

Ispitivanje limova metodom ultrazvuka

Ferenčić, Martin

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Polytechnic of Međimurje in Čakovec / Međimursko veleučilište u Čakovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:110:473800>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



Repository / Repozitorij:

[Polytechnic of Međimurje in Čakovec Repository -
Polytechnic of Međimurje Undergraduate and
Graduate Theses Repository](#)





MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU
STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ ODRŽIVI RAZVOJ

Martin Ferenčić, JMBAG: 0313021040

Ispitivanje limova metodom ultrazvuka

ZAVRŠNI RAD

Čakovec, rujan 2024.



MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU
STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ ODRŽIVI RAZVOJ

Martin Ferenčić, JMBAG: 0313021040

Ispitivanje limova metodom ultrazvuka

Testing of sheet metal using the ultrasound method

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

dr. sc. Mario Šercer, pred.

Čakovec, rujan 2024.



MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

PRIJAVA TEME I OBRANE ZAVRŠNOG/DIPLOMSKOG RADA

Stručni prijediplomski studij:

Računarstvo Održivi razvoj Menadžment turizma i sporta

Stručni diplomski studij Menadžment turizma i sporta:

Pristupnik: Martin Ferenčić, JMBAG: 0313021040
(ime i prezime)

Kolegij: Tehnologija materijalnih resursa
(na kojem se piše rad)

Mentor: dr. sc. Mario Šercer, n. v. pred.
(ime i prezime, zvanje)

Naslov rada: Ispitivanje limova metodom ultrazvuka

Naslov rada na engleskom jeziku: Testing of sheet metal using the ultrasound method

- Članovi povjerenstva: 1. dr. sc. Tomislav Hublin, v. pred., predsjednik
(ime i prezime, zvanje)
2. dr. sc. Tibor Rodiger, v. pred., član
(ime i prezime, zvanje)
3. dr. sc. Mario Šercer, n. v. pred., mentor
(ime i prezime, zvanje)
4. mag. iur. Magdalena Zeko, v. pred., zamjenski član
(ime i prezime, zvanje)

Broj zadatka: 2023-OR-21

Kratki opis zadatka: Navesti i pojasniti teorijske osnove na kojima počivaju metode bez razaranja, te predstaviti
opermu koja se koristi u ispitivanu primjenom metoda bez razaramnja. Na praktičnom primjeru prikazati i pojasniti metodu
ultrazvučnog ispitivanja kao jedne od metoda bez razaranja.

Datum: 20.9.2024.

Potpis mentora: 

Predgovor

Ultrazvučno ispitivanje jedna je od najvažnijih metoda nerazornog ispitivanja materijala u suvremenoj industriji. Posebno je značajno u kontroli kvalitete limova koji se široko primjenjuju u sektorima poput automobilske, zrakoplovne i brodograđevne. Ova metoda omogućuje otkrivanje unutarnjih nesavršenosti i defekata bez oštećenja materijala, što doprinosi sigurnosti i pouzdanosti krajnjih proizvoda.

Motivacija za izradu ovog diplomskog rada proizašla je iz potrebe za dubljim razumijevanjem procesa ultrazvučnog ispitivanja limova te optimizacijom postojećih tehnika. Cilj rada je analizirati faktore koji utječu na točnost i pouzdanost ispitivanja te predložiti poboljšanja koja bi mogla unaprijediti praksu u industriji.

Zahvaljujem svom mentoru, dr. sc. Mario Šercer pred. na stručnom vodstvu i podršci tijekom izrade ovog rada te tvrtki Horex d.o.o. na ustupanju materijala za izradu praktičnog dijela. Također zahvaljujem obitelji i prijateljima na njihovoj nesebičnoj podršci i razumijevanju.

Sažetak

Ispitivanje limova metodom ultrazvuka detaljno je istraženo teoretskim i tehničkim gledištima. U uvodu se opisuje nastanak zvučnoga vala i njegovo ponašanje na granici dvaju medija te osnovni principi ultrazvučne metode. Različite vrste opreme za ultrazvučno ispitivanje predstavljene su s posebnim fokusom na ultrazvučni uređaj. Diskutirane su različite vrste ultrazvučnih sonda: ravna, kutna i dvostruka sonda te njihove specifične karakteristike i primjene. Detaljno su opisane različite metode ispitivanja, uključujući metodu prozvučavanja, *puls-eho* metodu odjeka i metodu rezonancije te kako svaka od njih ima svoje prednosti i nedostatke koji utječu na izbor metode u zavisnosti od specifičnih zahtjeva ispitivanja. Naglašena je važnost pravilne pripreme za ultrazvučno ispitivanje kako bi se osigurala točnost i pouzdanost rezultata. Prikazano je kako se ultrazvučna kontrola može primijeniti i provesti u praksi. U praktičnom dijelu rada prezentirano je ispitivanje lima debljine 8 mm koristeći dvostruku sondu uređajem USM Go+, ističući važnost ultrazvučnoga ispitivanja kao pouzdane metode za ocjenjivanje kvalitete i integriteta limova. U radu je naglašeno kako je detaljno razumijevanje opreme, sondi i metodologija ispitivanja ključno za uspješnu primjenu ultrazvučnoga ispitivanja u industrijskom kontekstu.

Ključne riječi: *ultrazvuk, vrste sonda, princip rada, metode ispitivanja, USM Go+ uređaj*

Summary

The examination of sheets using the ultrasonic method is thoroughly explored through theoretical and technical aspects. The introduction describes the genesis of the sound wave and its behavior at the boundary of two mediums, as well as the basic principles of the ultrasonic method. Different types of equipment for ultrasonic testing are presented, with a particular focus on the ultrasonic device. Various types of ultrasonic probes are discussed: flat, angular, and double probe, along with their specific characteristics and applications. Various testing methods are detailed, including the through-transmission method, pulse-echo method, and resonance method, and how each has its advantages and disadvantages that influence the choice of method depending on the specific testing requirements. The importance of proper preparation for ultrasonic testing is emphasized to ensure accuracy and reliability of results. It is shown how ultrasonic control can be applied and conducted in practice. In the practical part of the work, the examination of 8mm thick sheets using a double probe with the USM Go+ device is presented, highlighting the importance of ultrasonic testing as a reliable method for assessing the quality and integrity of sheets. Throughout the work, it is emphasized how a detailed understanding of equipment, probes, and testing methodologies is crucial for the successful application of ultrasonic testing in an industrial context.

Keywords: *ultrasound, types of probes, principle of operation, test methods, USM Go+ device*

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. UVOD U METODU ULTRAZVUČNOG ISPITIVANJA	2
2.1. Ispitivanje ultrazvukom	3
2.2. Nastajanje zvučnog vala	5
2.3. Odbijanje i prelamanje ultrazvuka na granici dva medija	5
2.4. Refleksija i lom ultrazvučnih valova	6
2.5. Princip rada ultrazvučne metode	7
3. OPREMA ZA ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE	8
3.1. Ultrazvučni uređaj	9
3.2. Ultrazvučne sonde	10
3.2.1. Ravna sonda	11
3.2.2. Kutna sonda	13
3.2.3. Dvostruka sonda.....	14
4. METODE ISPITIVANJA	16
4.1. Metoda prozvučavanja	16
4.2. <i>Puls-eho</i> metoda odjeka	17
4.3. Metoda rezonancije	19
5. PRINCIP PRIPREME ULTRAZVUČNOGA ISPITIVANJA	20
6. PRIMJENA I PROVOĐENJE ULTRAZVUČNE KONTROLE	21
6.1. Ispitivanje limova i traka.....	21
6.2. Mjerenje debljine stjenke	21
6.3. Ispitivanje odljevaka	22
6.4. Ispitivanje cijevi	23
6.5. Ispitivanje zavara.....	24
7. PRAKTIČNI DIO	26
7.1. Uređaj	27
7.2. Sonda	28
7.3. Postavljanje i priprema	30
7.4. Mjerenje neoštećenog dijela lima	31
7.5. Prvo mjerenje oštećenoga dijela materijala	32

7.6. Drugo mjerenje oštećenoga dijela materijala	34
8. ZAKLJUČAK.....	37
Literatura	39
Popis tablica	40
Popis slika.....	40

1. UVOD

Ultrazvučna metoda emisija je zvučnih valova kroz materijal. Što je ultrazvuk? Zvuk koji nastaje iznad raspona ljudskog sluha, obično preko 20 kHz, materijalna je vibracija medija, čime je omogućen njegov prodor u materijal. Ultrazvuk ima kratke valne duljine i koristi se za otkrivanje nedostataka unutar materijala, na malim površinama. Ta vrsta testiranja može otkriti greške, tj. pukotine duljine 0,4 mm i širine 0,0001 mm na predmetima debljine 0,5 – 300 mm. Frekvencijski raspon koji se koristi u nerazornom ultrazvučnom ispitivanju kreće se od 100 kHz do 50 MHz. Ultrazvučne vibracije putuju u obliku valova, slično kao što putuje svjetlost. Međutim, za razliku od svjetlosnih valova, koji mogu putovati u vakuumu (praznom prostoru), ultrazvuk zahtijeva medij: krutinu ili tekućinu. Širenje ultrazvuka kroz materijal popraćeno je određenim raspršenjem, zbog čega dolazi do razlike između količine ulaznih i izlaznih ultrazvučnih valova, a to se prati na uređaju osciloskop. Ultrazvučne vibracije, koje proizvodi kvarcni oscilator, šalju na površinu predmeta koji se testira, prolaze kroz predmet ili se u prolazu pojavljuju određene anomalije, ako naiđu na iskre, mjehuriće plina ili uključke, vibracije će se reflektirati od njih i tako prijeđu kraću udaljenost nego što bi to bilo s homogenim materijalom. Posebnim uređajima mogu se registrirati reflektirani valovi i odrediti mjesto defekta u materijalu.

2. UVOD U METODU ULTRAZVUČNOG ISPITIVANJA

Ispitivanje ultrazvukom nerazorna je metoda koja se rabi u mnogim industrijama, uključujući strojarstvo, elektrotehniku i graditeljstvo. Ta se metoda oslanja na sposobnost ultrazvučnih valova da se usmjerenom prodiru u materijal i reflektiraju na granicama različitih akustičnih svojstava ili na greškama i nehomogenostima unutar materijala. Korištenjem te tehnike moguće je otkriti greške unutar materijala te odrediti njihovu veličinu, položaj i orijentaciju bez narušavanja integriteta ispitivanoga objekta.

Povijest ultrazvučnog ispitivanja počinje oko 1930. godine kada je sovjetski znanstvenik Sergei Y. Sokolov razvio teoriju o upotrebi ultrazvuka za detekciju nepravilnosti u metalima. Iako tadašnja tehnologija još nije bila dostupna, Sokolov je vjerovao da će se njezinom pomoći moći otkrivati nepravilnosti u materijalima poput metala. U narednim godinama mnogi su znanstvenici nastavili istraživanje te metode, često u tajnosti i neovisni jedni o drugima. Godine 1940. podnesen je prvi patentni zahtjev za uređaj koji se koristi ultrazvukom za otkrivanje nepravilnosti u materijalu, a patent je kasnije dodijeljen Floyd Firestoneu. [1]

Slika 1. Prikaz prvoga uređaja za ultrazvučnu kontrolu



Izvor: https://www.ob-ultrasound.net/ultrasonics_history.html (pristup: 16. 8. 2024.)

2.1. Ispitivanje ultrazvukom

Ultrazvučna kontrola kvalitete (UK) materijala rabi svojstvo ultrazvuka da se širi kroz ujednačene materijale i da se odbija na granici između materijala s različitim akustičkim karakteristikama ili od nehomogenosti unutar materijala. Ultrazvučni valovi šalju se iz izvora i prolaze kroz materijal koji se ispituje. Ako unutar materijala postoji defekt, ultrazvučni će se valovi, ovisno o vrsti i veličini defekta, oslabiti ili neće biti detektirani jer se mogu odbiti od defekta. [2]

Slika 2. Ispitivanje zavora ultrazvukom



Izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Ultrazvucna_kontrola_2006..JPG (pristup: 17. 8. 2024.)

Ultrazvuk je oblik mehaničkih valova čija frekvencija varira od 20 kHz do 10 GHz, dok se u ispitivanju materijala najčešće rabe frekvencije između 0,5 MHz i 10 MHz. Iako postoje različite metode ultrazvučnoga pregleda, u praksi su najraširenije *puls-eho* metoda i metoda sondiranja, pri čemu se rabe ravne i/ili kutne ultrazvučne sonde. Premda je ultrazvučna metoda posebno učinkovita za otkrivanje defekata poput pukotina (ravni ili planarni defekti), također se može koristiti za identifikaciju drugih vrsta grešaka, uključujući uključke troske, plinske mjehuriće i mjehuriće u nizu. [2]

Prednosti ove metode uključuju sljedeće: raspon debljina ispitivanoga objekta nije ograničen, kontrola se može provoditi s jedne strane objekta, metoda je sigurna i ne zahtijeva zaštitnu opremu, visoka je osjetljivost metode uz jednostavno otkrivanje pogrešaka te je metoda relativno otporna na promjene u okolišnim uvjetima poput temperature i vlage. [3]

Ultrazvuk je zvuk s frekvencijama višim od čujnoga zvuka. Dok ljudsko uho može čuti zvukove čija frekvencija ne prelazi 16 kHz, ultrazvuk uključuje mehaničke vibracije s frekvencijama većim od te granice. Zvuk se širi pravocrtno i može se reflektirati od prepreka. U području čujnoga zvuka razlikujemo sinusne titraje, koji stvaraju tonove, od onih koji nisu sinusni i čine šumove. [3]

Materija se sastoji od brojnih sitnih čestica koje su međusobno povezane silama kao da su povezane oprugama. Te čestice mogu se kretati u različitim smjerovima oko svojih početnih položaja. Kada se jedna čestica pomakne iz ravnoteže, počinje se kretati i prenosi energiju na susjedne čestice. Tako se energija prenosi kroz materiju putem tih čestica. Broj titraja čestica u određenom razdoblju određuje hoće li zvuk biti čujan ili nečujan. U prirodi postoje dva osnovna tipa valova: elektromagnetski valovi i zvučni (elastični) valovi. Glavna razlika između njih jest što elektromagnetski valovi ne zahtijevaju materijalni medij za širenje, dok zvučni valovi trebaju medij. Ljudsko uho može čuti zvučne valove u rasponu frekvencija od 16 Hz do 16.000 Hz, što je područje čujnoga zvuka. Ispod toga raspona (infrazvuk) nalaze se titraji koji se ponašaju prema istim fizikalnim zakonima kao čujni zvuk. [3]

Prema Vjeri Krstelj, ultrazvuk se definira kao zvuk s frekvencijama koje prelaze gornju granicu čujnog zvuka, tj. iznad 16 kHz, i može se protezati do frekvencija od 10^{10} Hz. Na frekvencijama iznad 10^{10} Hz nalaze se titraji povezani s toplinskim vibracijama molekula u čvrstim tijelima. Elastični valovi ponašaju se prema istim principima u svim područjima frekvencija, a razlika između njih ovisi o tome jesu li čujni ili nečujni. [4]

Kada se u elastičnoj sredini nalazi izvor titranja, ta titranja prenose susjedne čestice na specifičan način i u određenom pravcu. Mehanički valovi mogu biti longitudinalni ili transverzalni. Longitudinalni valovi nastaju kada se čestice pomiču u smjeru paralelnom s pravcem širenja vala. Brzina longitudinalnih valova u materijalu konstantna je i ovisi o vrsti materijala. [4]

Na primjer, brzina longitudinalnih valova otprilike je 5.900 m/s u čeliku, 1.480 m/s u vodi, 330 m/s u zraku i 6.300 m/s u aluminiju. [4]

Transverzalni valovi nastaju kada se čestice pomiču u smjeru koji je okomit na pravac propagacije vala. Brzina transverzalnih valova ovisi o materijalu i iznosi približno 3.230 m/s u čeliku, 0 m/s u vodi, 0 m/s u zraku i 3.130 m/s u aluminiju. U transverzalnim medijima valovi se šire s konstantnim razmakom ili duljinom vala. Za longitudinalne valove karakteristično je da čestice titraju u pravcu širenja vala, dok kod transverzalnih valova čestice titraju u smjeru okomitom na pravac propagacije vala. [4]

2.2. Nastajanje zvučnog vala

U ultrazvučnoj kontroli metalnih materijala najčešće se rabi piezoelektrični efekt, dok se za generiranje niskih frekvencija primjenjuje magnetostricijски efekt. Piezoelektrični efekt nastaje kada se kvarcna pločica stisne ili produži djelovanjem sile u određenom smjeru prema njezinoj kristalografskoj osi, što rezultira polarizacijom pločice i stvaranjem električnoga naboja na njezinoj površini. Predznak električnoga naboja ovisi o smjeru deformacije, dok njegova veličina zavisi od primijenjene sile. Suprotni fenomen nastaje kada kvarcna pločica promijeni svoje dimenzije (duljinu i širinu) pod utjecajem istosmjernoga električnog polja. Ako se umjesto istosmjerne struje primijeni izmjenična struja, kvarcna pločica vibrira u ritmu frekvencije izmjeničnoga polja. Ta pojava otkrivena je 1899. godine. [5]

2.3. Odbijanje i prelamanje ultrazvuka na granici dva medija

Na granici između dvaju medija dolazi do odbijanja i prelamanja ultrazvučnih impulsa. Bitno je razlikovati dva scenarija jer ultrazvučni valovi mogu ulaziti u ispitivani materijal pod pravim kutom ili pod kutom nagiba. Kada ultrazvučni snop ulazi u materijal pod pravim kutom, dolazi do djelomičnoga odbijanja valova na granici medija. Ako ultrazvučni val naiđe na grešku ili defekt unutar materijala, neće proći kroz taj defekt, već će se od njega odbiti. U slučaju manjih grešaka dio vala može proći kroz njih, dok se ostatak vala odbija. [6]

Kada ultrazvučni snop ulazi u materijal pod kutom, dolazi do transformacije vala na granici između dvaju medija.

U tom kontekstu mogu se javiti različite situacije: oba se vala mogu odbiti, jedan val se može odbiti dok se drugi prelama ili oba vala mogu prelamati. Pri ulazu snopa u materijal nastaju longitudinalni i transverzalni valovi koji se šire neovisno jedan o drugome. Način odbijanja i prelamanja valova

ovisi o kutu upada snopa i svojstvima materijala na granici. Promjenom ulaznoga kuta moguće je potpuno eliminirati longitudinalnu komponentu, čime se omogućava da se samo transverzalni val širi kroz materijal. Ta tehnika primjenjuje se u izradi kutnih vibratora, gdje se između vibratora i ispitivanoga materijala postavlja klin od elastičnoga materijala pod određenim kutom. Na taj način longitudinalni val odbija se natrag u vibrator, dok transverzalni val ulazi u materijal pod specifičnim kutom. Ispitivanjima je utvrđeno da pod kutom:

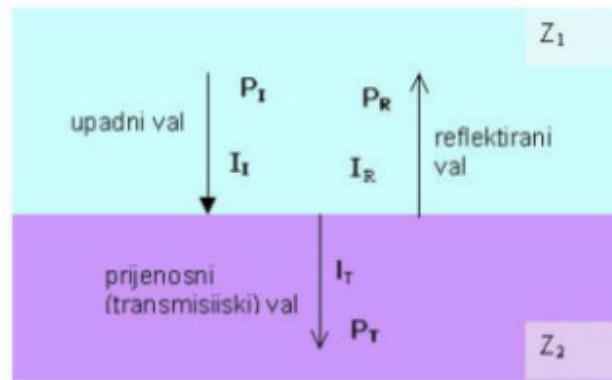
- od 45° do 80° nastaju transverzalni valovi
- od 0° do 35° nastaju longitudinalni valovi
- od 35° do 45° nastaju i longitudinalni i transverzalni valovi. [6]

2.4. Refleksija i lom ultrazvučnih valova

Princip ultrazvučne metode najlakše je objasniti na primjeru korištenja *puls-eho* tehnike za ultrazvučnu kontrolu. Ta tehnika koristi se ultrazvučnom sondom koja djeluje kao izvor i prijemnik ultrazvučnih valova te kao pretvornik i uređaj za prikaz rezultata. U ultrazvučnom pretvorniku električna energija pretvara se u mehanička titranja visoke frekvencije. Ta titranja generiraju ultrazvučne valove koji se šire kroz materijal. Kada valovi naiđu na promjene u materijalu, poput pukotina ili granica između materijala s različitim impedancijama, dio energije reflektira se natrag. Taj reflektirani signal potom se ponovno pretvara u električni signal, koji se obrađuje i prikazuje. Ultrazvučni pretvornici koriste se materijalima s piezoelektričnim svojstvima, koji omogućuju pretvaranje između električne i mehaničke energije. [7]

Na slici 3. vidljiva je refleksija i transmisija upadnoga vala.

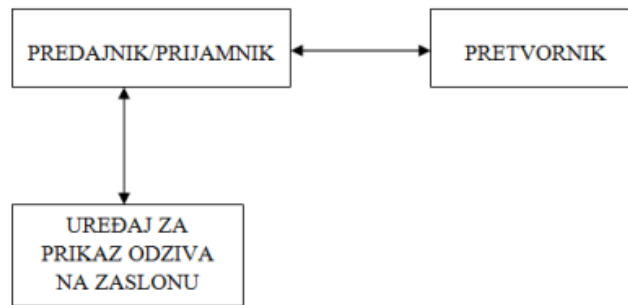
Slika 3. Refleksija i transmisija upadnoga vala



Izvor: V. Mihljevič, Deklaracija zavara u metalnim šavnim cijevima, diplomski rad, FSB, 2007.

2.5. Princip rada ultrazvučne metode

Princip rada ultrazvučne metode najjasnije je prikazati ultrazvučnom kontrolom korištenjem *puls-eho* tehnike. Ta metoda koristi se ultrazvučnom sondom koja funkcionira kao predajnik i prijammnik ultrazvučnih valova te kao pretvornik i uređaj za prikaz rezultata. U ultrazvučnom pretvorniku električna energija pretvara se u mehanička titranja visoke frekvencije. Ta titranja stvaraju ultrazvučne valove koji se šire kroz materijal. Kada valovi naiđu na promjene u materijalu, poput pukotina ili granica između materijala s različitim akustičnim svojstvima, dio se energije reflektira natrag. Reflektirani ultrazvučni signal zatim se ponovno pretvara u električni signal, koji se obrađuje i prikazuje na odgovarajućem uređaju. Ultrazvučni pretvornici izrađuju se od materijala s piezoelektričnim svojstvima, koji omogućuju pretvaranje između električne i mehaničke energije. [8]. Na slici 4. prikazana je blok-shema uređaja za ultrazvučnu kontrolu na principu impuls/odjek.

Slika 4. Blok-shema uređaja za ultrazvučnu kontrolu na principu impuls/odjek

Izvor: Matija Cejpek, Ultrazvučna kontrola, završni rad, Veleučilište u Karlovcu, strojarski odjel, stručni studij strojarstva

3. OPREMA ZA ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE

Oprema za otkrivanje pogrešaka mora omogućiti identifikaciju kritičnih pogrešaka te osigurati mjernu točnost koja je prihvatljiva za procjenu parametara pogreške u okviru zahtijevane preciznosti. Ultrazvučni sustav uključuje sljedeće komponente:

- ultrazvučni uređaj
- ultrazvučne sonde
- etaloni i referentni uzroci
- kontaktno sredstvo
- dodatna pomoćna oprema.

Za svako ispitivanje treba odabrati odgovarajuću opremu koja ispunjava zahtjeve za specifičnu namjenu i potrebnu osjetljivost. Radne karakteristike ultrazvučnog sustava, koje uključuju odabir, namještanje i provjeru opreme, moraju se definirati i verificirati prije početka ispitivanja. Neka od tih obilježja potrebno je provjeravati i tijekom ispitivanja. Način i učestalost provjere opreme i

sustava ovise o vrsti ispitivanja i opremi koja se rabi, a često su regulirani normama i tehničkom dokumentacijom za specifična ispitivanja.

Izbor ultrazvučnoga sustava također ovisi o ispitnom objektu. Za svako ispitivanje odabiru se odgovarajući uređaj, sonde, kabeli, etaloni i referentni uzroci, uzimajući u obzir materijal i vrste pogrešaka prisutnih u objektu kako bi se povećala vjerojatnost detekcije pogrešaka i pravilne interpretacije oscilograma. Ultrazvučni sustav može uključivati više jedinica pojedinih komponenti kao što su dvije sonde ili više sondi koje rade simultano ili veći broj etalona za precizno namještanje sustava. [4]

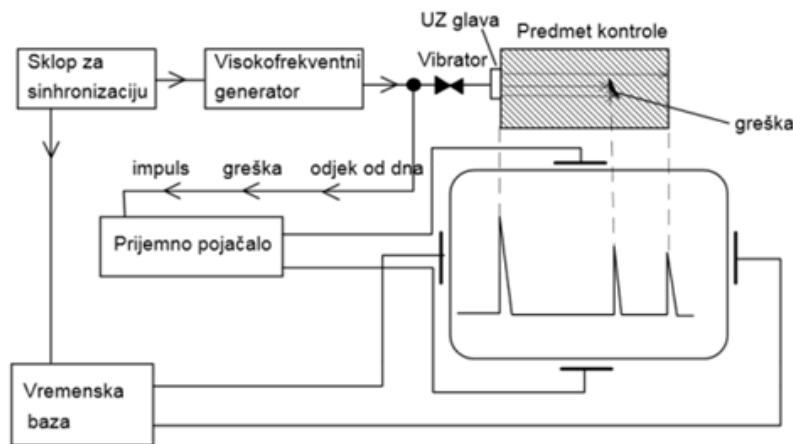
3.1. Ultrazvučni uređaj

Odašiljanje i prijam ultrazvuka u ispitivani materijal vrši se pomoću ultrazvučnih sondi, koje djeluju kao predajnici i prijammnici ultrazvuka. Ultrazvučni uređaj treba omogućiti aktivaciju sondi električnim impulsima kao i primanje elektroničkih impulsa sa sonde te prikaz interakcije ultrazvuka s ispitivanim objektom.

Glavni dijelovi ultrazvučnog uređaja jesu:

- skup elektroničkih sklopova (Taj dio uređaja omogućava napajanje, generiranje električnih impulsa, pojačavanje signala, sinkronizaciju i druge funkcije koje su potrebne za pravilno funkcioniranje opreme prema zahtjevima ispitivanja.)
- elektronički sklopovi izlaznih jedinica (Ti su sklopovi odgovorni za prikaz rezultata odašiljanja i prijama ultrazvuka korisniku u obliku koji je razumljiv i prikladan za daljnju interpretaciju). [4]

Slika 5. Shematski prikaz ultrazvučnoga uređaja



Izvor: Matija Cejpek, Ultrazvučna kontrola, završni rad, Veleučilište u Karlovcu, strojarski odjel, stručni studij strojarstva

3.2. Ultrazvučne sonde

Najosjetljiviji i ključni dio ultrazvučnoga sustava ultrazvučne su sonde, koje djeluju kao prijamnici i odašiljači ultrazvuka. Svaka sonda mora biti dizajnirana i prilagođena specifičnim zahtjevima primjene.

Pri konstrukciji sondi razmatraju se sljedeći elementi:

- materijal pretvarača (određuje efikasnost pretvorbe između električne i ultrazvučne energije)
- konfiguracija elektroda (metalne elektrode, obično od srebra, koriste se za primanje i odašiljanje električnoga signala)
- prigušivač (njegov materijal i oblik pomažu u smanjenju neželjenih titraja i refleksija)
- prizma i/ili maske (koriste se za usmjeravanje ultrazvučnoga vala kroz materijal)
- kućište (štiti unutarnje komponente sonde)
- zaštitni elementi i maske (ti elementi štite pretvarač od mehaničkoga oštećenja i trošenja te su obično izrađeni od polimera).

Materijal prigušivača ima ključnu ulogu u kontroliranju neželjenih titraja; što su akustičke impedancije pretvarača i prigušivača usklađenije, to je prigušenje učinkovitije. Maksimalno prigušenje postiže se kada se akustički otpor pretvarača i prigušivača izjednači.

Sonde koje uključuju prizmu ili leće za usmjeravanje ultrazvučnoga vala mogu imati montažne ili ugrađene komponente u kućištu. Materijal prizme i leće obično je plastičan ili polistiren, materijali s relativno malom brzinom ultrazvuka.

Vrste sondi mogu se klasificirati prema smjeru odašiljanja i prijama ultrazvučnoga snopa u odnosu na materijal, kao i prema načinu generiranja ultrazvuka. U novije vrijeme s proširenjem primjene ultrazvučne kontrole razvijene su različite vrste sondi koje se dijele na automatske i poluautomatske, ovisno o funkcionalnosti i primjeni. (Vjera Krstelj, Ultrazvučna kontrola 2003; Mihaljević 2007).

Standardne sonde s obzirom na smjer odašiljanja ultrazvučnoga snopa jesu:

- ravne sonde
- kutne sonde
- dvostruke sonde
- fokusirajuće sonde.

3.2.1. Ravna sonda

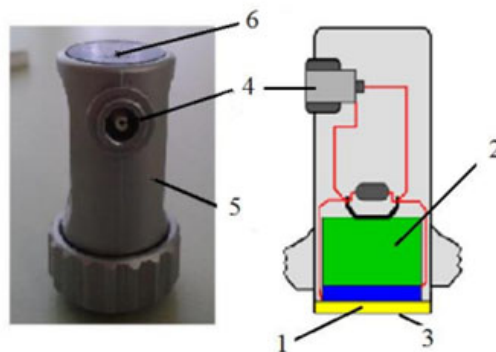
Ravna sonda odašilje i prima ultrazvučne valove okomito na svoju izlaznu plohu, pri čemu je kut odašiljanja ultrazvuka 0° . Princip rada ravne sonde temelji se na sljedećem: pretvarač (1) aktivira se putem elektroda koje su povezane s ultrazvučnim uređajem koaksijalnim kabelom. Svaka elektroda spojena je na suprotnu stranu pretvarača. U nekim sondama pretvarač nema zaštitnu foliju (3). U takvim slučajevima jedna je elektroda spojena izravno na pretvarač, dok je druga povezana s kućištem sonde. Ako je materijal objekta metalan, ovo kućište može služiti kao vanjska ploha za pretvarač, omogućujući stvaranje potrebnoga električnog potencijala na pretvaraču. Ta je vrsta sondi prikladna isključivo za metalne materijale. Takve sonde dizajnirane su za korištenje pretvarača otpornih na kontakt s ispitnim objektom i okolišem tijekom ispitivanja.

Pretvarač je pričvršćen na blok za prigušenje (2), koji služi za smanjenje slobodnih titraja pretvarača, čime se postižu kratki impulsi i osigurava zaštita pretvarača od mehaničkih oštećenja. Pretvarač, blok za prigušenje i elektroda čvrsto su smješteni unutar kućišta sonde. [7]

Dijelovi ravne sonde jesu:

1. pretvarač
2. blok za prigušenje
3. zaštitna folija
4. priključnica
5. kućište
6. oznaka sonde.

Slika 6. Prikaz ravne sonde



Izvor: Matija Cejpek, Ultrazvučna kontrola, završni rad, Veleučilište u Karlovcu, strojarski odjel, stručni studij strojarstva

3.2.2. Kutna sonda

Kutna sonda odašilje i prima ultrazvučne valove pod određenim kutom u odnosu na površinu pretvarača. Obično se kutne sonde izrađuju s kutovima ulaza ultrazvuka od 45°, 60°, 70° ili 80°. Te su sonde sposobne generirati longitudinalne, transverzalne i površinske valove kao i njihove kombinacije.

Princip rada kutne sonde temelji se na sljedećem: ulaz ultrazvuka pod kutom u ispitivani objekt postiže se nagibom pretvarača (1) u odnosu na izlaznu plohu prilikom konstrukcije sonde. Ultrazvučni valovi s pretvarača prenose se na objekt preko bloka za usmjeravanje (3). Taj blok, najčešće prizmatičnoga oblika i izrađen od pleksiglasa, odabran je zbog svoje male brzine ultrazvuka. Takav materijal omogućava postizanje maloga ulaznog kuta ultrazvuka na granici između sonde i materijala u skladu sa Snellovim zakonom. Ovisno o dizajnu, kut ulaza u čelik može biti između 45° i 90°.

Na granici između pleksiglasa i ispitne površine dolazi do refleksije i loma ultrazvučnih valova, stvarajući longitudinalne i transverzalne valove.

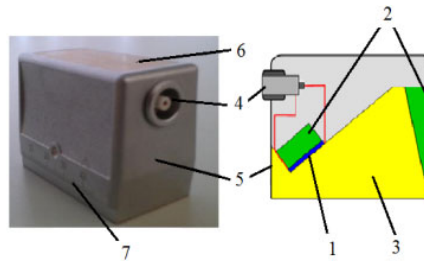
Reflektiranu ultrazvučnu energiju potrebno je ukloniti pomoću bloka za prigušenje (2) kako bi se spriječio ponovni prijenos ultrazvuka u ispitni objekt nakon odbijanja.

Svaka kutna sonda opremljena je skalom za izlaznu točku (7), koja omogućuje lakše određivanje mjesta odakle izlazi središnja zraka ultrazvučnoga snopa. [7]

Dijelovi kutne sonde jesu:

1. pretvarač
2. blok za prigušenje
3. blok za prilagodbu
4. priključnica
5. kućište
6. oznaka sonde
7. skala za izlaznu točku

Slika 7. Prikaz kutne sonde



Izvor: Matija Cejpek, Ultrazvučna kontrola, završni rad, Veleučilište u Karlovcu, strojarski odjel, stručni studij strojarstva

3.2.3. Dvostruka sonda

Dvostruka sonda rabi odvojene pretvarače za prijam i odašiljanje ultrazvučnih valova pri čemu su oba pretvarača smještena u zajedničko kućište, ali su električki izolirani kako bi se spriječilo blokiranje pojačala visokim naponom generatora impulsa tijekom odašiljanja. Zbog toga sonda je povezana dvostrukim koaksijalnim kabelom.

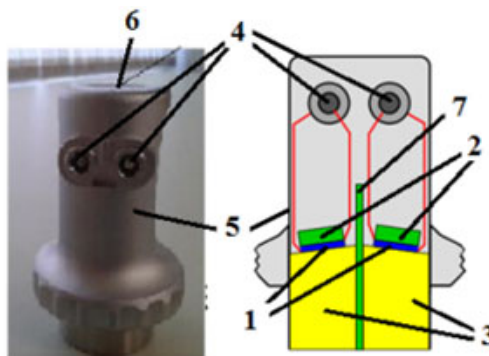
Princip je rada dvostruke sonde sljedeći: jedan od pretvarača (1) u sondi odašilje ultrazvučne valove, slično kao kod ravne i kutne sonde. Ti se valovi šire kroz ispitivani objekt preko bloka za kašnjenje (3) koji je povezan s odašiljačkim pretvaračem (1). Drugi pretvarač, koji je akustički izoliran (7) od prvoga, prima ultrazvučne valove čak i dok prvi pretvarač odašilje.

Pretvaračke pločice odašiljača i prijarnika postavljene su pod kutom jedna prema drugoj. Veći kut nagiba omogućuje fokusiranje ultrazvučnoga snopa bliže površini materijala, što omogućuje ispitivanje neposredno ispod ulazne plohe. Manji kut omogućava ispitivanje dubljih slojeva materijala. Duljina bloka za kašnjenje koristi se za regulaciju dijela ultrazvučnoga snopa koji ulazi u materijal i koji je prikladan za ispitivanje. [9]

Dijelovi dvostruke sonde jesu:

1. pretvarač
2. blok za prigušenje
3. blok za kašnjenje
4. priključnice
5. kućište
6. oznaka sonde
7. akustična impedancija.

Slika 8. Prikaz dvostruke sonde



Izvor: Matija Cejpek, Ultrazvučna kontrola, završni rad, Veleučilište u Karlovcu, strojarski odjel, stručni studij strojarstva

Kod dvostruke sonde ultrazvučni snop razlikuje se od snopa ravne sonde u tome što nije koristan u cijeloj svojoj duljini. Naime, koristan dio snopa kod dvostruke sonde samo je onaj segment u kojem se preklapaju odašiljački i prijemni snopovi.

U dvostrukim sondama, odašiljački i prijamni snopovi dizajnirani su tako da se djelomično preklapaju unutar određenoga područja, čime se osigurava da samo taj segment snopa pruža dovoljno intenziteta za precizno ispitivanje. Dio snopa izvan toga preklapanja može imati nedovoljan intenzitet i stoga nije koristan za analizu. Ta karakteristika omogućava fokusiranje na određeno područje unutar objekta i poboljšava točnost i pouzdanost ispitivanja s obzirom na to da se samo relevantan dio snopa koristi za procjenu stanja ispitivanog materijala. [4]

4. METODE ISPITIVANJA

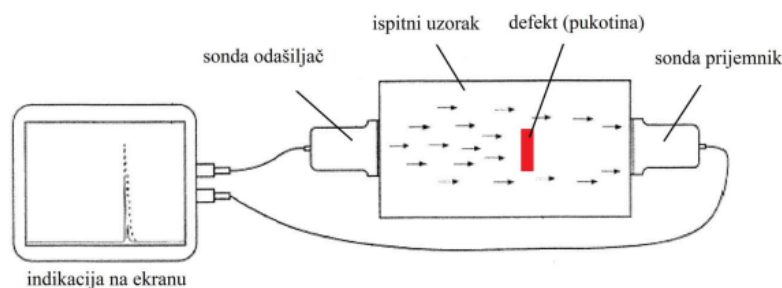
U ultrazvučnom ispitivanju primjenjuju se različite tehnike, no najčešće se ispitivanje temelji na tri osnovna principa:

- metoda prozvučavanja (transmisije)
- *puls-eho* metoda odjeka
- metoda rezonancije.

4.1. Metoda prozvučavanja

Metoda prozvučavanja temelji se na principu apsorpcije ultrazvuka unutar unutarnjih nehomogenosti materijala. Ta metoda (prikazana na slici 9.) mjeri smanjenje intenziteta ultrazvučnih valova dok prolaze kroz ispitivani objekt. U postupku jedna ultrazvučna glava (odašiljač) koristi se za usmjeravanje ultrazvučnih valova u ispitni uzorak, dok se s druge strane pomoću druge ultrazvučne glave (prijemnik) mjeri energija valova koja izlazi iz materijala. Ta metoda omogućuje analizu unutarnjih struktura i nehomogenosti materijala na temelju promjena u intenzitetu ultrazvučnih valova. [9]

Slika 9. Metoda prozvučavanja



Izvor: Matija Cejpek, Ultrazvučna kontrola, završni rad, Veleučilište u Karlovcu, strojarski odjel, stručni studij strojarstva

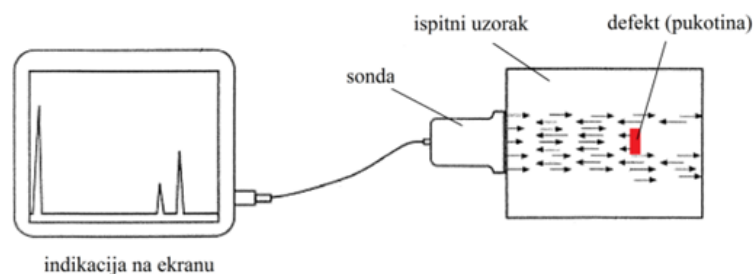
Kada je uzorak homogen i bez pukotina, signal na prijamniku bit će jednak ulaznom signalu. Međutim, u slučaju uzoraka koji se sastoje od dvaju različitih materijala dio ultrazvučne energije odbija se na granici između materijala (refleksija), što uzrokuje da prijamnik registrira signal manji od ulaznog. Razlika u intenzitetu signala ovisi o vrsti materijala i njegovu zvučnom otporu. Ta metoda omogućuje otkrivanje samo većih defekata. Posebno je učinkovita za identifikaciju slojevitih grešaka u tankim uzorcima, čija debljina ne prelazi 50 mm. [9]

4.2. Puls-eho metoda odjeka

Ova metoda temelji se na principu odbijanja ultrazvučnih valova od različitih nehomogenosti unutar materijala. U tom pristupu jedna ultrazvučna sonda funkcionira kao generator i prijamnik ultrazvučnih valova. Umjesto propuštenoga dijela ultrazvučnoga vala mjeri se reflektirani val. Zvučna energija ulazi u materijal i širi se kroz njega u obliku valova. Ako postoji diskontinuitet, poput pukotine, na putanji vala, dio će se energije odbiti od površine te nepravilnosti. Odbijeni valni signal zatim se pretvara u električni signal putem sonde i prikazuje na ekranu odgovarajućega uređaja.

Registrirani signal prikazuje se u odnosu na vrijeme koje je prošlo od trenutka kada je signal detektiran i registriran. Vrijeme putovanja signala može se izravno pretvoriti u udaljenost koju je signal prešao. Na taj način analizom signala dobivamo informacije o lokaciji greške, kao što je pukotina. Osim za lociranje grešaka, ta metoda (prikazana na slici 10.) također omogućuje mjerenje debljine uzoraka. [9]

Slika 10. Puls-eho metoda odjeka



Izvor: Matija Cejpek, Ultrazvučna kontrola, završni rad, Veleučilište u Karlovcu, strojarski odjel, stručni studij strojarstva

Za primjenu te metode potrebno je posjedovati mjerni instrument koji simultano prikazuje napon i vrijeme. Kod metode transmisije mjeri se samo slabljenje signala, dok kod *puls-eho* metode mjeri se i vrijeme prolaza signala i njegovo slabljenje. *Puls-eho* metoda osjetljivija je u odnosu na metodu prozvučavanja jer se smatra da samo oko 5 % energije odbije zbog nehomogenosti u materijalu.

Puls-eho metodom mogu se identificirati sljedeće vrste grešaka:

1. pukotine i rupe (identificiraju se kao refleksije na određenim udaljenostima, ovisno o veličini i položaju defekta)
2. nekonzistentne slojeve (različiti slojevi materijala mogu uzrokovati različite refleksije, omogućujući identifikaciju slojevitih grešaka ili promjena u strukturi materijala)
3. uključenci i strukturne nehomogenosti (prisutnost uključenića ili nehomogenosti u materijalu može uzrokovati promjene u intenzitetu reflektiranog vala, što omogućava njihovu detekciju)
4. kvarovi u materijalu (općenito, sve vrste unutarnjih kvarova ili nepravilnosti koje uzrokuju refleksiju ultrazvučnih valova mogu se identificirati pomoću ove metode).

Ta metoda pruža detaljne informacije o položaju i veličini grešaka, što je čini izuzetno korisnom za precizno ispitivanje materijala.

Nedostatak je te metode prisutnost mrtve zone, koja se javlja neposredno uz područje ulaska ultrazvuka u materijal. U toj zoni emitirani impulsi premali su da bi odmah otkrili defekte koji se nalaze blizu ultrazvučnoga vibratora. Mrtva zona područje je u kojem je detekcija grešaka otežana zbog toga što signal koji se vraća iz ove blizine nije dovoljno jak ili se ne može razlikovati od početnoga impulsa. Međutim, korištenjem prigušivača moguće je značajno smanjiti ovu mrtvu zonu, čime se omogućava otkrivanje grešaka u neposrednoj blizini ultrazvučnoga vibratora. Korištenjem prigušivača mrtva zona može biti smanjena na približno 5 mm, što poboljšava preciznost i učinkovitost ispitivanja u tom kritičnom području. [9]

4.3. Metoda rezonancije

Metoda rezonancije za ispitivanje limova neinvazivna je tehnika koja se koristi za detekciju nesavršenosti unutar materijala na temelju analize njihovih prirodnih frekvencija vibracija. Ta metoda temelji se na principu da svaki materijal, kada se podvrgne vanjskom podražaju, poput udarca ili vibracije, vibrira na svojim karakterističnim rezonantnim frekvencijama. Te frekvencije ovise o fizičkim svojstvima materijala poput gustoće, elastičnosti i geometrije. Promjene u rezonantnim frekvencijama mogu ukazivati na prisutnost unutarnjih nesavršenosti kao što su pukotine ili unutarnje napetosti, što ovu metodu čini iznimno korisnom u industrijskoj kontroli kvalitete.

Primjena metode rezonancije posebno je važna u industrijama gdje je osiguranje kvalitete materijala od ključnoga značaja poput zrakoplovne, automobilske i metalurške industrije. Njezine glavne prednosti uključuju visoku osjetljivost na male nesavršenosti i mogućnost ispitivanja velikih površina u kratkom roku bez potrebe za oštećivanjem ispitivanih materijala. [10]

5. PRINCIP PRIPREME ULTRAZVUČNOGA ISPITIVANJA

Princip pripreme ultrazvučnoga ispitivanja limova opisuje se kao ključan za osiguranje točnosti i pouzdanosti rezultata ispitivanja. Prvo, površina lima mora biti temeljito očišćena od nečistoća poput prašine, ulja, hrđe ili boje jer te nečistoće mogu značajno ometati prijenos ultrazvučnih valova. U slučaju prisutnosti grubih nepravilnosti preporučuje se njihovo uklanjanje brušenjem kako bi se osigurala glatka površina pogodna za ispitivanje.

Nakon pripreme površine potrebno je nanijeti spojni medij kako bi se osigurao dobar kontakt između ultrazvučne sonde i površine lima. Najčešće se rabi gel kao spojni medij jer učinkovito ispunjava male neravnine na površini, sprječavajući stvaranje zračnih džepova koji bi mogli reflektirati ultrazvučne signale i smanjiti kvalitetu rezultata. Korištenje spojnoga medija omogućava neometani prijenos ultrazvučnih valova iz sonde u materijal, što je ključno za preciznu detekciju nesavršenosti unutar lima.

Važnost pravilnoga odabira ultrazvučne sonde i frekvencije valova također se naglašava, ovisno o vrsti i debljini ispitivanoga lima. Niže frekvencije omogućuju dublje prodiranje kroz deblje materijale, dok više frekvencije pružaju bolju razlučivost, što je važno za otkrivanje manjih nesavršenosti. Prije početka ispitivanja oprema mora biti pravilno kalibrirana, što uključuje podešavanje osjetljivosti i dubine penetracije ultrazvuka kako bi se osigurala točnost mjerenja.

Proces pripreme smatra se ključnim za osiguranje visokokvalitetnih rezultata pri ultrazvučnom ispitivanju limova, omogućujući precizno otkrivanje i analizu potencijalnih unutarnjih nedostataka u materijalu. [8]

6. PRIMJENA I PROVOĐENJE ULTRAZVUČNE KONTROLE

Ultrazvučna kontrola najčešće se koristi kod:

1. ispitivanje limova i traka
2. mjerenje debljine stjenke
3. ispitivanje odljevaka
4. ispitivanje cijevi
5. ispitivanje zavara.

6.1. Ispitivanje limova i traka

Limovi i trake ispituju se pojedinačno ili u kontinuiranom procesu nakon proizvodnje ili prije početka daljnje preradbe. Za kontinuirane procese rabe se stacionarni uređaji i kontroliraju traku i lim po cijelom presjeku ili dužini. Obično se otkriveni defekti označavaju bojom i odvajaju od proizvoda bez defekata, ali vrsta greške nije očita. Iskusan kontrolor po obliku odjeka na ekranu prepoznaje o kojoj se vrsti pogreške radi. Javljaju se najčešće dvije vrste grešaka: pukotine i oksidni uključci te pukotine i sulfidni uključci. [11]

6.2. Mjerenje debljine stjenke

Ultrazvučna metoda ispitivanja debljine stjenke, kako su je opisali Josef Krautkramer i Herbert Krautkramer, temelji se na korištenju visokofrekventnih zvučnih valova za mjerenje debljine materijala. Ova tehnika omogućuje ispitivanje s jedne strane komponente, što je posebno korisno u slučajevima gdje druga strana nije dostupna, poput cijevi, spremnika i drugih zatvorenih sistema. Princip rada zasniva se na generiranju ultrazvučnog impulsa koji prolazi kroz materijal, a zatim se reflektira natrag prema sondi. Vrijeme koje je potrebno da se impuls vrati koristi se za izračunavanje debljine materijala. Autori naglašavaju važnost točne kalibracije uređaja kako bi se osigurala preciznost mjerenja, pri čemu je potrebno uzeti u obzir čimbenike kao što su hrapavost površine, temperatura i akustična svojstva materijala.

Preporučuje se prilagoditi frekvenciju ultrazvuka i pažljivo odabrati odgovarajuću sondu ovisno o vrsti i debljini ispitivanog materijala. Osobita pažnja mora se posvetiti materijalima sa slojevima ili premazima, jer mogu utjecati na točnost rezultata ako se dodatni slojevi ne uzmu u obzir prilikom ispitivanja. Osim teoretskog pregleda tehnike, autori pružaju i smjernice za praktičnu primjenu u industriji, uz naglasak na nužnost kontrole kvalitete kako bi se osigurali dosljedni i točni rezultati.

Ultrazvučna metoda ispitivanja debljine stijenke posebno je korisna za nadzor korozije i drugih oblika degradacije materijala, omogućujući preventivno održavanje industrijskih sustava. Ova metoda pomaže u otkrivanju ranih znakova oštećenja, čime se osigurava dugovječnost opreme i povećava sigurnost rada u kritičnim industrijskim granama, poput naftne, plinske i kemijske industrije. Krautkrameri ističu da primjena ove metode može značajno smanjiti rizik od kvarova te osigurati pouzdane rezultate ispitivanja u dugoročnom praćenju stanja materijala. [12]

6.3. Ispitivanje odljevaka

ISO 4992-1 je međunarodni standard koji specificira metode i kriterije za ultrazvučno ispitivanje čeličnih odljevaka namijenjenih za opće namjene. Cilj standarda je osigurati da odljevci ispunjavaju potrebne zahtjeve kvalitete i sigurnosti prije njihove upotrebe u konačnim proizvodima. Standard pruža detaljne smjernice za provedbu ultrazvučnog ispitivanja, uključujući izbor opreme, kalibraciju instrumenata, pripremu površine i tehnike ispitivanja. Naglašava važnost kvalifikacije osoblja koje provodi ispitivanje, zahtijevajući da inspektori budu certificirani prema međunarodno priznatim normama kako bi se osigurala pouzdanost rezultata. ISO 4992-1 definira kriterije prihvatljivosti na temelju veličine, položaja i vrste detektiranih nesavršenosti unutar odljevka. Nesavršenosti su klasificirane u različite razine, a standard pruža tablice koje pomažu u interpretaciji rezultata i donošenju odluka o prihvaćanju ili odbijanju odljevka. Također, standard ističe važnost dokumentacije i izvještavanja, zahtijevajući detaljne zapise o postupku ispitivanja, korištenoj opremi, postavkama i rezultatima, kako bi se osigurala sljedivost i transparentnost procesa. Uz to, ISO 4992-1 uzima u obzir faktore koji mogu utjecati na pouzdanost ispitivanja, poput geometrije odljevka, hrapavosti površine i materijalnih svojstava, te pruža smjernice za prilagodbu metode u takvim slučajevima. Standard također potiče komunikaciju između proizvođača i kupca kako bi se definirali specifični zahtjevi i očekivanja prije provođenja

ispitivanja. Primjenom ISO 4992-1, proizvođači i inspektori mogu sustavno pristupiti kontroli kvalitete, osiguravajući da čelični odljevci ispunjavaju međunarodno priznate kriterije i smanjujući rizik od kvarova ili nesreća u njihovoj konačnoj primjeni.

To doprinosi povećanju pouzdanosti i sigurnosti proizvoda na tržištu, olakšava međunarodnu trgovinu i jača povjerenje između proizvođača i kupaca. Standard služi kao sveobuhvatan vodič koji obuhvaća sve aspekte ultrazvučnog ispitivanja čeličnih odljevaka, od pripreme i provedbe do interpretacije rezultata i dokumentacije, te je ključan alat u osiguravanju kvalitete u metalurškoj industriji. [13]

6.4. Ispitivanje cijevi

Ultrazvučna kontrola cijevi ključna je nedestruktivna metoda ispitivanja koja se široko primjenjuje u naftnoj, plinskoj, petrokemijskoj i energetske industriji za otkrivanje unutarnjih i površinskih nesavršenosti poput pukotina, korozije i laminacija bez oštećenja materijala, čime se osigurava integritet cjevovoda, smanjuje rizik od kvarova i povećava sigurnost operacija. Provođenje ultrazvučne kontrole uključuje pripremu površine cijevi radi osiguranja dobrog kontakta između pretvarača i materijala, odabir odgovarajućeg ultrazvučnog pretvarača i spojnog sredstva te emitiranje visokofrekventnih zvučnih valova kroz materijal cijevi; reflektirani signali odražavaju se od diskontinuiteta i vraćaju do pretvarača, gdje se pretvaraju u električne signale prikazane na ekranu uređaja, omogućujući inspektoru identifikaciju i procjenu veličine, položaja i prirode nesavršenosti. Moderne ultrazvučne tehnike poput faznog niza i vodljivih valova omogućuju detaljniju inspekciju i pokrivanje većih područja s visokom razlučivošću, povećavajući učinkovitost ispitivanja. Primjena ultrazvučne kontrole ključna je za preventivno održavanje i produljenje životnog vijeka cjevovoda, jer redovita inspekcija omogućuje pravovremeno otkrivanje problema i planiranje potrebnih popravaka ili zamjene, čime se izbjegavaju skupi kvarovi, prekidi u proizvodnji i potencijalne opasnosti za okoliš i zdravlje. Standardi poput ISO 10893 i ASTM E213 pružaju smjernice za ispravno provođenje ultrazvučnog ispitivanja cijevi, uključujući zahtjeve za opremu, postupke i kriterije prihvatljivosti, a poštivanje ovih standarda osigurava pouzdanost rezultata i usklađenost s međunarodnim propisima. [14]

6.5. Ispitivanje zavara

Ispitivanje zavara predstavlja ključnu komponentu u osiguravanju strukturne integritete i sigurnosti konstrukcija. Različite metode nerazornog ispitivanja (NDT) koriste se za detekciju nesavršenosti i nedostataka u zavarenim spojevima bez oštećenja ispitivanog materijala. Među najčešće korištenim metodama ubrajaju se vizualno ispitivanje, ultrazvučno ispitivanje, radiografsko ispitivanje, ispitivanje magnetskim česticama, ispitivanje penetrantima te ispitivanje vrtložnim strujama. Vizualno ispitivanje omogućuje brzu identifikaciju površinskih nepravilnosti, dok se ultrazvučno ispitivanje koristi visokofrekventnim zvučnim valovima za otkrivanje unutarnjih grešaka. Radiografsko ispitivanje primjenjuje rendgensko ili gama zračenje za stvaranje slike unutarnje strukture zavara, omogućujući detekciju pukotina i pora. Ispitivanje magnetskim česticama primjenjuje se na feromagnetične materijale kako bi se otkrili površinski i blizu površinski diskontinuiteti, dok ispitivanje penetrantima omogućuje detekciju površinskih pukotina pomoću tekućih penetranta. Ispitivanje vrtložnim strujama koristi se za detekciju površinskih i blizu površinskih nedostataka u vodljivim materijalima. Primjena ovih metoda omogućuje rano otkrivanje potencijalnih problema, čime se smanjuje rizik od strukturnih kvarova i povećava sigurnost. U posljednje vrijeme, napredak tehnologije doveo je do uvođenja automatiziranih i robotiziranih sustava za ispitivanje zavara, uključujući upotrebu bespilotnih letjelica za ispitivanje teško dostupnih ili opasnih područja, što povećava sigurnost operatera i učinkovitost procesa. Integracija naprednih senzora i analitičkih softvera omogućuje detaljniju analizu podataka i preciznije utvrđivanje stanja zavara. Ispitivanje zavara također igra ključnu ulogu u održavanju standarda kvalitete i usklađenosti s međunarodnim normama i propisima. Unatoč prednostima, izazovi kao što su složenost interpretacije rezultata i potreba za kvalificiranim osobljem i dalje su prisutni. Stoga se kontinuirano radi na poboljšanju metoda i obuci stručnjaka kako bi se osigurala pouzdanost i točnost ispitivanja zavara. U kontekstu industrije 4.0, digitalizacija procesa ispitivanja zavara postaje sve značajnija, omogućujući real-time praćenje i analizu podataka te integraciju u sustave upravljanja održavanjem. [15]

Slika 11. Prikaz pukotine na zavaru



Izvor: https://www.flyability.com/blog/ndt#Welding_NDT

7. PRAKTIČNI DIO

U praktičnom dijelu rada bit će obrađeno ispitivanje crnoga lima debljine 8 mm te kvalitete S355 J2+N. U nastavku rada na primjeru će biti objašnjen cijeli postupak ispitivanja oštećenja lima ultrazvučnom metodom. Slika 12. prikazuje površinsko oštećenje lima te će u nastavku biti izmjereno oštećenje na uređaju te će biti prikazano u realnom mjerenju.

Slika 12. Prikaz lima za ispitivanje



Izvor: Fotografirao autor

7.1. Uređaj

Za ispitivanje oštećenja u praktičnom dijelu rada koristio se mjerni uređaj USM Go+. Jedna od istaknutih značajki USM Go+ uređaja njegov je kompaktni dizajn i trajnost. Taj uređaj posebno je razvijen za prenosivost, što ga čini prikladnim za inspekcije u različitim okruženjima, uključujući industrijske pogone, gradilišta i terenski rad. Njegova robusna konstrukcija osigurava trajnost i pouzdanost, čak i u zahtjevnim uvjetima. Ergonomski dizajn i korisničko sučelje olakšavaju rukovanje i upravljanje uređajem, smanjujući rizik od zamora operatera tijekom produljenih upotreba.

Još jedna značajna jest dostupnost različitih načina inspekcije, uključujući tehnike pulsnoaga odraza i tehnike slanja i primanja. Ti načini omogućuju sveobuhvatan pregled materijala i otkrivanje različitih vrsta oštećenja. Mogućnost prelaska između različitih načina i parametara osigurava prilagodbu različitim zahtjevima inspekcije. Dodatno, USM Go+ uređaj dizajniran je za jednostavno izvještavanje i dokumentiranje, omogućavajući korisnicima učinkovito generiranje izvješća o inspekciji s relevantnim informacijama o procesu inspekcije i otkrivenim problemima. Na sljedećoj slici (slika 13.) prikazan je uređaj i način ispitivanja lima.

Slika 13. Prikaz uređaja i način ispitivanja lima



Izvor: Fotografirao autor

7.2. Sonda

U kontekstu ultrazvučnoga ispitivanja (UT) metala dvoelementna (ili dvostruka) sonda jedan je od ključnih alata za detekciju i analizu nedostataka. Dvoelementna sonda, kako joj i ime sugerira, posjeduje dvije odvojene kristalne jedinice: jednu za emitiranje ultrazvučnoga vala i drugu za njegovo primanje. Ta posebna konfiguracija omogućava sondi da precizno detektira nedostatke koji se nalaze vrlo blizu površine materijala. Za razliku od konvencionalnih sonda, koje rabe isti element za emitiranje i primanje, dvoelementna sonda ima manju „mrtvu zonu”, što rezultira boljom rezolucijom nedostataka blizu površine. Dodatno, odvojeni elementi smanjuju mogućnost interferencije između emitiranoga i primljenoga signala, čime se povećava kvaliteta i jasnoća dobivenih podataka. Mnoge od tih sonda opremljene su posebnim klinom ili obućom koji omogućavaju usmjeravanje ultrazvučnoga vala pod specifičnim kutom, pružajući dodatnu fleksibilnost u karakterizaciji i detekciji nedostataka. Pri odabiru odgovarajuće dvoelementne sonde za određenu aplikaciju važno je razmotriti frekvenciju sonde. Dok sonde s višom frekvencijom pružaju bolju rezoluciju, njihova je penetracija često ograničena, što ih čini idealnima za ispitivanje tankih materijala. S druge strane, sonde s nižom frekvencijom omogućavaju dublju penetraciju, ali s nešto nižom rezolucijom. Na slici 14. prikazana je dvostruka sonda, a u tablici 1. navedeni su osnovni podatci o sondi.

Slika 14. Prikaz dvostruke sonde

Izvor: Fotografirao autor

Tablica 1. Osnovni podaci o SEB4 sondi

vrsta	SEB4
veličina kristala	6x20mm
frekvencija	4 MHz
propusnost	3...5 MHz
radno područje	1,5...2000 mm
dužina polja	12mm
širina odjeka	2,5 mm
kontaktno područje	28,5mm Φ

7.3. Postavljanje i priprema

Prije nego što se izvrši inspekcija pomoću uređaja USM Go+ na limu debljine 8 mm, kontrolor mora obaviti ključne pripreme i postavljanje. Taj je korak od suštinskoga značaja za osiguranje točnosti i pouzdanosti inspekcije.

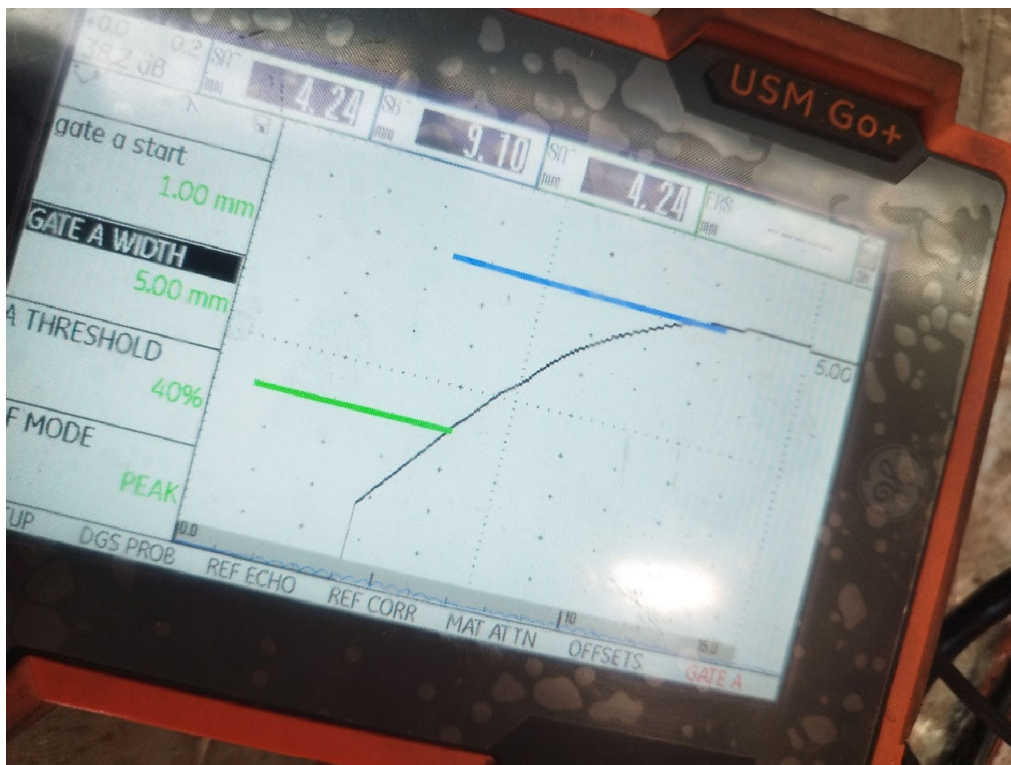
Kako bi započeli, operator odabire odgovarajuće postavke kalibracije za materijal koji se ispituje, što je u ovom slučaju lim debljine 8 mm. Kalibracija uključuje prilagodbu parametara uređaja kako bi se podudarali s akustičnim svojstvima materijala, što izravno utječe na točnost mjerenja.

Također, kontrolor potvrđuje da je pretvarač uređaja, ključna komponenta odgovorna za emitiranje i primanje ultrazvučnih signala, čvrsto spojen s uređajem USM Go+. Pravilno pričvršćivanje pretvarača od vitalnoga je značaja kako bi se osigurala dosljedna i stabilna veza s površinom metala tijekom inspekcije.

Naposljetku, operator postavlja ispravnu frekvenciju i parametre za inspekciju mjerenja debljine lima. Te su postavke ključne za određivanje kako će uređaj generirati i analizirati ultrazvučne valove dok prolaze kroz materijal.

Pomnim pristupom tim zadacima pripreme i postavljanja operator osigurava da je uređaj USM Go+ spreman za točnu i učinkovitu inspekciju metala debljine 8 mm, pružajući pouzdane rezultate mjerenja debljine. Na slici 15. prikazan je kalibrirani uređaj.

Slika 15. Prikaz kalibriranoga uređaja



Izvor: Fotografirao autor

7.4. Mjerenje neoštećenog dijela lima

Provođenje prvoga mjerenja na neoštećenom dijelu lima ima nekoliko ključnih svrha. Prvo, omogućuje uspostavu referentne točke za debljinu materijala u njegovu prvobitnom stanju, prije nego što se mogu pojaviti oštećenja ili korozija. To osnovno mjerenje često služi kao osnova za buduće usporedbe s kasnijim inspekcijama. Ovaj pristup omogućuje rano otkrivanje promjena u debljini materijala, čime se sprečava nastanak ozbiljnih problema koji bi mogli ugroziti strukturalnu integritet ili sigurnost. Drugo, provođenje mjerenja na neoštećenom dijelu omogućuje upoznavanje s karakteristikama materijala u kontroliranim uvjetima, što pomaže u interpretaciji budućih rezultata inspekcija na oštećenim dijelovima. Na taj način mogu se identificirati prirodne varijacije u debljini materijala, čime se izbjegava lažno tumačenje kasnijih očitavanja.

Osim toga, prvo mjerenje na neoštećenom dijelu omogućuje kontroloru da se upozna s rukovanjem uređajem USM Go+ i praksom provedbe inspekcija. To povećava vještinu i

samopouzdanje kontrolora prije nego što prijeđu na mjerenja na kritičnim dijelovima gdje je točnost ključna. Na slici 16. prikaza je sonda i lima za ispitivanje.

Slika 16. Prikaz sonde i lima za ispitivanje



Izvor: Fotografirao autor

7.5. Prvo mjerenje oštećenoga dijela materijala

Na grafikonu prikazanom na ekranu ultrazvučnoga detektora vidi se niz vertikalnih vrhova koji predstavljaju odjeke s granice. Prvi značajni vrh blizu lijeve strane početni je impuls ultrazvučnoga vala koji udara prednju površinu metala ili sučelje između sonde i metala. Serija

manjih vrhova koji slijede mogli bi ukazivati na šum, raspršivanje zrna u materijalu ili moguće manje inkluzije ili nekonzistentnosti u materijalu.

Snažan vrh koji se nalazi malo iza sredine grafikona ukazuje na značajnu granicu ili veći nedostatak. S obzirom na njegovu udaljenost od početnog vrha to bi moglo sugerirati nedostatak ili granicu duboko unutar materijala. Zeleno područje predstavlja vrata koja je postavio ispitivač. Unutar ovih vrata instrument posebno pazi na odjeka. Svaki odjek unutar ovih vrata može potaknuti odgovor ili upozorenje. Mod vrijeme leta postavljen je na „PEAK“, što znači da detektor mjeri vrijeme potrebno da ultrazvučni val putuje od sonde do vrhunskoga odjeka unutar navedenih vrata i natrag. Na ovom mjerenju prikazano je oštećenje promjera 5 mm te završava na dubini od 2 mm (slika 17.).

Slika 17. Digitalni prikaz očitavanja oštećenog dijela lima



Izvor: Fotografirao autor

Nakon obavljenoga mjerenja pomoću instrumenta urađena je provjera da se utvrdi jesu li rezultati točni i relevantni za stvarno vrijeme te da ispravno odražavaju oštećenje koji se proučava. Analizira se prikupljene podatke i uspoređuje ih s očekivanim rezultatima kako bi se osigurala pouzdanost instrumenta i njegova primjenjivost u stvarnim situacijama. Na slici 18. analogni je prikaz promjera oštećenja lima.

Slika 18. Analogni prikaz promjera oštećenja lima



Izvor: Autor

7.6. Drugo mjerenje oštećenoga dijela materijala

Iz ovoga drugog dijela vidi se očitavanje i da se oštećenje pojavljuje na dubini od 2,91 mm te širina oštećenja iznosi 5,62 mm (slika 19.)

Slika 19. Digitalni prikaz očitavanja oštećenog dijela lima



Izvor: Fotografirao autor

Ponovno nakon digitalnoga očitavanja korišteno je analogno pomično mjerilo da se utvrdi relevantnost očitavanja s uređaja. Na slici 20. analogni je prikaz dubine oštećenja na limu.

Slika 20. Analogni prikaz dubine oštećenja na limu



Izvor: Fotografirao autor

7.7. Obrazac

Nakon provedenog ispitivanja, operater je dužan ispuniti obrazac te u njemu navodi koju je debljinu i kvalitetu lima ispitivao, prema koji normi te naziv uređaja i sondu koju je upotrebljavao kao što je prikazano na slika 21.

Slika 21. Prikaz obrasca za ispunjavanje

Mišel Dominić	RADNI IZVJEŠTAJ	88
----------------------	------------------------	-----------

Naručitelj: Ime kupca	Br. narudžbe: 1012024	Datum: 03.09.2024
--------------------------	--------------------------	----------------------

Kval. materijala: S355J2	Dimenzija: 5x1000x1000	Količina: 1
Materijal: ČELIK	Postupak ispitivanja: HRN EN ISO 10160	Kriterij prihvatljivosti: S2/E3

PROVEDBA ISPITIVANJA		
Uređaj: USM GO +	Mjerno područje: 10	Osnovna osjetljivost: 36 dB
Serijski br: GOPLS20020139	Kontaktno sredstvo: VODA	Referentna osjetljivost: 42 dB
Sonda: seb4t	Referentni reflektor: fi5	
Priključni kabel: lemo00	Dijagram: DGS	

Skica/napomena

<p>Napomena: Homogenost materijala ne zadovoljava kriterij S2/E3</p>

Ispitao:Mišel Dominić.....

Datum:03.09.2024.....

Izvor: <https://horex.hr/>

8. ZAKLJUČAK

Zaključno, ultrazvučna metoda ispitivanja limova pokazala se kao iznimno učinkovita i pouzdana tehnika za detekciju unutarnjih i površinskih defekata u materijalima. Ovaj rad detaljno je prikazao kako ultrazvuk različitim metodama poput *puls-eho* tehnike i metode prozvučavanja omogućuje precizno lociranje i procjenu veličine oštećenja u limovima. Korištenjem uređaja USM Go+ i dvostruke sonde uspješno su detektirani defekti u limu debljine 8 mm, što potvrđuje visoku osjetljivost i pouzdanost ove metode.

Prednost je ultrazvučne metode u njezinoj neinvazivnosti, visokoj preciznosti i mogućnosti detekcije vrlo malih oštećenja, čak i u materijalima koji su teže dostupni ili zahtijevaju ispitivanje s jedne strane. Također, ta metoda omogućuje brzo i točno ispitivanje, što je od velike važnosti u industrijskim uvjetima gdje je potrebno osigurati kvalitetu i sigurnost materijala bez oštećivanja ispitivanoga objekta.

Međutim, određeni nedostaci poput prisutnosti mrtve zone u neposrednoj blizini površine ulaska ultrazvučnih valova mogu otežati detekciju defekata u tom području. Unatoč tomu korištenjem prikladne opreme i tehničkih prilagodbi poput pravilnoga odabira sonde i frekvencije moguće je znatno smanjiti te izazove.

U konačnici, ultrazvučna metoda ispitivanja limova dokazala se kao ključna tehnika u osiguravanju kvalitete i sigurnosti u različitim industrijama, uključujući strojarstvo, građevinarstvo i proizvodnju. Njezina primjena omogućava neprekidnu kontrolu kvalitete materijala, čime se smanjuju rizici od nepredviđenih kvarova i produžava vijek trajanja proizvoda. Daljnja istraživanja i razvoj ultrazvučne tehnologije mogu dodatno unaprijediti njezinu preciznost i primjenjivost, čineći je nezamjenjivim alatom u industrijskim kontrolama.

Izjava o autorstvu

MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

Bana Josipa Jelačića 22/a, Čakovec

IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta 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, internetskih i drugih izvora) bez pravilnog citiranja. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom i nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, MARTIN FERENČIĆ (ime i

prezime studenta) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću,

izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog rada pod naslovom

ISPITIVANJE LIMOVA METODOM ULTRA ZVUKA

te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:


(vlastoručni potpis)

Literatura

1. (CNDE, <https://www.cnde.iastate.edu/>, (Datum pristupa: 16. 8. 2024.)
2. Industrijsko-obrtnička škola Pula, <http://ss-ios-pu.skole.hr/upload/ss-ios-pu/images/static3/601/File/Metoda%20ultrazvuka.pdf> (Datum pristupa: 17. 08. 2024.)
3. (Boston University Arts & Sciences, <https://www.bu.edu/research/industry/>, (Datum pristupa: 18. 08. 2024)
4. Krstelj, V. (2003) „Ultrazvučna kontrola“, Zagreb
5. Nurettin Sezer, Muammer Koç, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285520311411> (Datum pristupa: 18. 08. 2024.).
6. Shutilov, V. A. Fundamental Physics of Ultrasound, <https://www.taylorfrancis.com/chapters/mono/10.1201/9780429332227-7/reflection-refraction-scattering-ultrasonic-waves-shutilov> (Datum pristupa: 22. 08. 2024.).
7. V. Mihljevič, Deklaracija zavara u metalnim šavnim cijevima, diplomski rad, FSB, 2007. (Datum pristupa: 27. 08. 2024.).
8. Blitz, J. & Simpson, G. (1995). *Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing*. Springer.
9. Cejpek, M. (2016). *Ultrazvučna kontrola*, završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Strojarski odjel, stručni studij strojarstva
10. Ewins, D. J. (2000). *Modal Testing: Theory, Practice and Application*
11. Erichsen, https://www.erichsen.de/en-gb?srsId=AfmBOorSYZYkvYpYEefryCqcp7PM-g_6jSrWdAtUObsiE5ynmQZ8VLp, (Datum pristupa: 01.09.2024.)
12. *Ultrasonic Testing of Materials* - J. Krautkramer & H. Krautkramer
13. ISO, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13849:-1:ed-3:v1:en> (Datum pristupa: 02.09.2024.)
14. The American Society for Nondestructive Testing, <https://www.asnt.org/MajorSiteSections/Publications/ME.aspx> (Datum pristupa: 04.09.2024.)
15. Flyability, https://www.flyability.com/blog/ndt#Welding_NDT, (Datum pristupa: 05.09.2024)

Popis tablica

Tablica 1. <i>Osnovni podaci o SEB4 sondi</i>	28
--	----

Popis slika

Slika 1. Prikaz prvoga uređaja za ultrazvučnu kontrolu.....	2
Slika 2. Ispitivanje zavara ultrazvukom	3
Slika 3. Refleksija i transmisija upadnoga vala.....	7
Slika 4. Blok-shema uređaja za ultrazvučnu kontrolu na principu impuls/odjek.....	8
Slika 5. Shematski prikaz ultrazvučnoga uređaja.....	10
Slika 6. Prikaz ravne sonde	12
Slika 7. Prikaz kutne sonde	14
Slika 8. Prikaz dvostruke sonde	15
Slika 9. Metoda prozvučavanja	16
Slika 10. Puls-eho metoda odjeka	17
Slika 11. Prikaz pukotine na zavaru	25
Slika 12. Prikaz lima za ispitivanje	26
Slika 13. Prikaz uređaja i način ispitivanja lima	27
Slika 14. Prikaz dvostruke sonde	29
Slika 15. Prikaz kalibriranoga uređaja	31
Slika 16. Prikaz sonde i lima za ispitivanje.....	32
Slika 17. Digitalni prikaz očitavanja oštećenog dijela lima.....	33
Slika 18. Analogni prikaz promjera oštećenja lima	34
Slika 19. Digitalni prikaz očitavanja oštećenog dijela lima.....	34
Slika 20. Analogni prikaz dubine oštećenja na limu.....	35
Slika 21. Prikaz obrasca za ispunjavanje	36