazvučnog uređaja. Prema vremenu potrebnom za refleksiju vala određuje se udaljenost, a prema obliku i intenzitetu amplituda, veličina reflektora (pogreške) u predmetu koji se ispituje.



Slika 10. Ultrazvučno ispitivanje [10]

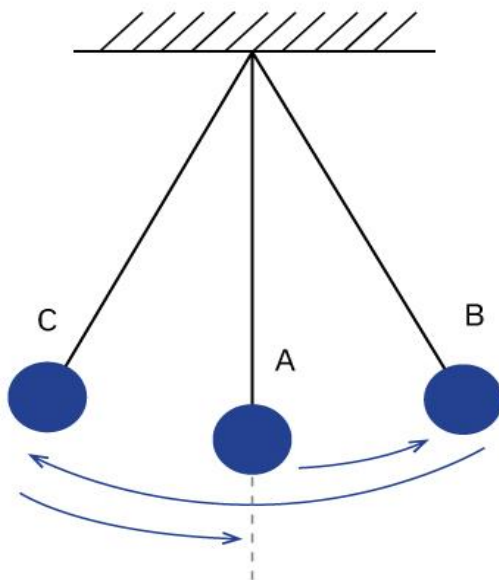
3.2. Fizika ultrazvuka

3.2.1. Harmoničko titranje

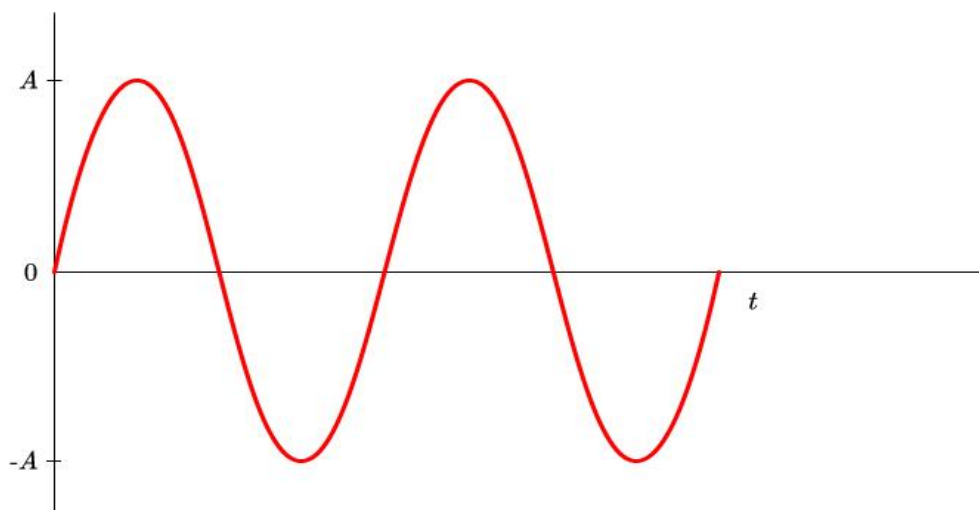
Svakodnevno se susrećemo sa različitim vrstama titraja. Gibanje njihala je jedna od najjednostavnijih oblika titraja. Ako se materijalno tijelo obješeno o konac (slika 11.) otkloni od stanja mirovanja A do neke pozicije C i zatim pusti da se slobodno giba od položaja C do položaja

B, uvijek prolazi kroz A, sve dok se početna energija ne izgubi zbog otpora zraka. Ako pretpostavimo da je na donjem djelu obješena olovka koja je u dodiru sa pokretnom papirnatom

trakom, ona će na iscrtati krivulju kako je prikazano na slici 12.

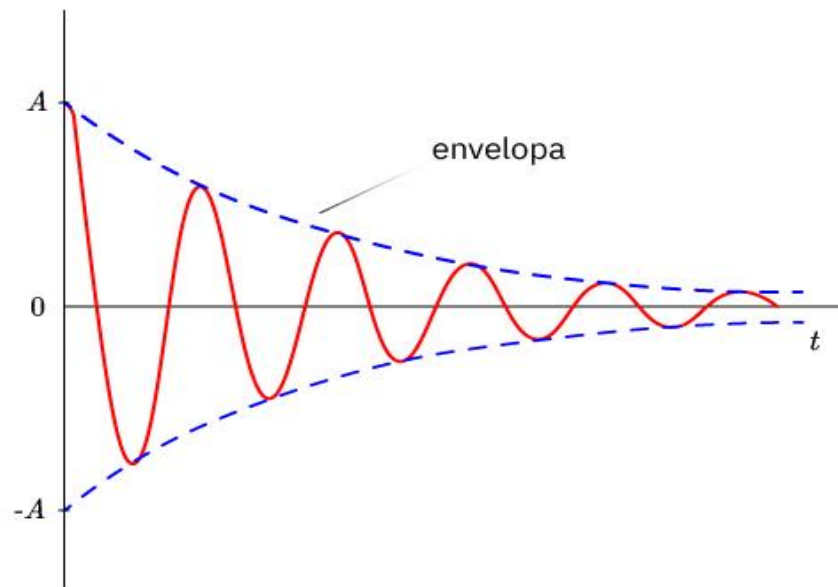


Slika 11. Njihalo [11]

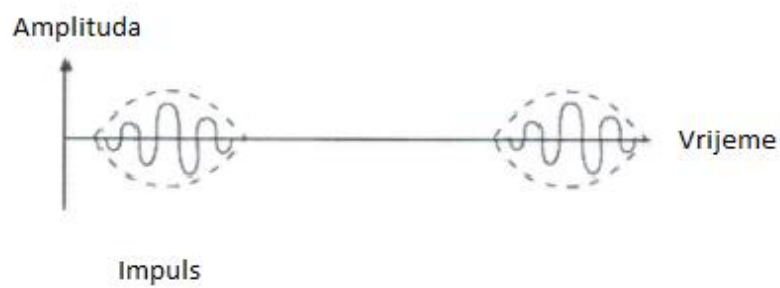


Slika 12. Prikaz neprigušenog titranja [11]

Ako se otpor zraka zanemari, ili se taj otpor kompenzira dodanom energijom, njihalo će činiti neprigušeno titranje. Karakteristika ovog titranja je vremenska postojanost. Kako je gibanje njihala povezano sa trošenjem energije, amplituda intenziteta se postepeno smanjuje kada se govori o prigušenom titranju (slika 13.) Ako je prigušenje tako jako da njihalo čini samo ograničen broj titraja onda se to smatra impulsom. Kod ultrazvučnog ispitivanja radi se samo o titrajima u obliku impulsa. Na slici 14. prikazana je veza neprigušenog, prigušenog titranja i impulsa.



Slika 13. Graf prigušenog titranja [11]



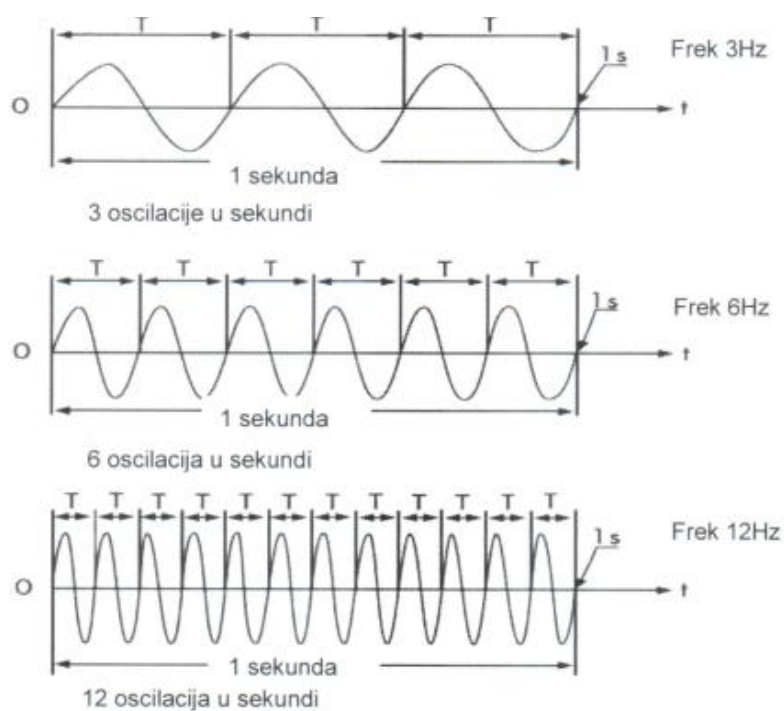
Slika 14. Prikaz titranja [9]

Titranje karakteriziraju sljedeći parametri:

- otklon/amplituda
- vrijeme titranja/ frekvencija.

Otklon je povezan s udaljenosti od ravnotežnog položaja njihala, do njegovog otklona u određenom trenutku vremena. Najveći otklon od ravnotežnog položaja njihala zove se amplituda.

Vrijeme za koje se njihalo otklanja od položaja A do položaja B, a kroz položaj A do C, i ponovo se vraća u poziciju A naziva se period titranja. Periodom titranja može se odrediti frekvencija. Pod frekvencijom podrazumijeva se broj titraja u jedinici vremena. Veza između perioda titranja i frekvencije prikazana je na slici 15.



Slika 15. Frekvencija [9]

Sljedeći izraz prikazuje odnos između frekvencije i perioda titranja:

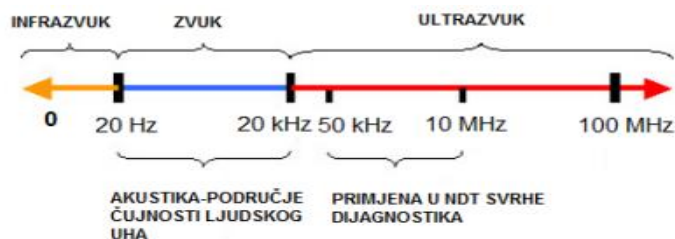
$$f = \frac{1}{T} \quad (3.1)$$

Gdje je:

f- frekvencija [Hz]

T-period titranja

Za ultrazvučno ispitivanje koriste se frekvencije megahercnog područja. Za neposredan kontakt između predmeta i pretvarača najčešće se koriste valovi frekvencije od 1 Mhz do 5 Mhz. Kod tehnike gdje se prijenos valova ostvaruje u vodi koriste se frekvencije veće od 25 Mhz. Na slici 16. prikazan je spektar zvuka.



Slika 16. Spektar zvuka [9]

3.2.2. Valovi

Val je prijenos energije titrajima kroz medij. Parametri koji opisuju širenje valova u izotropnim čvrstim materijalima su frekvencija, valna duljina i brzina. Valna duljina direktno je proporcionalna brzini vala i obrnuto proporcionalna frekvenciji vala. Ta veza prikazana je sljedećim izrazom:

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad , \quad v = \lambda \cdot f \quad (3.2)$$

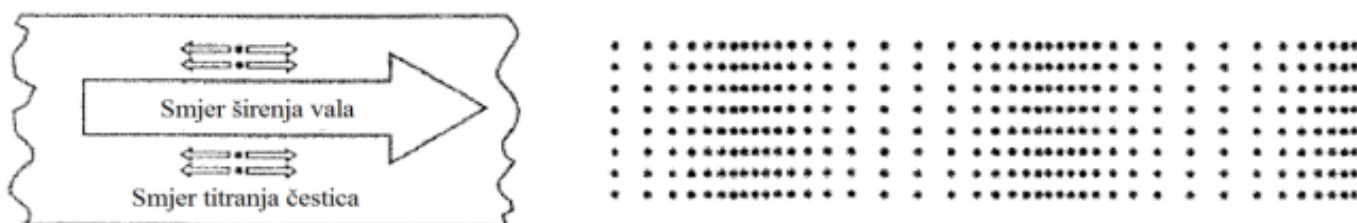
Mehanički titraji kao što su zvučni i ultrazvučni, mogu se širiti samo pri postojanju materijalnih čestica. U vakuumu zbog odsutnosti spojenih materijalnih čestica, valovi se ne šire, mada su u tim uvjetima mogući drugi valni procesi kao npr. širenje svjetlosti ili elektromagnetski valovi. U vodi i zraku, gdje su međusobne veze relativno slabe, može se širiti samo određeni tip valova, a to su longitudinalni. U krutim, čvrstim tijelima (npr. u kristalnim rešetkama metala) čestice su međusobno čvrsto povezane, slično oprugama tj. između njih postoji elastična veza. To omogućuje da se u čvrstim tijelima prenosi više vrsta valova. [9]

3.2.2.1. Vrste ultrazvučnih valova

Postoji nekoliko tipova ultrazvučnih valova, a neki od najkorištenijih su:

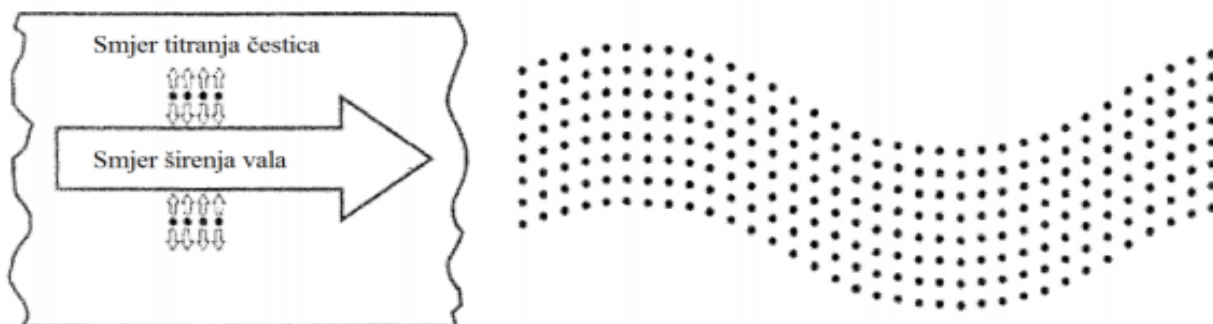
- longitudinalni valovi
- transverzalni valovi
- površinski ili Rayleighovi valovi (R-valovi)
- Lambovi valovi.

Kod longitudinalnih valova smjer titranja čestica isti je kao i smjer širenja vala, kako je prikazano na slici 17. Longitudinalni valovi mogu se prostirati u krutinama, kapljevinama i plinovima.



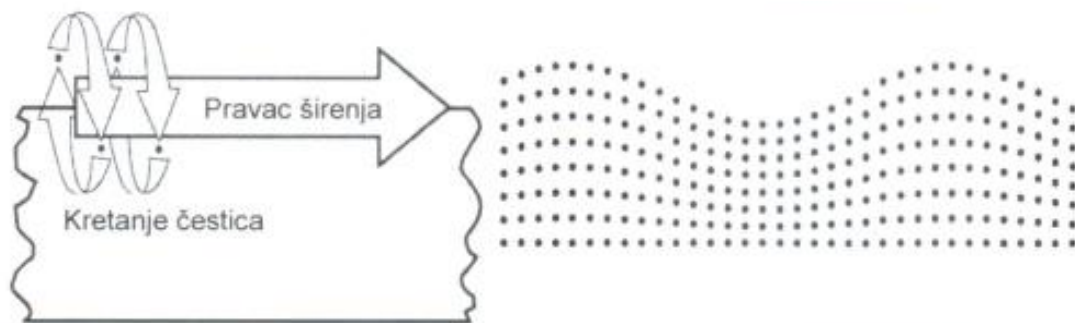
Slika 17. Longitudinalni val [12]

Kod transverzalnih valova smjer titranja čestica okomit je u odnosu na smjer širenja vala (slika 18.). Transverzalni valovi prostiru se samo u krutim sredstvima. To je zbog toga što je u krutim sredstvima veza između čestica dovoljno jaka, pa sila vezivanja omogućuje prijenos, što je preduvjet za pojavu ovakve vrste valova. Brzina prostiranja i valna duljina transverzalnih valova u odnosu na longitudinalne približno je dva puta manja. Iz ovog zaključujemo da se u istom materijalu transverzalnim valovima mogu otkriti manje pogreške nego longitudinalnim. [8]

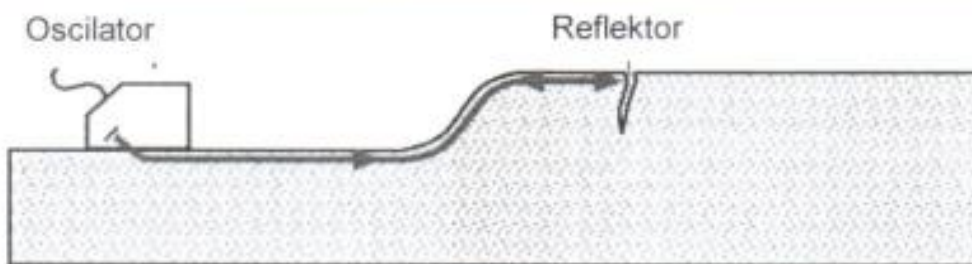


Slika 18. Transverzalni val [12]

Pri određenom upadnom kutu transverzalni valovi se pretvaraju u površinske valove, poznate kao Rayleighovi valovi. Kod ovih valova čestice titraju transverzalno i longitudinalno, tj. eliptički (slika 19.). U procesu sudjeluju samo čestice površinskog sloja materijala. Dubina prodiranja je približno do jedne valne duljine. Brzina širenja površinskih valova je oko 0,9 od brzine transverzalnih valova. Rayleighovi valovi koriste se uglavnom za ispitivanje površinskih grešaka (slika 20.). Masne površine, naslage ulja i drugih tekućina, znatno otežavaju širenje valova, a mehanička oštećenja uzrokuju lažne indikacije i nepouzdanost ispitivanja. [9]

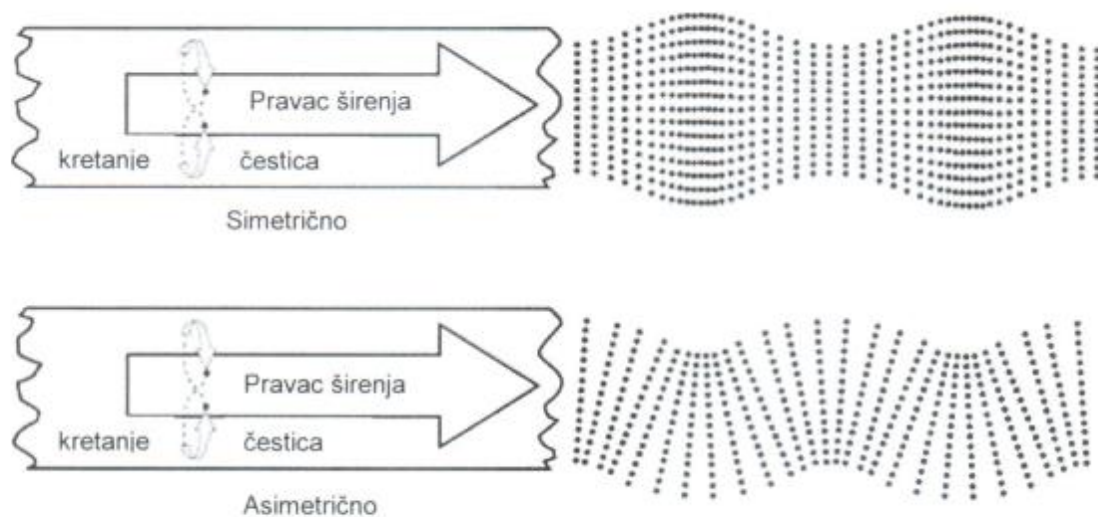


Slika 19. Rayleighovi valovi [9]



Slika 20. Primjer ispitivanja površinskim valovima [9]

Postoje dvije osnovne grupe Lambovih valova, a to su simetrični i asimetrični ovisno od debljine lima, frekvencije pretvarača i upadnog kuta zvučnog snopa. Oba tipa valova karakteriziraju kombinirani titraji po cijelom presjeku lima. Posjeduju visoku osjetljivost, jer svaka pogreška narušava simetriju valova što dovodi do uočavanja indikacija. Debljina kontroliranog lima treba odgovarati valnoj duljini, upravo zbog toga se koristi za ispitivanje tankih limova, do nekoliko milimetara debljine. [8]



Slika 21. Lambovi valovi [9]

3.2.3. Osnovni akustički parametri

Osnovni parametri koji utječu na ispitivanje su:

- frekvencija
- brzina ultrazvučnih valova
- akustička impedancija sredstva
- ultrazvučni tlak
- intenzitet ultrazvuka.

3.2.3.1. Frekvencija

Kako je brzina prostiranja zvuka u određenom materijalu konstanta, prozvučivanje određenom frekvencijom definira valnu duljinu za dati materijal. Odabir frekvencije je od bitnog značaja za ultrazvučno ispitivanje, jer od valne duljine ovisi granica osjetljivosti, odnosno mogućnost otkrivanja najmanje pogreške i približna je polovini valne duljine. [9]

3.2.3.2. Brzina ultrazvučnih valova

S obzirom da je kod različitih materijala veličina čestica koje titraju različita, kao i stupanj njihove međusobne elastične veze, brzina širenja zvuka u raznim materijalima je različita. Brzina određenog vala je konstantna veličina za dati materijal i ovisi od:

- elastičnih svojstava materijala (modul elastičnosti E)
- gustoće materijala ρ
- vrsti vala
- temperaturi
- naprezanju.

U tablici 1. prikazani su izrazi za dobivanje brzina vala u beskonačnom sredstvu, za longitudinalne, transverzalne i R-valove.

Tablica 1. Brzina ultrazvuka [1]

Vrsta vala	Sredstvo	Brzina vala u beskonačnom sredstvu
L	tekućina	$V_L = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$
L	kruto	$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}}$
T	kruto	$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \mu}{2(1 + \mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$
R	kruto	$V_R = \frac{0,87 + 1,12 \cdot \mu}{1 + \mu} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)}}$

gdje je:

E - modul elastičnosti [N/mm²]

G - modul smicanja [N/mm²]

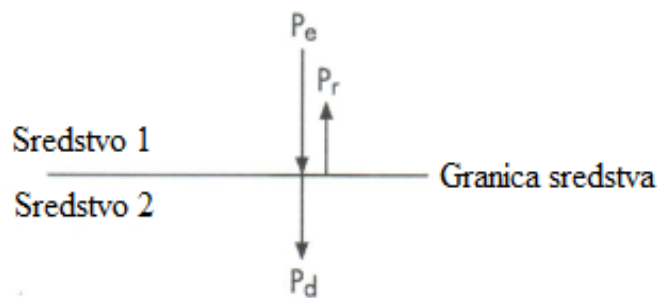
μ - Poissonov koeficijent

K – modul kompresibilnosti za tekućine [N/mm²]

ρ – gustoća materijala [kg/m³]

3.2.3.3. Akustična impedancija sredstva

Kada ultrazvučni val udari na granicu između dva sredstva različite gustoće i brzine prostiranja ultrazvuka, dio energije se reflektira, a ostatak prelazi u drugo sredstvo. Na slici 22. prikazan je proces akustične impedancije kod okomitog upada vala na granicu dvaju sredstva.



Slika 22. Raspodjela zvučnog tlaka na granici sredstva [9]

Akustična impedancija kombinacije dva materijala je karakteristika koja određuje stupanj refleksije. Ako materijali imaju istu impedanciju, nema refleksije.

Akustična impedancija izračunava se izrazom [1]:

$$Z = \rho \cdot v \quad (3.3)$$

gdje je:

Z – karakteristična akustična impedancija [Ns/m³]

ρ – gustoća materijala [kg/m³]

v – brzina ultrazvuka u materijalu [m/s]

Sljedeća tablica prikazuje akustične impedancije različitih materijala.

Tablica 2. Akustične impedancije materijala

	Aluminij	Bakar	Željezo	Titan	Voda (20°C)	Zrak (20°)
Akustična impedancija (kg/m ² s)	17.1 x 10 ⁶	41.6 x 10 ⁶	46.1 x 10 ⁶	28 x 10 ⁶	1.48 x 10 ⁶	413

3.2.3.4. Ultrazvučni tlak

Ultrazvučni tlak je parametar kojim se definira djelovanje sile okomito na površinu objekta, kada u njemu postoji ultrazvučno polje. [1]

U slučaju kad se sredstvom šire longitudinalni valovi, ultrazvučni tlak djeluje na površinu koja je okomita na smjer širenja vala, a kod transverzalnih valova djeluje okomito na površinu paralelnu mjeru širenja vala. [1]

Izraz za izračunavanje ultrazvučnog tlaka za jednostavniju vrstu valova kao što su kuglasti i ravni, glasi: [1]

$$p = Z \cdot A \cdot \omega \quad (3.4)$$

gdje je:

Z – specifična akustična impedancija [Ns/m³]

A – amplituda titranja čestice [m]

ω – kutna frekvencija [rad/s]

3.2.3.5. Intenzitet ultrazvuka

Omjer između vremenskog prosjeka snage zvuka dW i dijela valne fronte površine dS kroz koji se snaga prenosi, definira se kao intenzitet zvuka. Dakle, intenzitet ultrazvuka je energija koja u jedinici vremena djeluje na jediničnu površinu, okomitu na smjer širenja snopa [1]

U slučaju kuglasto i ravnog vala za proračun intenziteta i gustoće zvučnog polja mogu se koristiti sljedeći izrazi: [1]

$$I = E \cdot v \quad (3.5)$$

$$I = \frac{dW}{dV} = \frac{p^2}{2Z} \quad (3.6)$$

$$\frac{dE}{dV} = \frac{p^2}{2Zv} \quad (3.7)$$

gdje je:

I - intenzitet ultrazvuka [W/m^2]

p – vršni tlak [Pa]

Z – akustička impedancija [Ns/m^2]

3.2.4. Refleksija i prelamanje valova

3.2.4.1. Prostiranje zvuka

Kada ultrazvučni val udari na granicu između dva sredstva koja se razlikuju po gustoći i brzini, tj. akustičnoj impedanciji, dolazi do dvije pojave:

- dio energije se odbija (reflektira)
- preostali dio prelazi u novo sredstvo

Kada se ultrazvučni val prostire u materijal bez unutrašnjih graničnih površina, ne mijenja smjer širenja i intenzitet (zvučni tlak). S akustičnog aspekta granična površina je mjesto u kojem dolazi do promjene brzine ultrazvuka. Graničnu površinu čini kako suprotna površina geometrijskog presjeka ispitnog materijala, tako i nehomogenosti u materijalu. Nehomogenost obično predstavlja prijelaz na granici zrna prema mikropukotinama (zraku). Ponekad i u homogenom tijelu dolazi do raspršenja ultrazvučnih valova zbog različite orijentacije zrna u strukturi materijala. [9]

Na granici sredstava dolazi do refleksije ili odraza ultrazvučnih valova i prijenosa ili transmisije ultrazvučne energije u drugo sredstvo. Kako je već objašnjeno, odnos reflektiranog i prenesenog dijela energije ovisi o akustičnoj impedanciji sredstva kroz koje se prvobitno šire

ultrazvučni valovi, sredstva u koje prelaze, vrsti ultrazvučnih valova koji dolaze na granicu sredstava, te načinu na koji dolaze na granicu sredstva. [1]

Oba dvije pojave dešavaju se istovremeno i u različitim intenzitetima ovisno od akustičnih karakteristika sredstava kroz koje se ultrazvuk unosi, odnosno u koje sredstvo prelazi.

Koliki dio zvuka će se odbiti i koliki dio će proći kroz graničnu površinu utvrđuje se koeficijentom refleksije „R“ i koeficijentom prolaza „D“. Vrijednost koeficijenata zavisi od akustičnih svojstava materijala sa obje strane granice.

Faktor refleksije izračunava se prema izrazu:

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (3.8)$$

Gdje je:

R-faktor refleksije

z_1 -akustična impedancija sredstva 1 [kg/m³]

z_2 -akustična impedancija sredstva 2 [kg/m³]

Za izračunavanje koeficijenta prolaza može se koristiti sljedeći izraz:

$$D = \frac{2\sqrt{z_1 \cdot z_2}}{z_2 + z_1} \quad (3.9)$$

Pri čemu je:

D-koeficijent prolaza

z_1 -akustična impedancija sredstva 1 [kg/m³]

z_2 -akustična impedancija sredstva 2 [kg/m³]

3.2.4.2. Snellov zakon

Kada je kut upadnog vala na granicu sredstva 0° , reflektirani dio se vraća prema sondi. Ako zvučni snop valova na granicu sredstva pada pod kutom, u istom materijalu će osim refleksije doći i do lom valova. Dolazi, također i do transformacije vala, tj. pretvaranje iz jedne u drugu vrstu vala. Ovisno o agregatnom stanju dvaju sredstava, od jednog vala proizlaze tri, odnosno četiri nova, različitog tipa i kuta prostiranja. Po Snellovom zakonu može se predvidjeti vrsta vala i kut prostiranja novih valova, ali ne i intenzitet. Presudan parametar za promjenu kuta prostiranja valova je brzina zvuka. Prema Snellovom zakonu promjena kuta je veća ukoliko je veći odnos između brzine zvuka dvaju sredstava.

Za sve valove vrijedi Snellov zakon, koji se može izraziti:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.10)$$

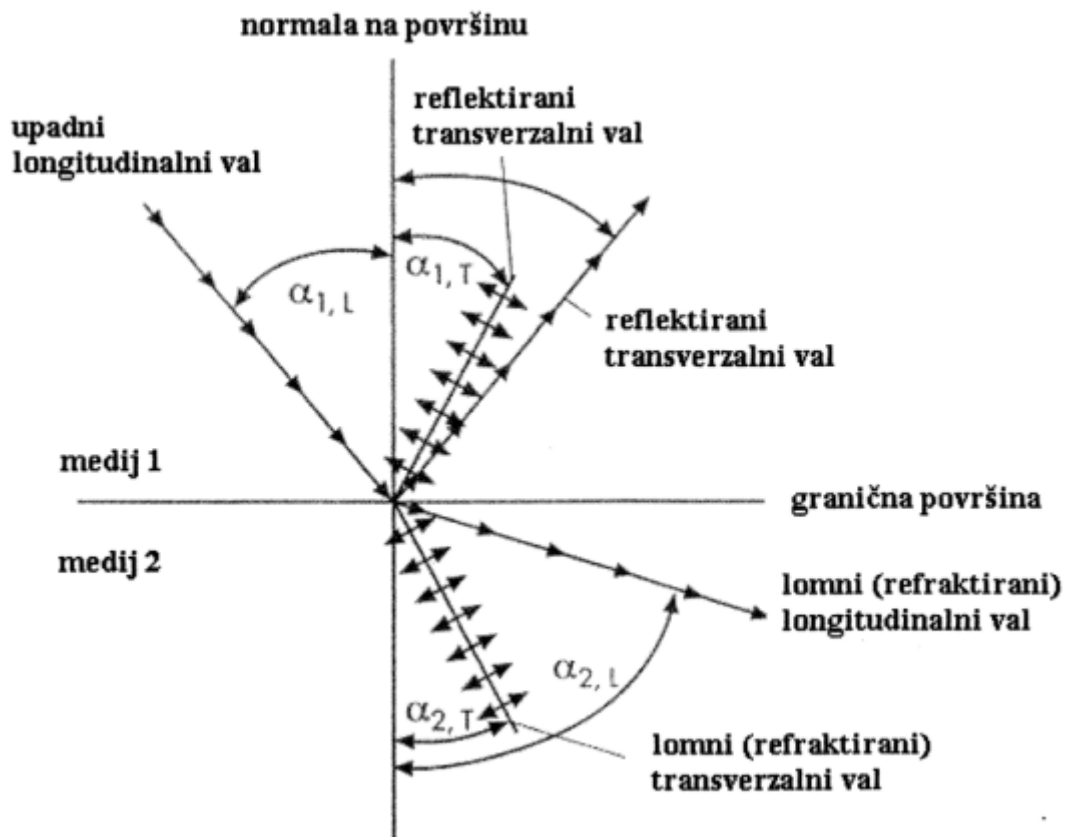
gdje su:

α, β – kutovi koje val zatvara s normalom na granicu sredstva

v_1, v_2 -brzina odgovarajućeg vala u sredstvu u kojem se širi [m/s]

Najopćenitiji slučaj loma i refleksije prikazan je na slici 23. U slučaju kada su oba sredstva kruta, upadni val dolaskom na granicu sredstva dio energije prenosi u refleksiju, a dio u transmisiju, s time da se u refleksiji i lomu mogu očekivati komponente vala, i to longitudinalna i transverzalna komponenta. [1]

Budući da je Snellovim zakonom smjer reflektiranog i lomljenog vala određen brzinom vala u sredstvu, jasno je da će komponente longitudinalnog i transverznog vala biti uvijek u relaciji u skladu s odnosom brzina. Transverzalni val će se reflektirati i lomiti pod otprilike pola manjim kutom od longitudinalnog vala jer je brzina transverznog vala približno polovici vrijednosti brzine longitudinalnog vala u istom sredstvu. [1]



Slika 23. Lom i refleksija UZ- valova na granici loma [9]

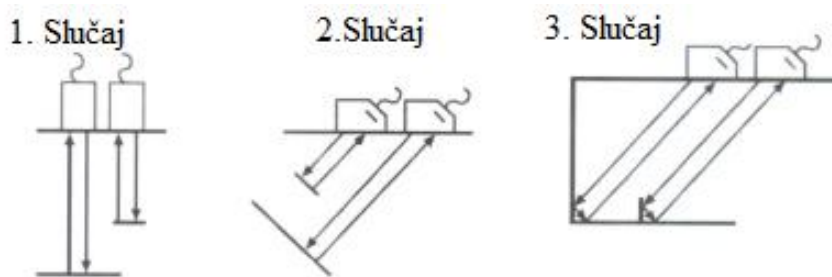
3.2.4.3. Refleksija i nastajanje signala odjeka sa reflektora

Ultrazvučno ispitivanje izvodi se uglavnom primjenom impulsne metode odjeka. Ovom metodom se ultrazvučni snop (ili dio snopa) na svom putu kroz materijal reflektira s granice sredstva ili s pogreške i registrira pretvaračem.

Moguća su tri slučaja refleksije ultrazvučnog snopa do pretvarača:

- ultrazvučni snop pada okomito na granicu sredstva, paralelnu u odnosu na ispitnu
- ultrazvučni snop pod kutom, pada okomito na granicu sredstva (pod kutom u odnosu na ispitnu)
- ultrazvučni snop pada pod kutom od 45° na rub predmeta pravokutnog oblika. Reflektiraju se paralelni valovi istog tipa, pod istim kutom u obratnom smjeru.

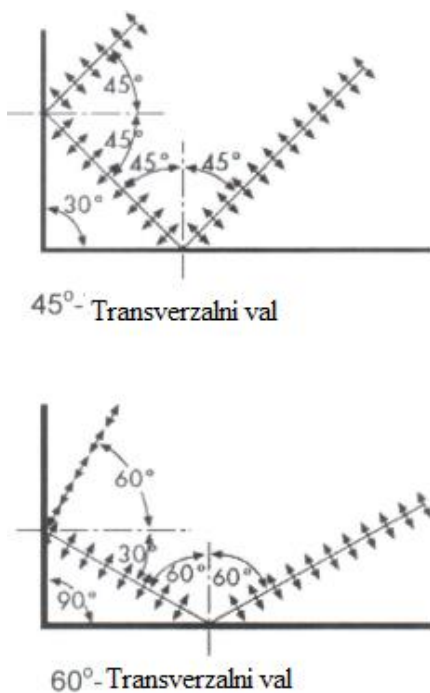
U sva tri slučaja prikazi na ekranu rezultat su refleksija od zadnjeg zida ispitnog predmeta, ili od ruba pravokutnog oblika. Slični su prikazu koji nastaje pri odbijanju valova od velikih pogrešaka u materijalu ili površinske greške na suprotnoj površini. Razlika se primjećuje očitavanjem signala na ekranu, utvrđivanjem projekcije indikacije od izlazne točke ispitne sonde i oblikom amplitude reflektiranog signala. [9]



Slika 24. Refleksija pri ultrazvučnom ispitivanju [9]

Reflektori koji nisu orijentirani normalno u odnosu na smjer prostiranja ultrazvučnog snopa, ili površina odbijanja nije pravokutne geometrije, reflektiraju ultrazvučni val, ali slabije.

Poseban slučaj nastaje kad transverzalni val ulazi pod kutom od 60° na pravokutni rub ispitnog predmeta. Transverzalni ultrazvučni val se u cjelini transformira u longitudinalni, pri čemu dolazi do promjene brzine i kuta refleksije. Takav reflektirani longitudinalni val se ne vraća u pretvarač. (slika 25.)



Slika 25. Refleksija vala kod pravokutne geometrije ruba [9]

4. Ultrazvučna oprema

S obzirom na širinu područja koju pokriva, ultrazvučna oprema vrlo je različita. Ovisno o području primjene razlikuje se oprema za:

- Otkrivanje pogrešaka
- Mjerenje fizikalnih svojstava materijala
- Mjerenje dimenzija

Prije svake kontrole, odnosno ispitivanje potrebno je odabrati adekvatan ultrazvučni sustav koji omogućava otkrivanje kritičnih pogrešaka, zahtijevane točnosti.

Ultrazvučni sustav čine:

- ultrazvučni uređaj
- ultrazvučne sonde
- etaloni
- kontaktno sredstvo
- druga pomoćna oprema

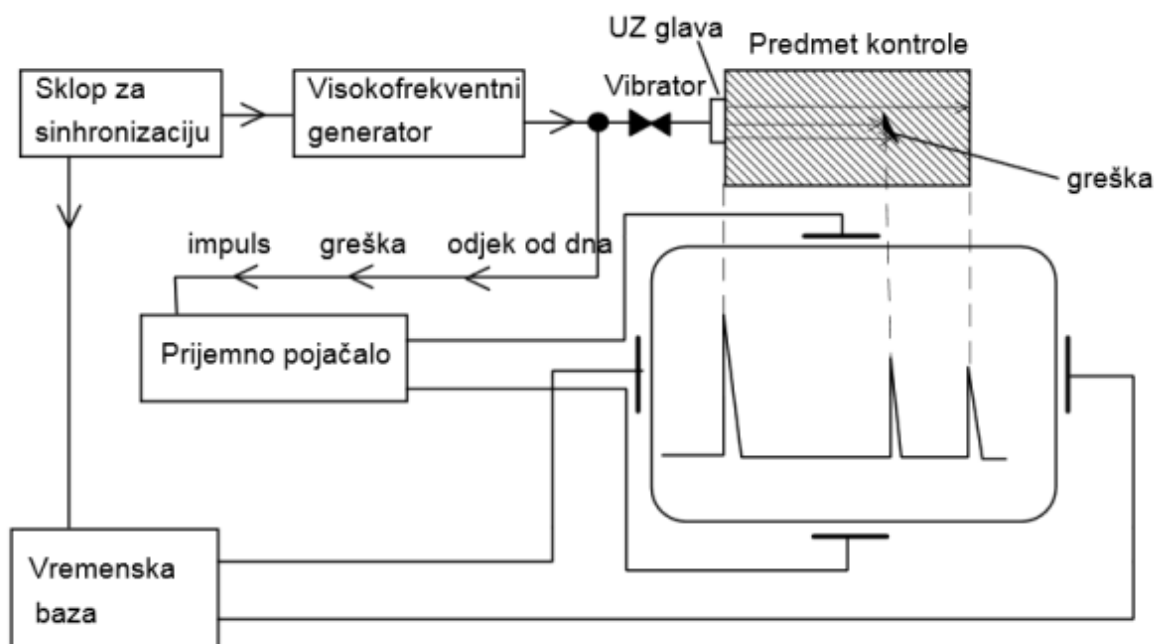
4.1. Ultrazvučni uređaj

Zadatak ultrazvučnog uređaja je pobuđivanje sonde električnim impulsima te primanje elektroničkih impulsa iz sonde i na izlazu prikaz međudjelovanja ultrazvuka i objekta ispitivanja.

Osnovni dijelovi ultrazvučnog uređaja mogu se podijeliti u dvije skupine:

1. skup elektronskih sklopova koji omogućuju napajanje, generiranje električnih impulsa, pojačavanje, sinhronizaciju i druge funkcije, koje osiguravaju korištenje opreme na razini zahtjeva [1]
2. elektronski sklopovi izlaznih jedinica, čiji je zadatak da rezultate odašiljanja i prijema zvuka prikaže korisniku u prikladnom obliku za interpretaciju [1]

Na slici 26. prikazan je shematski prikaz uređaja za ultrazvučnu kontrolu.



Slika 26. Shematski prikaz uređaja za ultrazvučnu kontrolu [1]

4.2. Nastajanje i prijem ultrazvučnih valova

Stvaranje, odašiljanje i prijem ultrazvučnih valova odvija se preko pretvarača, elementa sonde koji ima svojstvo piezoelektričnosti. Zadatak pretvarača je pretvaranje električne energije u ultrazvučnu i obratno. Dovođenjem napona na nasuprotne plohe pločice pretvarača, zbog piezoelektričnog efekta, pločica se deformira po debljini. Istosmjerni napon izaziva „skupljanje“ i „širenje“ pločice pretvarača ovisno o polaritetu, a izmjenični napon izaziva titranje u skladu s naponom pobuđivanja. [1]

Vrlo kratak električni impuls pobuđuje piezokristal, generira longitudinalni val i istitrava vlastitom frekvencijom, zavisnom od debljine pločice piezokristala:

$$\lambda = 2 \cdot d \quad (4.1)$$

λ – valna duljina [mm]

d – debljina piezokristala [mm]

Frekvencija vibracija određuje se prema:

$$f_K = \frac{v}{2 \cdot d} \quad (4.2)$$

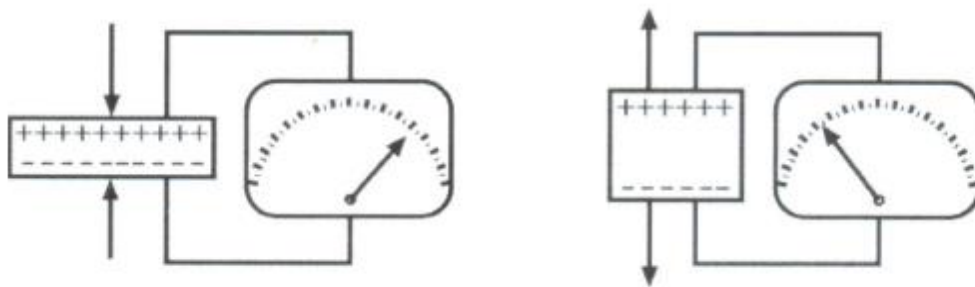
f_K – karakteristična frekvencija pretvarača [Mhz]

v – brzina ultrazvuka u materiju piezokristala [km/s]

d – debljina piezokristala [mm]

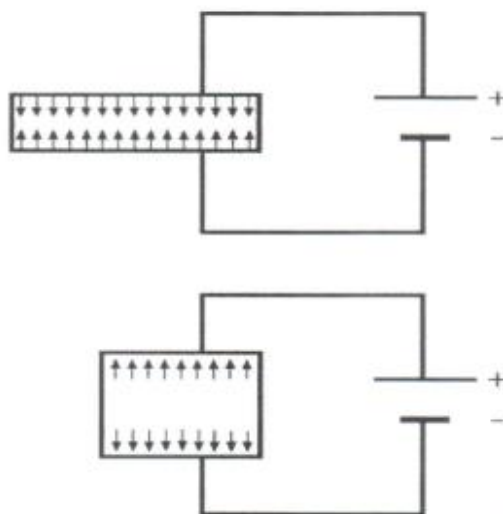
Na taj način piezoelektrični materijal i debljina pretvarača određuju frekvenciju ultrazvučnih titraja. Što je manja debljina pločice pretvarača, to je veća frekvencija ultrazvuka.

Postoje dva tipa piezoelektričnog efekta. Određeni kristali (npr. kvarc), posjeduju svojstvo da pod djelovanjem sile u određenom pravcu u odnosu na kristalnu strukturu, generiraju električni napon koji je djelomično linearno zavisian od sile. Ta pojava naziva se direktni piezoelektrični efekt (slika 27.) i koristi se za prijem ultrazvučnih valova.



Slika 27. Direktni piezoelektrični efekt [9]

Pri djelovanju vanjskog električnog polja na piezoelektrični materijal dolazi do njegove deformacije a ta pojava naziva se obrnuti (inverzni) piezoelektrični efekt (slika 28.).

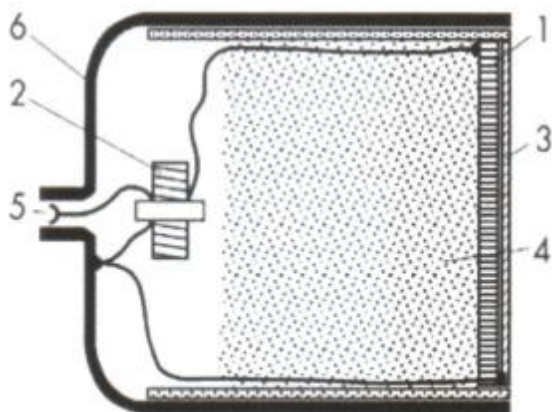


Slika 28. Obrnuti piezoelektrični efekt [9]

4.3. Vrste sondi

4.3.1. Ravna sonda

Pretvarač, pričvršćen uz blok za prigušenje, zavojnica za usklađivanje i odgovarajući priključak, ugrađeni su u zajedničko kućište. Na slici. 22 prikazano je načelno rješenje konstrukcije ravne sonde sa osnovnim dijelovima. Ovakav tip konstrukcije naziva se ravna ultrazvučna sonda, jer odašilje i prima ultrazvučne valove okomito u odnosu na svoju izlaznu plohu. Kut izlaza valova za ravnu sondu je 0° . Generalno, ravna sonda emitira longitudinalne valove. Piezoelektrična pločica koja odašilje i prima ultrazvučne valove relativno je tanka i krta. Za vrijeme relativno dugog istitravanja dolazi do pojave mrtve zone, odnosno pločica ne može primiti povratni signal. Kako bi se omogućilo brže istitravanje na unutrašnjoj površini nalazi se blok za prigušenje. Ispod pločice, u cilju zaštite kristala od mehaničkih oštećenja nalazi se zaštitna folija.



1. Pretvarač
2. Zavojnica
3. zaštitna folija
4. blok za prigušenje
5. priključnica
6. kućište sonde

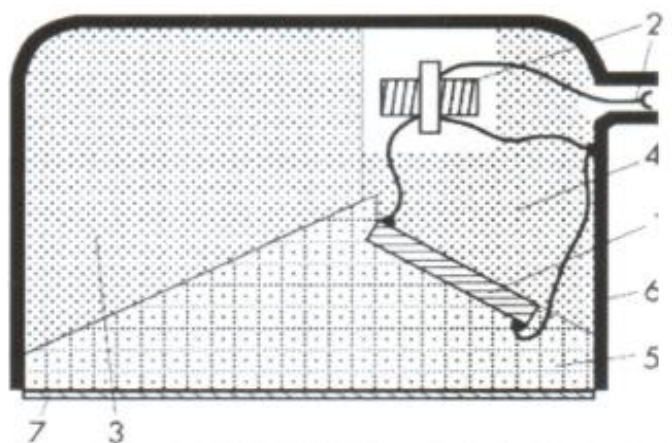
Slika 29. Konstrukcija ravne sonde [9]

4.3.2. Kutna sonda

Naziv sonde označava smjer odašiljanja i prijema ultrazvuka pod kutom prema normalni na plohu pretvarača. Najčešće se kutne sonde izrađuju s kutom ulaza ultrazvuka u etalonski čelik s kutom od 45° , 60° , 70° i 80° . [1]

Da bi se postigao prijenos ultrazvučnog vala u materijal pod kutom, pretvarač je postavljen pod određenim nagibom, zalijepljen za prizmu „pleksi-klina“ kroz koji se prostire upadni longitudinalni val. Upadni kut određen je kutom klina. Materijal za izradu bloka za usmjeravanje bira se tako da ima malu brzinu ultrazvuka. Tako se postiže, u skladu sa Snellovim zakonom

relativno mali ulazni kut ultrazvuka na granici sonda-materijal. Za ispitivanje čelika transverzalnim valovima kut zakošenja prizme mora biti između donjeg i gornjeg graničnog kuta, čime se eliminiraju longitudinalni valovi i omogućuje kontrola nad jedinom transverzalnom komponentom. Blok za prigušenje kod konstrukcije kutnih sondi ima i funkciju zaštite pretvarača od prijema nepoželjnih signala koji dolaze sa zadnje strane sonde. Pored elemenata koji se koriste pri konstrukciji ravne sonde, kod kutne sonde koristi se spomenuti pleksi klin i nema zaštitne folije. Na slici 23. prikazana je načelno rješenje konstrukcije kutne sonde sa njenim osnovnim dijelovima. [9]

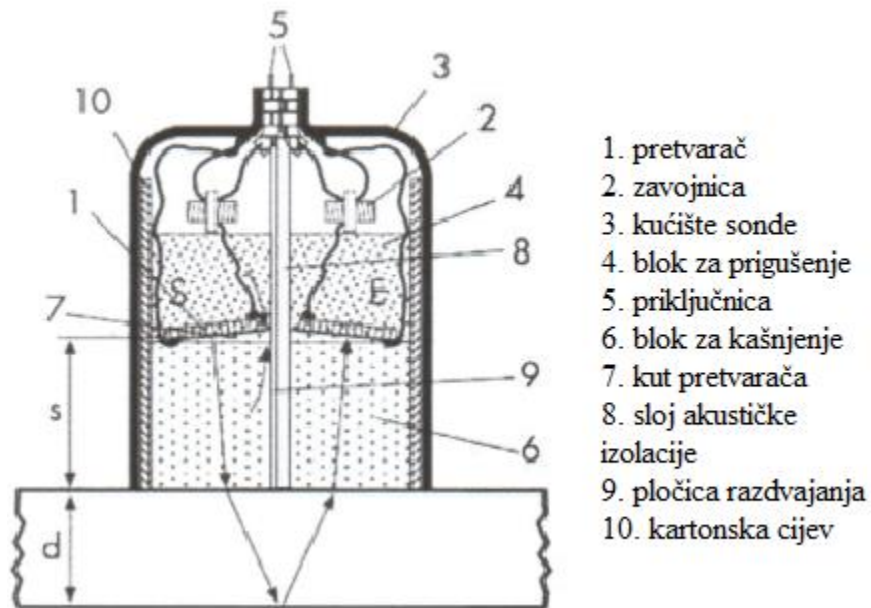


Slika 30. Konstrukcija kutne sonde [9]

1. pretvarač
2. zavojnica i priključnica
3. blok masa za prigušenje
4. blok za prigušenje
5. pleksi klin
6. kućište sonde
7. rubna zaštita

4.3.3. Dvostruke sonde

Kod ravnih i kutnih sondi pretvarač ima dvostruku funkciju, istodobno obnaša ulogu predajnika i prijamnika ultrazvučnih valova. Amplituda odaslanog impulsa veća je od amplituda reflektiranih. Pretvarač u periodu istitravanja ne može registrirati eventualno reflektirani signal, iako je ultrazvučni val prešao određeni put. Udaljenost koju prođe ultrazvučni val za vrijeme istitravanja naziva se mrtva zona. U toj zoni eventualno mogući reflektori neće biti registrirani jer će pozicija njegove amplitude na ekranu biti u "sjeni" početnog signala. Ograničenje mrtve zone nadilazi se upotrebom tzv. Dvostrukih sondi. Dvostruku sondu zapravo čine dvije ravne sonde, međusobno akustički i električki izolirane u istom kućištu (slika 31.). Pretvarači, odašiljač (1) i prijemnik (2) spojeni su sa prizmama od pleksiglasa (6). Ovakvom konstrukcijom postiže se kratka mrtva zona, jer je vrijeme prolaza ultrazvučnog snopa kroz debljinu pleksi klina duže od vremena istitravanja odašiljačkog pretvarača. Na taj način omogućena je detekcija pogrešaka na malim dubinama. [9]

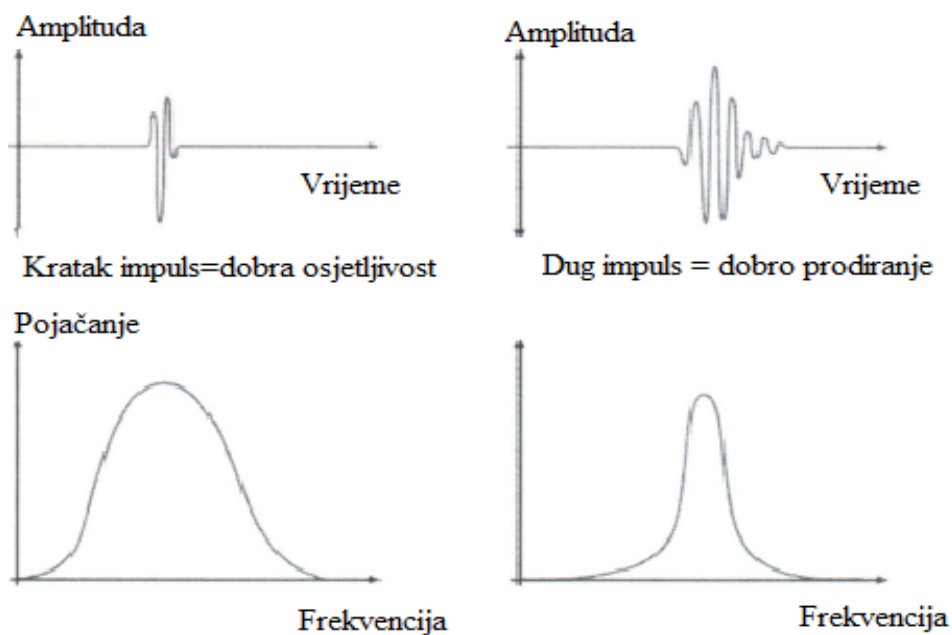


Slika 31. Dvostruka sonda [9]

4.3.4. Karakteristike sonde

4.3.4.1. Duljina impulsa

Važna karakteristika pretvarača je duljina impulsa koja se odašilje u ispitni materijal (slika 32.). Duljina impulsa zavisi od prigušenja i karakteristične frekvencije pretvarača. Duljina impulsa se na ekranu primjećuje u vidu širine signala. Uži signali daju veću osjetljivost ispitivanja, odnosno mogućnost uočavanja signala dvaju, po svom zvučnom putu bliska reflektora. Pretvarači koji rade na višoj frekvenciji imaju veće prigušenje i osjetljiviji su, odnosno imaju veću mogućnost detekcije manjih reflektora. [9]



Slika 32. Utjecaj frekvencije i prigušenja na duljinu impulsa [9]

Ako je prigušenje slabije i ako se radi sa nižom frekvencijom duljina impulsa je veća, pa je i energija impulsa u proizvodu i sposobnost prodiranja ultrazvuka u ispitni materijal veća. Sa relativno manjim pojačanjem na ekranu se prikazuju signali visokih amplituda. Osjetljivost i sposobnost prodiranja su dva svojstva koja su međusobno „suprotstavljena“. Optimalan izbor pretvarača bitan je element pri definiraju ultrazvučnog sustava. [9]

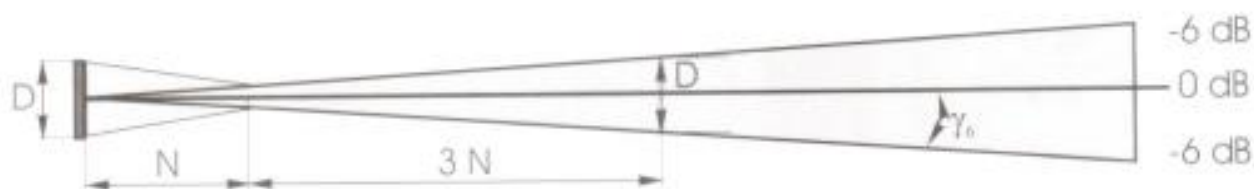
4.3.4.2. Ultrazvučno polje sonde

Odašiljačka ploha pretvarača sonde ne titra jednoliko pod utjecajem nametnutog električnog pobuđivanja, već vrlo složeno. U svrhu tumačenja ovih pojava može se pretpostaviti da se pretvarač sastoji od mozaika sitnih elementarnih pretvarača. Svaki takav elementarni pretvarač sastoji se od mozaika sitnih elementarnih ultrazvučnih valova, koji se šire u prostor oko izvora. Titranje tih elementarnih pretvarača djeluje u bilo kojoj točki prostora s razmacima u fazi. [1]

Rezultat ukupne interferencije, kada se uzmu u obzir svi elementarni valovi iz svake točke pretvarača, je pojava niza minimuma, maksimuma i različitih vrijednosti intenziteta u prostoru ispred sonde. [1]

U području neposredno do izvora ultrazvuka započinje formiranje snopa. Interferentno polje izvora koje ima svoj maksimum u osi izvora na udaljenosti “N“ naziva se blisko polje (slika 33.). U tom “nestabilnom“ polju detekcija reflektora je nepouzdana, kao i procjena veličine na

osnovu visine amplitude. U ovom području zvučni tlak, a time i visina reflektiranog signala od reflektora određene veličine, varira i nije sukladan eksponencijalnom opadanju amplitude u odnosu na udaljenost reflektora od izvora. Udaljenost “N” predstavlja fokus pretvarača i u toj točki posjeduje najveću osjetljivost. Nakon bliskog polja ultrazvučni snop se širi konusno. Ovo područje snopa naziva se daleko polje i karakteriziraju je izjednačene fazne razlike. Zbog konusnog oblika snopa, sa udaljavanjem od izvora, površina poprečnog presjeka snopa raste, pa se povećanjem udaljenosti energija raspoređuje na sve veći broj titrajućih čestica pa dolazi do smanjenja zvučnog tlaka. Zvučni tlak je maksimalan na osi snopa, a postepeno se smanjuje udaljavanjem od središnje osi. Kut između središnje osi i granice snopa naziva se divergencija snopa. [9]



Slika 33. Karakterističan oblik presjeka ultrazvučnog snopa ravne sonde [1]

Parametri ultrazvučnog snopa za pretvarače kružnog oblika izračunavaju se formulom:

$$N = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4 \cdot v} \quad (4.3)$$

$$\sin \gamma_{-50\%} = 0,5 \cdot \frac{v}{D_{ef}^2 \cdot f} \quad (4.4)$$

N – blisko polje ili Fresnelova zona

γ - kut divergencije

D_{ef} – efektivni promjer pretvarača [mm]

v – brzina ultrazvuka [m/s]

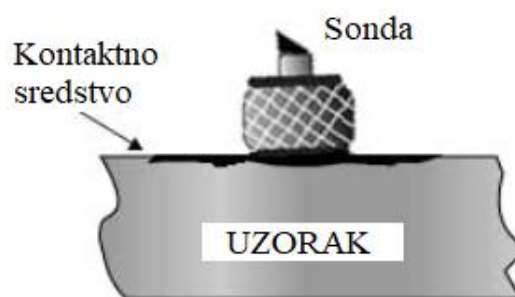
f – frekvencija [Hz]

Etaloni se koriste za više namjena, a najčešće su za pripremu sustava za ispitivanje [1]:

- provjeru linearnosti sustava
- određivanje izlazne točke sonde
- provjeru i utvrđivanje kuta sonde
- baždarenje i podešavanje sustava
- provjeru mrtve zone
- provjeru i praćenje osjetljivosti sustava
- odnosa signal/šum
- provjeru razlučivanja

4.5. Kontaktno sredstvo

Kontaktno sredstvo (slika 35.) je najčešće tekućina koja olakšava transmisiju ultrazvučne energije iz pretvarača u objekt koji se ispituje. Kontaktno sredstvo je u većini slučajeva neizbježno jer je akustična impedancija između krutih tvari i zraka prevelika. Što znači da bi se gotovo sva ultrazvučna energija reflektirala natrag u sondu i vrlo malo prenijelo u ispitni objekt u slučaju da se kontaktno sredstvo ne koristi. Kao kontaktna sredstva koriste se ulja, glicerini ili voda.



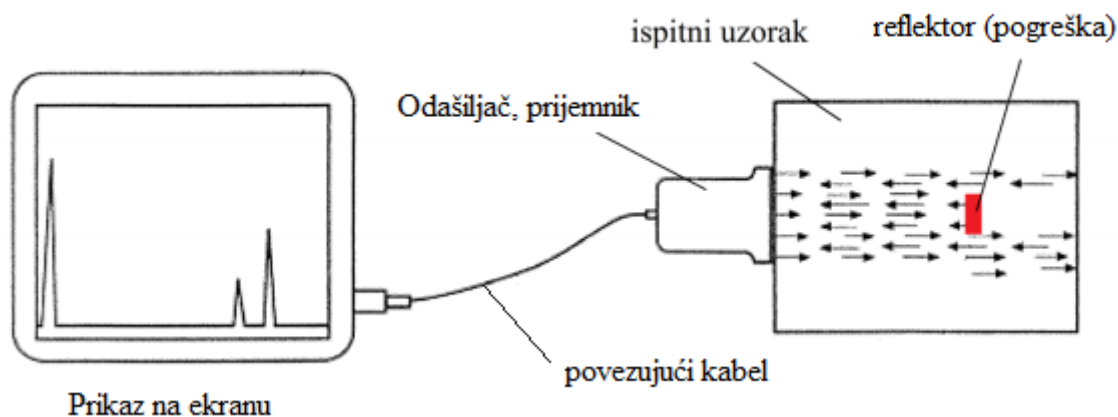
Slika 35. Kontaktno sredstvo [9]

Radi izuzetno široke primjene ultrazvučne kontrole, što zbog velike prilagodljivosti, osjetljivosti te pouzdanosti, razvijen je velik broj tehnika unutar svake metode. No, svaka tehnika bazirana je na jednoj od sljedeće tri metode:

- metoda odjeka
- metoda prozvučivanja
- metoda rezonancije

4.6. Metoda odjeka

Najkorištenija metoda u industrijskoj ultrazvučnoj defektoskopiji. Koristi se jedna sonda, koja može biti ravna, kutna ili dvostruka, koja istovremeno ima funkciju odašiljača i prijemnika. Mjerenjem vremena koje je potrebno ultrazvuku da prođe udaljenost do reflektora i natrag, uz poznavanje brzine prostiranja ultrazvuka u ispitnom materijalu, određuje se udaljenost detektiranog reflektora od pretvarača (slika 36.). Za kontaktnu tehniku koriste se frekvencije ispitnih sondi u rasponu od 1 MHz do 10 MHz. Prednosti metode odjeka u odnosu na ostale je pristup ispitnom predmetu samo s jedne strane, mogućnost mjerenja udaljenosti do reflektora, te mogućnost procjene presjeka i veličine reflektora odnosno pogreške. Nedostatak ove metode je "mrtva zona". [9]

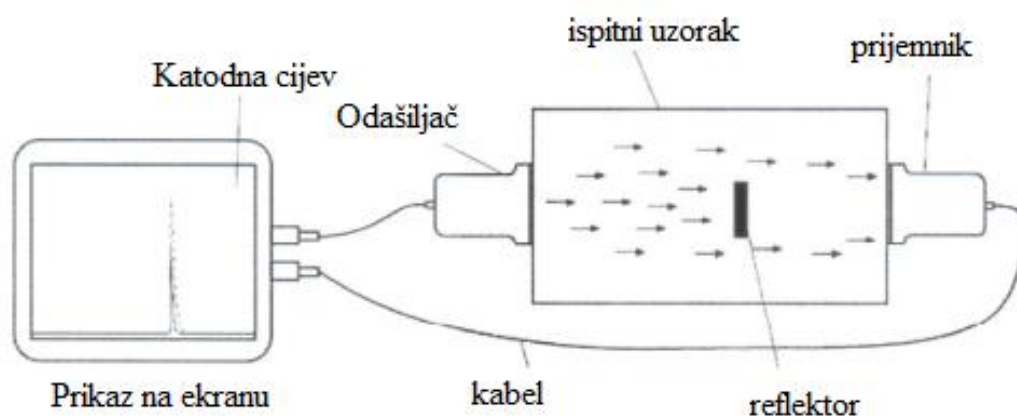


Slika 36. Metoda odjeka [9]

4.7. Metoda prozvučivanja

Metoda prozvučivanja zasniva se na radu sa dvije ispitne sonde. Sonda koja obavlja ulogu odašiljača ultrazvučnih valova kroz materijal, postavlja se sa jedne strane ispitnog uzorka, a s druge strane sonda koja ima ulogu prijemnika. Nakon određenog vremena, potrebnog da ultrazvučni val prođe udaljenost, (debljinu ispitnog uzorka) prijemna sonda registrira dospjeli signal odgovarajućeg ultrazvučnog tlaka. U slučaju homogenosti, intenzitet dospjele energije bit će jednak odaslanoj. Kada se na putu ultrazvučnog snopa pojavi prepreka koja onemogućuje prijelaz čitavog ultrazvučnog snopa, prijemnik će prihvatiti preostali dio snopa, odnosno signal će imati nižu vrijednost. Što je veća ta prepreka odnosno reflektor, amplituda signala je manja. Prisutnost pogreške i njene veličine određuje se prema stupnju smanjenja amplitude prijemnog signala, odnosno, intenzitetu pristigle energije registrirane prijemnom sondom (slika 37.). U konačnici, ako je prepreka u ispitnom uzorku veća od širine snopa, do prijemne sonde ne dolazi nikakav signal. [9]

Ova metoda primjenjuje se pri ispitivanju slabo propusnih materijala gdje se zbog strukturnog prigušenja druge metode ne mogu primijeniti.



Slika 37. Metoda prozvučivanja [9]

Nedostaci metode prozvučivanja [8] :

- potreban je omogućeni pristup sa obje strane ispitnog predmeta
- rad sa dvije ispitne sonde
- promjena amplitude nije uvijek dokaz za postojanje pogreške
- nemogućnost određivanja dubine greške i nepouzdana procjena veličine reflektora

4.8. Metoda rezonancije

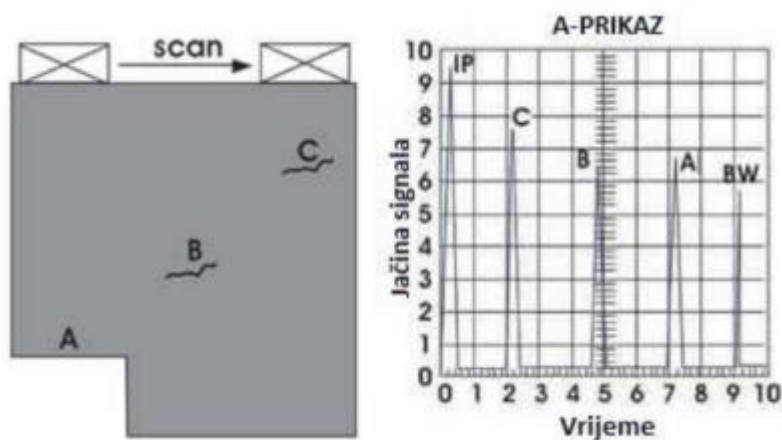
Kada se u ispitnom uzorku, planparalelnih stranica, promijeni frekvencija titraja odašiljačke sonde, tada kod frekvencije, kod koje je valna duljina jednaka dvostrukoj debljini ispitnog uzorka dolazi do pojave rezonancije. Generatorom se pobuđuje vibrator do pojave rezonancije zbog čega se naglo povećava energija potrebna za pogon vibratora. Indikator potrošnje te energije (ampermetar) registrira pojavu stojećih valova. Skala za regulaciju frekvencije napajanja kalibrirana je direktno u jedinicama debljine uzorka. Metoda se koristi za izrazito precizno mjerenje debljine, tankih limova i folija. [9]

5. Način prikaza primljenog signala

Ultrazvučni valovi mogu se u obliku signala prikazati na mnoštvo različitih načina. Troje najčešće korištenih prikaza su: A - prikaz, B – prikaz i C – prikaz. Moderni ultrazvučni sustavi imaju mogućnost istovremenog prikaza u sva tri oblika.

5.1. A – prikaz

A-Prikaz (slika 38.) količinu primljene ultrazvučne energije prikazuje kao funkciju vremena. Duž vertikalne osi prikazana je jačina primljenog signala, dok je vrijeme prikazano na horizontalnoj osi. Većina ultrazvučnih uređaja sa A-prikazima omogućuju prikaz signala u stvarnoj frekvenciji, a veličina reflektora odnosno pogreške može se procijeniti uspoređivanjem amplitude signala poznatog i nepoznatog reflektora.



Slika 38. A-prikaz [14]

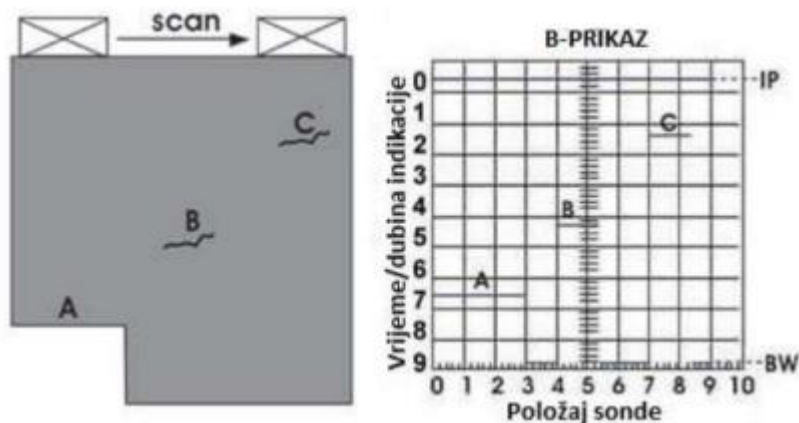
Na slici 38. s lijeve strane prikazana je ilustracija uzorka koji sadrži zadnju plohu označenu sa A i dvije pogreške (pukotine) označene sa B i C. IP oznaka predstavlja signal od prednje plohe uzorka i na zaslonu se nalazi tik do vertikalne osi jer je vrijeme odaziva približno jednako nuli. Pomicanjem sonde duž uzorka s lijeva prema desno, četiri ostala signala pojavljuju se na zaslonu u različito vrijeme. Kada je sonda na krajnjem lijevom položaju, na zaslonu će biti prikazani samo signali IP i A. Kako se sonda pomiče prema desno, a između oznaka A i B nema pogrešaka,

ultrazvučni se val odbija od stražnje plohe uzorka (BW) i prikazan je kao zadnji signal na horizontalnoj osi jer je ultrazvučni val prošao najveću udaljenost. Kada je sonda iznad pogreške B, signal se B se prikazuje na vremenskoj osi otprilike između signala IP i BW. Budući da IP signal odgovara prednjoj plohi uzorka, to ukazuje da je pogreška B na polovici između prednje i stražnje površine uzorka. Signal C prikazan je odmah nakon IP signala pošto je ultrazvučni val morao proći najmanju udaljenost do pogreške C.

5.2. B – prikaz

B-prikaz je slikovni, dvodimenzionalni prikaz. Na vertikalnoj osi pridruženo je vrijeme prolaska ultrazvučnih impulsa, dok je na horizontalnoj osi prikazano linearno gibanje sonde. Takav prikaz zapravo daje poprečni presjek ispitivanog uzorka koji omogućuje očitavanje dubine, položaja i približne dimenzije indikacije duž osi ispitivanja.

Problem kod ovakvog prikaza javlja se kada imamo veću indikaciju bliže plohi koja onda zasjeni neku pogrešku koja se nalazi dublje u materijalu.



Slika 39. B-prikaz[14]

5.3. C-prikaz

C-prikaz predstavlja pogled uzorka odozgo, odnosno tlocrt ispitivanog dijela uzorka. Slika nastaje mehaničkim ili elektroničkim skeniranjem u x-y ravnini. Osi „x“ i „y“ tvore koordinatni sustav koji označava položaj sonde i diskontinuiteta. Bojom ili intenzitetom sive skale predočena je dubina diskontinuiteta. [14]



Slika 40. C-prikaz [14]

6. Priprema ultrazvučnog sustava za ispitivanje

6.1. Izbor ispitnog sustava

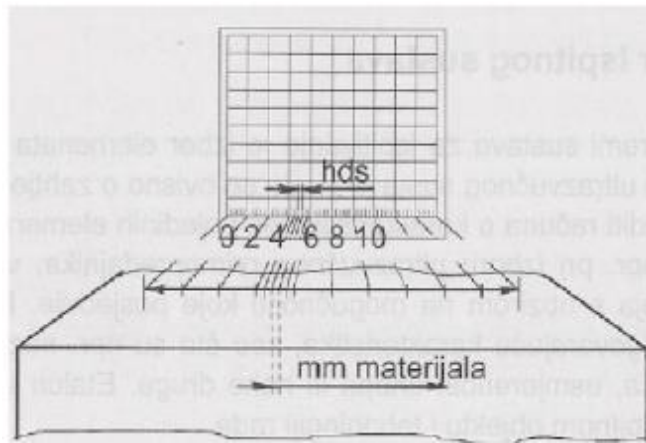
Najprije se kod izbora ispitnog sustava moraju odabrati elementi samog sustava. Zavisno o kriterijima ispitivanja odabiru se osnovni elementi ultrazvučnog sustava. Istodobno treba uzeti u obzir karakteristike pojedinih elemenata, ali i sustava u cjelini. Tako primjerice pri odabiru ultrazvučnog primopredajnika, važno je procijeniti uporabljivost uređaja s obzirom na prednosti i mane koje posjeduje. Pri odabiru sonde treba uzeti u obzir odgovarajuće karakteristike, kao što su primjerice nazivna frekvencija, veličina pretvarača, usmjerenje snopa itd. Etalon i referentni blok važno je prilagoditi ispitnom objektu i tehnologiji rada.[1]

Odabirom sustava se iznimno utječe na konačne rezultate kontrole i općenito bilo kojeg izvedenog mjerenja ili ispitivanja. Zato ovoj predradnji u tehnologiji kontrole treba dati posebnu pažnju. Velik je broj parametara koji se moraju kontrolirati da bi se osigurao traženi stupanj kvalitete. Zbog toga raste potreba za automatizacijom i mehanizacijom u izvođenju kontrole, tj. primjene automatiziranih sustava i računalom podržane kontrole. [1]

Najbolji pokazatelj dobrog pouzdanog sustava jest ponovljivost rezultata, neovisno tko ih i kada ponavlja. Pripremanje sustava, naknadna mjerenja i kontrole u cjelini treba izvoditi na način da se osigura mogućnost postizanja ponovljivosti rezultata. [1]

6.2. Umjeravanje

Umjeravanje mjernog područja nužan je preduvjet za definiranje položaja diskontinuiteta u volumenu ispitnog objekta. Umjeravanje ili baždarenje je postupak pri kojem se na primopredajniku ostvaruje linearno pridruživanje dimenzija ispitivanog objekta horizontalnoj skali zaslona, kao što to prikazuje slika 41. Horizontalni dijelovi skale kotirani su na slici kraticom „hds“.



Slika 41. Shematski prikaz pridruživanja umjeravanjem [1]

Umjeravanje vrijedi dok se u ispitnom sustavu ne promjene osnovni elementi sustava. Dođe li do bilo kakve promjene nekog elementa, pa makar s elementom jednakih nazivnih vrijednosti, umjeravanje je potrebno ponoviti. [1]

Važno je napomenuti, da će umjeravanje sustava biti toliko uspješno, koliko je dobro izveden odabir etalona za umjeravanje. Bitno je pri tome da brzina kojom se šire ultrazvučni valovi u ispitnom materijalu, bude jednaka brzini ultrazvučnih valova u etalonu. Ponekad nije moguće postići tu jednakost pa je umjeravanje potrebno provesti na samom ispitnom objektu. [1]

7. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio ultrazvučne kontrole provodio se u tvrtki Q.A.T. (Quality Assurance Team) na zavarenoj ploči (slika 42.) koja je zavarena u svrhu atestacije zavarivača. Ploča je debljine 20 mm i sastoji od dva različita materijala koji su zavareni sučeonim zavarom sa potpunom penetracijom MAG postupkom. Jedan od materijala je niskougljični čelik oznake S355J2+N a drugi materijal je austenitni nehrđajući čelik s niskim udjelom ugljika čija je oznaka 1.4307. Pošto je jedan dio ploče nehrđajući čelik, zavarivanje je trebalo biti obavljeno MIG postupkom, tj. inertnim plinom (inoxline). Međutim, došlo je do zabune i kao zaštitni plin korišten je CO₂. Upravo zbog toga javlja se mogućnost pojave pogrešaka u zavarenom spoju pa se ova zavarena ploča činila kao dobar primjer za eksperiment.



Slika 42. Predmet ispitivanja

Ispitivanje je provedeno pod vodstvom osobe osposobljene na razini 2. stupnja (EN ISO 9712 UT Level 2) za ispitivanje ultrazvukom. Unutar ovlasti definirane uvjerenjem osoba 2. stupnja može biti ovlaštena za sljedeće aktivnosti:

- Odabir tehnike nerazornog ispitivanja za određenu metodu ispitivanja
- Definiranje ograničenja primjene odabrane metode
- Provođenje KBR norme
- Ispitivanje i nadzor ispitivanja
- Interpretacija i procjena rezultata u skladu s potrebnim normama

- Provođenje i nadzor svih djelatnosti 1. stupnja
- Organizacija i izvještaj o rezultatima ispitivanja [1]

7.1. Oprema za ispitivanje

Kako bi rezultati ispitivanja bili što uspješniji, potrebno je odabrati odgovarajuću opremu za ultrazvučnu kontrolu, a u ovom slučaju ona se sastoji od:

- Ultrazvučnog uređaja KRAUTKRAMER GE USM 35XS
- Kutna sonda od 60° oznake (JKG117)
- Kutna sonda od 70° oznake (JK120)
- Dvostruka sonda od 45° oznake JHE373
- etalona V2, nehrđajući čelik
- etalona V2, niskouglični čelik
- referentni uzorak NO.4.
- kontaktno sredstvo

7.1.1. Ultrazvučni uređaj KRAUTKRAMER GE USM 35XS



Slika 43. Ultrazvučni uređaj GE 35XS

Karakteristike:

- zaslon u boji, odabir A-prikaz
- brzina ultrazvuka:m/s
- linearni i kutni način skeniranja

7.1.2. Kutna sonda A4P8x9A60 oznake JKG117

Izbor kuta pod kojim će se ultrazvučni valovi ulaziti u osnovni materijal, a potom izravno ili nakon refleksije od dna u zavar, ne utječe na ispitivanje korijena zavarenog spoja u tolikoj mjeri, koliko utječe na mogućnost ispitivanja zavarenog spoja u cjelini. [1]

Prvi uvjet za izbor kuta sonde od standardno postojećih kutnih sondi (45°,60°,70°,80°) je izbor takvog kuta sonde, koji će omogućiti ispitivanje zavarenog spoja sa što je moguće kraće udaljenosti.[1]

Drugi uvjet je da se osigura dobar kontakt sonde, što znači da sonda mora nalijegati na kontaktnu plohu. Ovo može spriječiti nadvišenje zavora, kada se sonda približi zavaru.[1]

Za prvo skeniranje korištena je kutna sonda od 60° tvrtke Doppler. Neke od karakteristika sonde su:

Tablica 4. Osnovni podaci sonde JKG117

Osnovni podaci sonde JKG117	
Dimenzije pretvarača	8x9 mm
Materijal pretvarača	piezoelektrična keramika
Dimenzije sonde	27x16.5x22 mm
Masa sonde	27 g
Raspon radne temperature	-20-60°C



Slika 44. Kutna sonda JKG117

Tablica 5. Tehnički podaci sonde JKG117

Tehnički podaci sonde JKG117			
	Referenca	Min	Max
Trajanje signala	1056.00 ns	500.00 ns	1500.00 ns
Frekvencija	4.04 Mhz	3.60 Mhz	4.40 Mhz
Kut snopa	60.50°	58.00°	62.00°
Izlazna točka	13.00 mm	12.00 mm	14.00 mm
Fokus sonde	28.00 mm	22.00 mm	34.00 mm

7.1.3. Kutna sonda A4P8x9A70 oznake JKG120

Drugo skeniranje vršeno je kutnom sondom od 70° proizvođača Doppler. Njezine karakteristike prikazane su u sljedećim tablicama.

Tablica 6. Osnovni podaci sonde JKG120

Osnovni podaci sonde JKG120	
Dimenzije pretvarača	8x9 mm
Materijal pretvarača	piezoelektrična keramika
Dimenzije sonde	27x16x21.6 mm
Masa sonde	28 g
Raspon radne temperature	-20-60°C



Slika 45. Kutna sonda JKG120

Tablica 7. Tehnički podaci sonde JKG120

Tehnički podaci sonde JKG120			
	Referenca	Min	Max
Trajanje signala	1038.00 ns	500.00 ns	1500.00 ns
Frekvencija	4.04 Mhz	3.60 Mhz	4.40 Mhz
Kut snopa	70.20°	68.00°	72.00°
Izlazna točka	12.80 mm	11.00 mm	13.00 mm
Fokus sonde	28.00 mm	22.00 mm	34.00 mm

7.1.4. Dvostruka sonda DA4P8x14LA45FS25 oznake JHE373

Zadnje skeniranje vršeno je dvostrukom sondom Doppler od 45°. U nastavku slijede njezine karakteristike.

Tablica 8. Osnovni podaci sonde JHE373

Osnovni podaci sonde JHE373	
Dimenzije pretvarača	8x14 mm
Materijal pretvarača	Kompozitni materijal
Dimenzije sonde	25x25x30 mm
Masa sonde	54 g
Raspon radne temperature	-10-60°C

Tablica 9. Tehnički podaci sonde JHE373

Tehnički podaci sonde JHE373	
	Referenca
Trajanje signala	1014.00 ns
Frekvencija	4.04 Mhz
Kut snopa	46.30°
Izlazna točka	11.50 mm
Fokus sonde	27.90 mm



Slika 46. Dvostruka sonda JHE373

7.1.5. Etaloni V2

Pošto brzina ultrazvučnih valova u materijalu ispitivanja i kalibracijskom etalonu mora biti ista, a ispitujemo dva različita materijala, za kalibraciju koristimo dva etalona V2 (slika 47.) različitih materijala.



Slika 47. Etaloni V2

7.1.6. Kontaktno sredstvo

Za kontaktno sredstvo korišteni je COUPLANT FYp proizvođača Elite. Kontaktno sredstvo omogućuje prijenos ultrazvučne energije iz pretvarača u materijal ispitivanja uz što manje gubitke. Kontaktne sredstva moraju biti takvog sastava da nakon uklanjanja s površine ispitnog objekta ne ostavljaju mrlje, te da ne uzrokuju koroziju.



Slika 48. Kontaktno sredstvo

Za provjeru je korišten referentni blok izrađen od S355J2+N i 1.4307.



Slika 49. Referentni uzorak No.4.

7.1.7. Ostala oprema

Kabeli za dvostruku sondu i kutne sonde tvrtke Doppler prikazani su na slici 50.



Slika 50. Kabeli za sonde

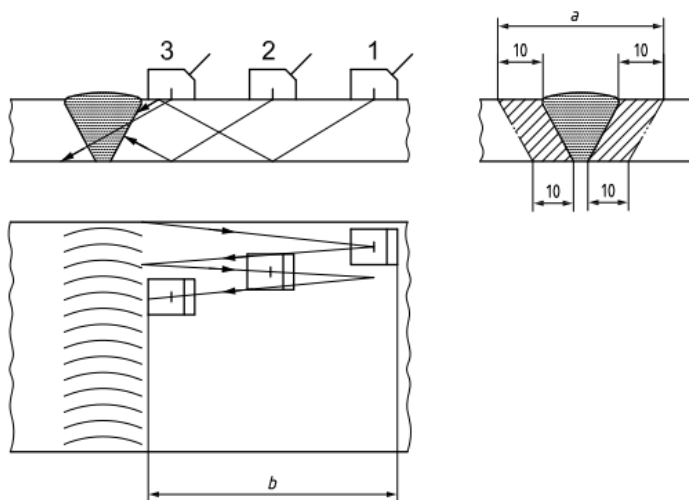
7.2. Plan aktivnosti:

- određivanje opsega ispitivanja, standard prihvatljivosti
- provođenje ispitivanja
- izvješće o rezultatima ispitivanja

7.3. Određivanje opsega ispitivanja i standarda prihvatljivosti

Ispitivanje je provedeno prema radnoj uputi QAT tvrtke koja je napisana u odnosu na EN ISO 17640 (ultrazvučno ispitivanje zavora). To je standard koji se koristi za debljine veće od 8 mm kod ručnog ultrazvučnog ispitivanja pri temperaturama od 0° do 60°C feritnih materijala (osnovni materijal + ZUT) i potpune zavarene presjeke zavora.

Opseg ispitivanja prema EN ISO 17640 je takav da ultrazvučni snop mora obuhvaćati širinu zavora s povećanjem od 10 mm ili za širinu zone utjecaja topline, a kutnu sondu je potrebno zakretati za 10° u obje strane. [16]



Slika 51. Opseg ispitivanja i način vođenja sonde prema EN ISO 17640 [16]

Prema radnoj uputi EN ISO 17640 podešavanje osjetljivosti izvedeno je po metodi 2 (udaljenost-pojačanje-dimenzija) tj. po AVG sistemu, dok je kao razina prihvatljivosti primijenjen stupanj prihvatljivosti 2 (Acceptance level 2) prema ISO 11666.

Izmjeriti veličinu pogreške uz pomoć AVG/DGS-dijagrama znači odrediti veličinu kružnog reflektora na unaprijed priređenom dijagramu, koji bi proizveo istu amplitudu signala odjeka s iste udaljenosti kao i mjerena pogreška, a na temelju ponuđenih vrijednosti u dijagramu. Promjer tako određenog referentnog reflektora je mjera površine reflektiranja i izražava se kao ekvivalentna veličina mjerene pogreške[1]

Mjerenje veličine pogreške pomoću AVG/DGS- dijagrama daje , dakle, mogućnost procjene ekvivalentne veličine pogreške, a ne stvarne veličine, o čemu uvijek treba voditi računa. [1]

Budući da je ekvivalentna veličina reflektora jasno definirani parametar, ona omogućuje da se osigura reproducibilnost rezultata kontrole i dobra je osnova za definiranje kriterija kvalitete. [1]

7.4. Provođenje ispitivanja

U nastavku slijedi opis provođenja ispitivanja gdje su korištene kratice:

hds horizontalni dijelovi skale

7.4.1. Ispitivanje kutnom sondom od 60° oznake JKG117

Prvo skeniranje vršeno je na objektu ispitivanja materijala S355J2+N, a pošto brzina ultrazvučni valova u ispitnom objektu i etalonu mora biti jednaka, za prvo baždarenje korišten je etalon V2 izrađen od niskougličnog čelika (slika 47.).

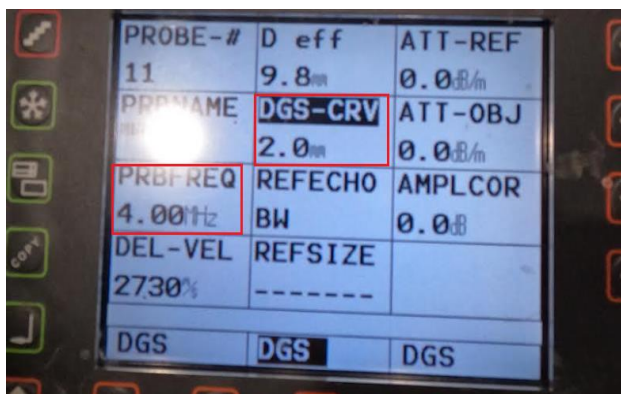
Najprije se u ultrazvučni uređaj unosi kut sonde od 60°, izlazna točka sonde uzeta iz kataloga iznosi $x=13$ mm (Tablica 5.) i brzina ultrazvuka transversalnih valova koja iznosi 3250 m/s. „Range“ odnosno mjerno područje podešava se na 125 mm. Nakon auto kalibracije na zaslonu uređaja pojavljuju se dva signala na 25 hds i 100 hds, baždarna osjetljivost iznosi 35.5 db, a brzina ultrazvučnih valova promijenila se s 3250 m/s na 3233 m/s i time je postupak baždarenja gotov. (slika 52.)



Slika 52. Pozicije signala na ultrazvučnom uređaju

Nakon kalibracije, potrebno je promijeniti način rada u AVG/DGS i ponovno unijeti poznate podatke, debljina 20 mm, kut sonde 60° i frekvenciju od 4 MHz i referentnu veličinu kružnog reflektora (pogreške) 2 mm. (slika 53.) Nakon postavljanja prvog signala kao referentnog, uređaj preko AVG krivulje pojačava signale. (slika 54.) Potrebno je uzeti u obzir još jedan bitan parametar a to je „transfer correction“ i pojačati osjetljivost za 2 dB zbog razlike hrapavosti površina između etalona V2 i objekta ispitivanja. Kako bi na ekranu bio vidljiv „half skip“ (područje od ulaza

ultrazvučnog snopa u osnovni materijal do dna) i „full skip“ (područje od refleksije ultrazvučnog snopa od dna do zavara) mjerno područje podešava se na 80 mm, jer se na udaljenosti većoj od 80 mm izrazito gubi na intenzitetu pa se eventualne indikacije ne mogu smatrati pouzdanima.

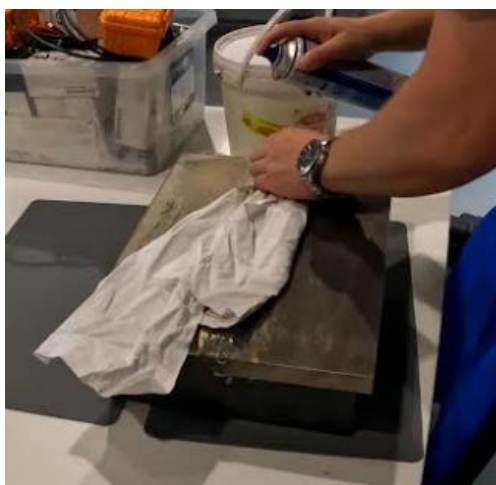


Slika 53. Pozicije signala na ultrazvučnom uređaju



Slika 54. AVG krivulje

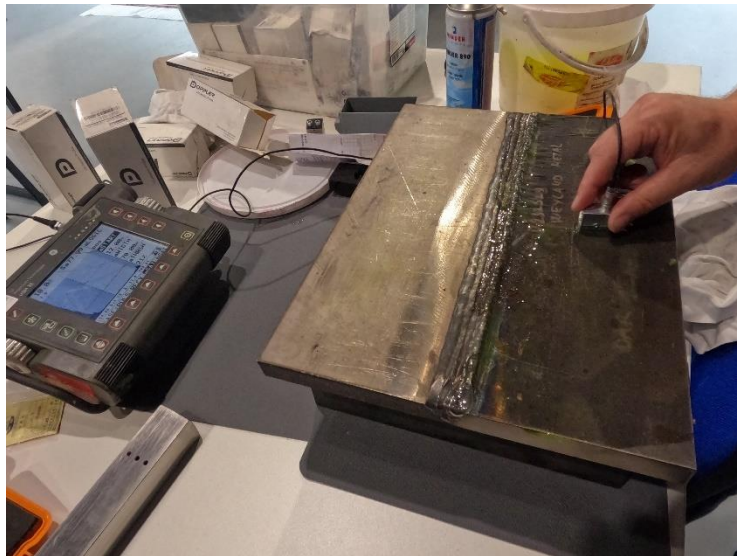
Prije samog ispitivanja potrebno je odstraniti nečistoće s površine po kojoj se vodi sonda. (slika 55.)



Slika 55. Čišćenje površine

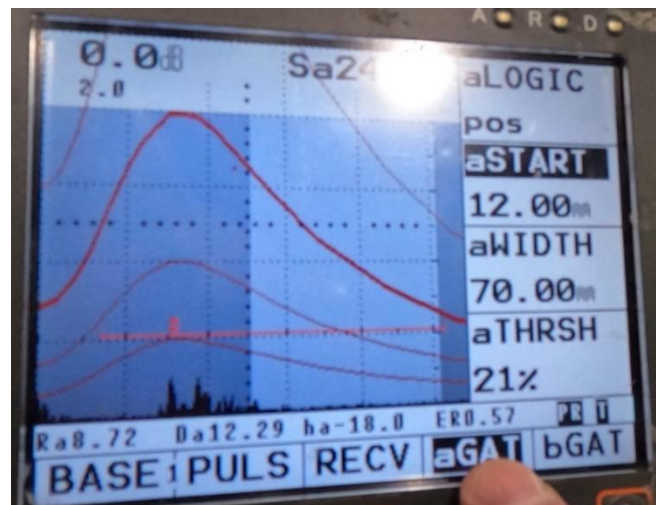
Kao što je prije spomenuto, baždarenje je vršeno „crnom“ na etalonu V2 stoga se prvo skeniranje zavara obavlja na objektu ispitivanja materijala S355J+N. (Slika 56.) Baždarnoj osjetljivosti dodaje se 10 dB kako bi se lakše zamijetile eventualne pogreške.

Promjena radne osjetljivosti u svrhu potvrde pravilne interpretacije može se koristiti, ali je pri tome važno da se nakon provjere uvijek osjetljivost vrati na zadanu vrijednost.



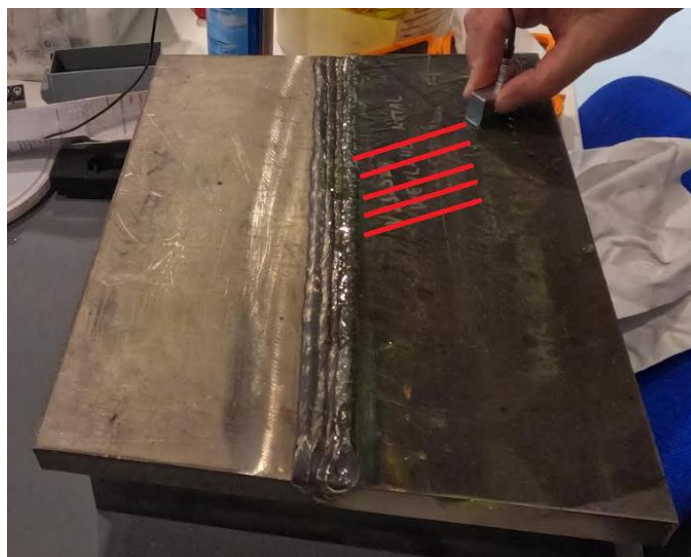
Slika 56. Skeniranje na strani materijala S355J+N sondom od 60°

Prilikom skeniranja na zaslonu se pojavljuje manji signal, približno na dubini od 12.29 mm, zvučnog puta 8.72 mm. Smanjenjem osjetljivosti na baždarenu osjetljivost zaključuje se da se radi o zanemarivoj indikaciji čija ekvivalentna veličina kružnog reflektora iznosi 0.57 mm.



Slika 57. Indikacija zanemarive veličine

Nakon završene kontrole korijena zavarenog spoja i tijela zavara slijedi otkrivanje poprečnih pukotina koje se nalaze u korijenu ili na strani lica zavarenog spoja. Kada zavareni spoj nema odstranjeno nadvišenje kao u ovom slučaju, skeniranje se provodi na način da se sonda zakrene pod nekim kutom u odnosu na središnju os zavara. (slika 58.)



Slika 58. Način vođenja sonde za poprečne pogreške

Skeniranjem po materijalu S355N+J sondom od 60° nisu pronađene pogreške u zavarenom spoju.

Po završetku svakog skeniranja, na referentnom uzorku provjerava se točnost sustava. (slika 59.)

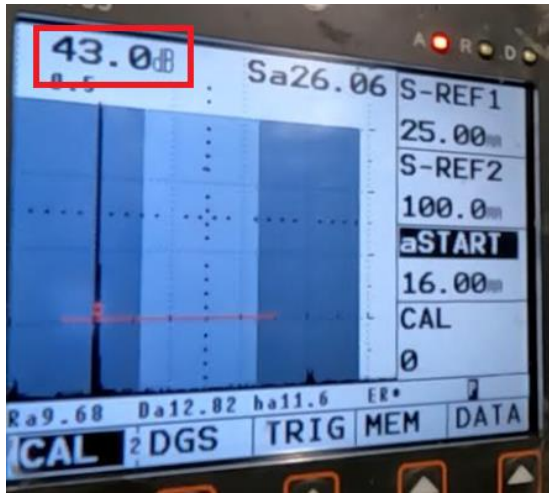


Slika 59. Provjera na referentom uzorku

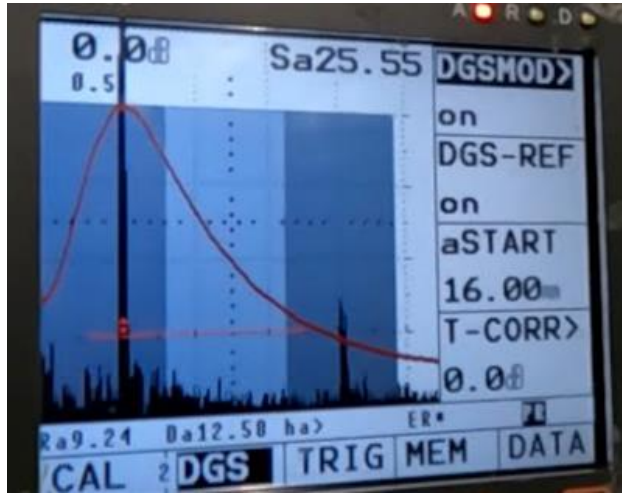
Drugo skeniranje vršeno je na materijalu 1.4307 odnosno na austenitnom nehrđajućem čeliku pa je za baždarenje korišten etalon V2 izrađen od također nehrđajućeg čelika (slika 47.)

Pošto se radi o istoj sondi, postupak baždarenja sustava jednak je kao i u prethodnom slučaju. Nakon auto kalibracije na zaslonu ultrazvučnog uređaja nalaze se dva signala, na 25 hds i 100 hds. Ovdje valja primijetiti da je baždarna osjetljivost u odnosu na prethodno baždarenje veća za 7.5 dB i iznosi 43 db. (slika 60.) Uzrok toga je veće prigušenje ultrazvučne energije u nehrđajućem

čeliku. Nakon baždarenja, prvi signal odabire se kao referenti i prema njemu uređaj postavlja AVG krivulju. (slika 61.)



Slika 60. Provjera na referentom uzorku



Slika 61. AVG krivulja

Ultrazvučni uređaj spreman je za ispitivanje i slijedi skeniranje po objektu materijala 1.4307 prema zavaru. (slika 62.).

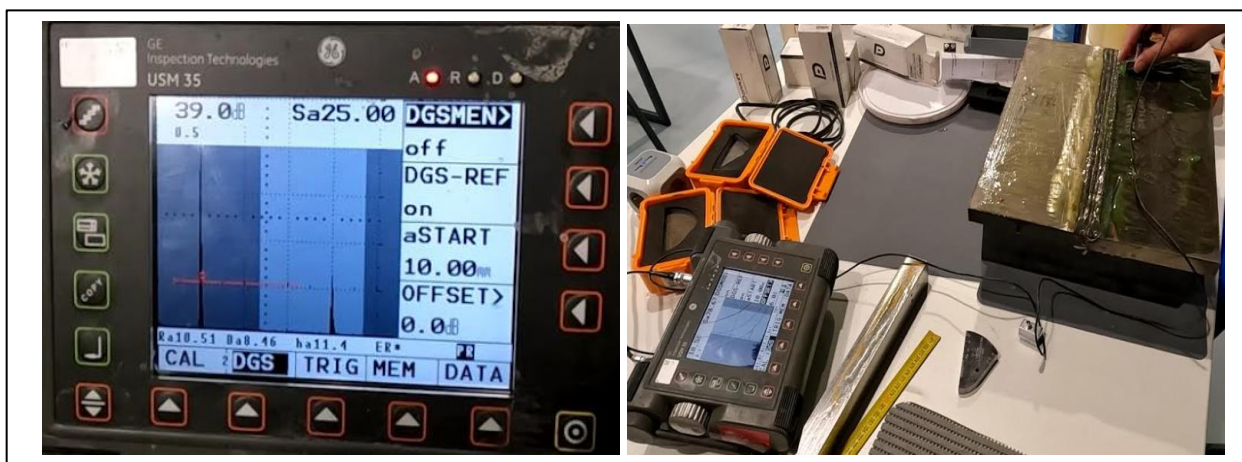


Slika 62. Skeniranje kutnom sondom od 60°

Provedenim skeniranjem nisu pronađene pogreške u zavarenom spoju.

7.4.2. Ispitivanje kutnom sondom od 70° oznake JKG120

Ispitivanje kutnom sondom od 70° obavljalo se također sa oba dvije strane zavara. Postupak baždarenja sustava je jednak kao i za prethodnu sondu. Dakle napravljena su dvojna baždarenja na etalonima V2. Baždarna osjetljivost u ovom slučaju je veća jer je ultrazvučni put zbog kuta sonde veći i iznosi 39 dB dok je za nehrđajući čelik zbog prigušenja još veća i iznosi 45.5 dB.



Slika 63. Baždarenje kutne sonde od 70° na ultrazvučni put na etalonu V2 (niskouglični čelik) i skeniranje zavara po materijalu S355J+N



Slika 64. Baždarenje kutne sonde od 70° na ultrazvučni put na etalonu V2 (nehrđajući čelik) i skeniranje zavara po materijalu 1.4307

Provedenim skeniranjem sondom od 70° nisu pronađene pogreške u zavarenom spoju.

7.4.3. Ispitivanje dvostrukom sondom od 45°

Nakon ispitivanja zavarenog spoja sondama koje su optimalne, s obzirom na prozvučivanje zavora u cjelini, ponekad je potrebno dodatno ispitivanje sondom različitog kuta. Ta dodatna ispitivanja provode se osobito u slučaju kada se ispitivanje provodi sondom od 70°, a debljina i vrsta materijala su takve da se u zoni skeniranja na udaljenosti većoj od polovine koraka gubi izrazito na intenzitetu i zbog smanjenog intenziteta dovodi u pitanje pouzdanost detekcije. [1]

Ova dodatna ispitivanja najčešće se provode u izravnom prozvučivanju, tj. ultrazvučni snop pada na zavar, ako je moguće, bez prethodne refleksije od dna lima. [1]

Osnovni razlog poteškoća u ispitivanju austenitnih materijala (1.4307) je anizotropija i grubozrnata struktura koja onemogućuje prolaz ultrazvuka kroz materijal, odnosno većina energije se rasprši pri prolazu. To prigušenje moguće je primijetiti na slikama 60. i 64. gdje su drugi signali jedva vidljivi. U takvim slučajevima za dodatno ispitivanje koristi se dvostruka sonda od 45° čija konstrukcija izvedena na taj način da simulira ravnu sondu, odnosno emitira longitudinalne valove (5920 m/s) što omogućuje bolje probijanje zvuka u materijal. Druga važna karakteristika ovakve konstrukcije sonde je i mogućnost ispitivanja pogrešaka neposredno ispod kontaktne plohe.

Zbog prije spomenutih razloga skeniranje dvostrukom sondom odvijalo se samo po objektu ispitivanja materijala 1.4307 (inox) pa je i baždarenje (slika 65.) vršeno na etalonu V2 koji je napravljen od nehrđajućeg čelika. Baždarna osjetljivost kako je vidljivo na oscilogramu (slika 65.) iznosi 31.5 dB.



Slika 65. Baždarenje dvostruke sonde

Skeniranjem sondom po materijalu 1.4307 na zaslonu se pojavljuje signal (slika 66.), no smanjenjem radne osjetljivosti s 43 dB na baždarenu osjetljivost 31.5 dB signal nestaje što je znak da se radi o malom diskontinuitetu koji ne karakteriziramo kao pogrešku.



Slika 66. Skeniranje dvostrukom sondom

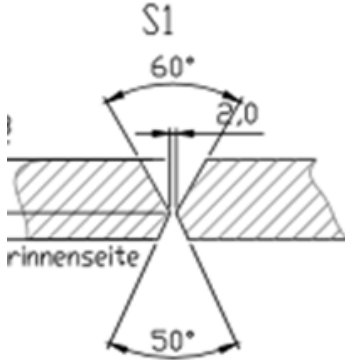
Skeniranjem dvostrukom sondom od 45°, u zavarenom spoju nisu pronađene indikacije koje bi se mogle okarakterizirati kao pogreške.

7.5. Izvješće o ispitivanju

U nastavku slijedi primjer ultrazvučnog izvješća prema provedenom ispitivanju.

Report / Test Report: QWPS_EVALD_01/2022

UT – kontrola / UT – inspection - REPORT

Naziv Component	Zavarivačka ploča No.1	Proj. / Narudžba br.	No. 1/ 2022
Nacrt br. Drawing No.	SKICA No. 1	Referenca: Reference	QAT_EVALD 01
I.D. br. Ident.No.	No.1	Tip. Type	QAT_ no. 1
Materijal Material	S355 J2+N + 1.4307	Količina Quantity	1 SET
Toplinska obrada Heat treatment	Nema None	Prije Before	Nakon After
Stanje površine Surface condition	Sirovo Rough	Strojno obrađeno Machined	Pjeskareno Shot blasted
Procedura/uputa Test specification / instruction	UT_PROCEDURE QAT	Standard prihvatljivosti Acceptance standard	EN ISO 17640 C EN ISO 11666 KLASA 2
Obim testiranja Scope of testing	100% FULL PENETRATED WELDING SEAMS 100% ZAVARENI SPOJ	Uređaj: Test device:	KRAUTKTAMER GE USM 35XS Nr. 7914a
Kontaktno sredstvo: Couplung	UT GEL	Kalibracija: Calibration:	V2 block, NO. 4
Zadovoljava/Prihvatljivo Within code	ACCEPTABLE	Ne-Zadovoljava Ne-Prihvatljivo Not within code	
<p>Opis: Remarks METHOD : DGS METHODE 2 ; ACCEPTANCE LEVEL 2; Probe: Kutna sonda A4P8X9A 60° JKG117 Kutna sonda A4P8X9A 70* JKG121 Dvostruka kutna sonda DA4P8X14LA45FS25 JHE</p> <p>SCAN + 6-18 dB (PREMA POTREBI – ACCORDING NEED)</p> 			

DEBLJINA OSNOVNOG MATERIJALA : 20 MM

Nadzor Supervisor	Stupanj II Level II	Ime / Potpis Name / Signature Ivan Haček			
	Inspektor Tested by	Level Level	Inspektor Tested by	Stufe Level	Ovjerava: Acceptance authority
Ime Name	Ivan Haček B75A06 20-UT2F 0617				
Potpis Signature					
Lokacija Test location	METALSKA JEZGRA ČAKOVEC		Datum Date	28.06.2022.	
Odjel Department	QC		Test plan – poz. Test-plan-pos.	INTERNO	

8. Zaključak

Ultrazvučna kontrola najraširenija je kontrola bez razaranja. Razlog tako visoke primjene metode je velika prilagodljivost, izrazito visoka osjetljivost te pouzdanost rezultata. U ovom završnom radu opisane su fizikalne osnove ultrazvučne dijagnostike, detaljno objašnjena oprema i metode ultrazvučne kontrole. Ultrazvučno ispitivanje omogućuje određivanje oblika i dimenzija koje se klasičnim metodama mjerenja ne mogu obuhvatiti, no uglavnom se koristi za određivanje odstupanja oblika od zadanih vrijednosti.

Najčešće se ultrazvučna kontrola primjenjuje u kontroli kvalitete zavarenih konstrukcija. Može se reći da je na zavarenim spojevima tehnologija ultrazvučne kontrole stekla mnoga iskustva te obogatila, razvila i unaprijedila tehnike ispitivanja. Upravo se i eksperimentalni dio završnog rada provodio na zavarenom spoju te se ultrazvučna kontrola pokazala kao brz i pouzdan postupak. Prilikom ispitivanja zavara i najmanji pomaci sonde uzrokovali su promjene amplituda signala na ekranu. Stoga je potrebno obratiti veliku pažnju prilikom očitavanja rezultata i zaključiti da li je neki signal lažna indikacija ili pak stvarna pogreška. Zbog toga je uz potrebno znanje još važnije iskustvo ispitivača.

Kao što je napomenuto u eksperimentalnom dijelu, ploča je trebala biti zavarena MIG postupkom. MIG/MAG zavarivanja su takvi postupci gdje zavarivačeva sposobnost direktno utječe na kvalitetu zavara, a posebice u ovom slučaju gdje je za zavarivanje korišten pogrešan zaštitni plin. No, ultrazvučnom kontrolom nisu pronađene nikakve indikacije koje bi se mogle okarakterizirati pogreškama pa možemo zaključiti da se radi oiskusnom zavarivaču.

9. Literatura

- [1] prof. dr. sc. Vjera Krstelj- Ultrazvučna kontrola, odabrana poglavlja, Zagreb 2003.
- [2] [https://www.gozetim.com/hr/muayene/tahribatsiz/gorsel-muayene-\(vt\)/](https://www.gozetim.com/hr/muayene/tahribatsiz/gorsel-muayene-(vt)/)
- [3] <https://www.zieh-fix.com/de/hawkeyetm-boreskope.html> boreskop
- [4] <https://www.ndt.net/ndtaz/content.php?id=621> Anand Asundi, 2002.
- [5] <https://www.tuv-nord.com/lv/en/services/testing/non-destructive-testing-of-materials-and-structures-ndt/magnetic-particle-testing-mt/>
- [6] <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/EddyCurrent/Introduction/IntroductiontoET.xhtml> Iowa State University
- [7] <https://www.manufacturingguide.com/en/radiographic-testing-rt>
- [8] Basic ispitivanje penetrenatima (PT) Dokument: BSC_B2_PT_SRB, SECTOR Cert
- [9] Basic ispitivanje ultrazvukom (UT) Dokument: BSC_B3_UT_SRB, SECTOR Cert
- [10] Filip Seidl, Ultrazvučno mjerenje debljine stijenke, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu 2015
- [11] <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a46bb23b-608e-45b5-b7f6-c952a83441fa/prisilno-i-priguseno-titriranje.html>
- [12] Matija Cejpek, Ultrazvučna kontrola, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, 2016.
- [13] <http://avstop.com/ac/apgeneral/ultrasonic.htm> rezonancija [12]
- [14] <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.xhtml>
- [15] Doc. Dr. Hodžić Damir, Kontrola kvaliteta u proizvodnom zavarivanju, Mašinski fakultet Sarajevo, 2015.
- [16] Podaci poduzeća QAT d. o. o.

Popis slika i tablica

Slika 1. Vizualna kontrola [2].....	4
Slika 2. Boreskop Hawkeye [3].....	5
Slika 3. Optička holografija [4].....	6
Slika 4. Ultrazvučna kontrola	8
5. Magnetska metoda.....	9
Slika 6. Metoda vrtložnih struja [6].....	11
Slika 7. Princip radiografskog ispitivanja [7].....	12
Slika 8. Primjer rendgenskog snimka zavora [7].....	13
Slika 9. Primjer penetrantske kontrole zavora vrata turbine.....	15
Slika 10. Ultrazvučno ispitivanje [10].....	17
Slika 11. Njihalo [11]	18
Slika 12. Prikaz neprigušenog titranja [11]	18
Slika 13. Graf prigušenog titranja [11].....	19
Slika 14. Prikaz titranja [9].....	19
Slika 15. Frekvenicja [9]	20
Slika 16. Spektar zvuka [9].....	21
Slika 17. Longitudinalni val [12].....	22
Slika 18. Transverzalni val [12]	22
Slika 19. Rayleighovi valovi [9].....	23
Slika 20. Primjer ispitivanja površinskim valovima [9]	23
Slika 21. Lambovi valovi [9].....	24
Slika 22. Raspodjela zvučnog tlaka na granici sredstva [9]	26
Slika 23. Lom i refleksija UZ- valova na granici loma [9].....	31
Slika 24. Refleksija pri ultrazvučnom ispitivanju [9].....	32

Slika 25. Refleksija vala kod pravokutne geometrije ruba [9]	32
Slika 26. Shematski prikaz uređaja za ultrazvučnu kontrolu [1]	34
Slika 27. Direktni piezoelektrični efekt [9]	35
Slika 28. Obrnuti piezoelektrični efekt [9]	35
Slika 29. Konstrukcija ravne sonde [9]	36
Slika 30. Konstrukcija kutne sonde [9]	37
Slika 31. Dvostruka sonda [9]	38
Slika 32. Utjecaj frekvencije i prigušenja na duljinu impulsa [9]	39
Slika 33. Karakterističan oblik presjeka ultrazvučnog snopa ravne sonde [1]	40
Slika 34. Etaloni a) V1, b) V2 i c) IOW	41
Slika 35. Kontaktno sredstvo [9]	42
Slika 36. Metoda odjeka [9]	43
Slika 37. Metoda prozvučivanja [9]	44
Slika 38. A-prikaz [14]	46
Slika 39. B-prikaz[14]	47
Slika 40. C-prikaz [14]	48
Slika 41. Shematski prikaz pridruživanja umjeravanjem [1]	50
Slika 42. Predmet ispitivanja	51
Slika 43. Ultrazvučni uređaj GE 35XS	52
Slika 44. Kutna sonda JKG117.....	53
Slika 45. Kutna sonda JKG120.....	54
Slika 46. Dvostruka sonda JHE373	55
Slika 47. Etaloni V2.....	56
Slika 48. Kontaktno sredstvo.....	56
Slika 49. Referentni uzorak No.4.	57

Slika 50. Kabeli za sonde	57
Slika 51. Opseg ispitivanja i način vođenja sonde prema EN ISO 17640 [16]	58
Slika 52. Pozicije signala na ultrazvučnom uređaju	59
Slika 53. Pozicije signala na ultrazvučnom uređaju i Slika 54. AVG krivulje	60
Slika 55. Čišćenje površine	60
Slika 56. Skeniranje na strani materijala S355J+N sondom od 60°	61
Slika 57. Indikacija zanemarive veličine	61
Slika 58. Način vođenja sonde za poprečne pogreške	62
Slika 59. Provjera na referentom uzorku	62
Slika 60. Provjera na referentom uzorku i Slika 61. AVG krivulja	63
Slika 62. Skeniranje kutnom sondom od 60°	63
Slika 63. Baždarenje kutne sonde od 70° na ultrazvučni put na etalonu V2 (niskouglični čelik) i skeniranje zavara po materijalu S355J+N	64
Slika 64. Baždarenje kutne sonde od 70° na ultrazvučni put na etalonu V2 (nehrđajući čelik) i skeniranje zavara po materijalu 1.4307	64
Slika 65. Baždarenje dvostruke sonde	65
Slika 66. Skeniranje dvostrukom sondom	66
Tablica 1. Brzina ultrazvuka [1]	25
Tablica 2. Akustične impedancije materijala	27
Tablica 3. Etaloni i pripadajuće norme	41
Tablica 4. Osnovni podaci sonde JKG117	53
Tablica 5. Tehnički podaci sonde JKG117	54
Tablica 6. Osnovni podaci sonde JKG120	54
Tablica 7. Tehnički podaci sonde JKG120	54
Tablica 8. Osnovni podaci sonde JHE373 i Tablica 9. Tehnički podaci sonde JHE373	55