

Primjena ultrazvučnih mjerenja u brodogradnji

Oršolić, Domagoj

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Istrian University of applied sciences / Istarsko veleučilište - Università Istriana di scienze applicate**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:212:598198>

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

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



image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

[Digital repository of Istrian University of applied sciences](#)



image not found or type unknown

ISTARSKO VELEUČILIŠTE –
UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE APPLICATE



Domagoj Oršolić

**PRIMJENA ULTRAZVUČNIH MJERENJA U
BRODOGRADNJI**

Završni rad

Pula, 2024

ISTARSKO VELEUČILIŠTE –
UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE APPLICATE

Domagoj Oršolić

**PRIMJENA ULTRAZVUČNIH MJERENJA U
BRODOGRADNJI**

Završni rad

JMBAG: 0233009095, redoviti student

Studijski smjer: Stručni prijediplomski studij Mehatronika

Predmet: Mjeriteljstvo i upravljanje kvalitetom

Mentor: doc.dr.sc. Vedrana Špada

Komentor: Ivan Pentek, pred.

Neposredni voditelj rada: Igor Savić

Pula, 2024.



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisan Domagoj Oršolić, kandidat za prvostupnika stručnog studija mehatronike ovime izjavljujem da je ovaj završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

U Puli, 2024. godine.

Student



IZJAVA
o korištenju autorskog djela

Ja, Domagoj Oršolić dajem odobrenje Istarskom veleučilištu – Università Istriana di scienze applicate, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom **PRIMJENA ULTRAZVUČNIH MJERENJA U BRODOGRADNJI** na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, 2024. godine.

Student

Sadržaj

1. UVOD	1
2. ZAVARIVANJE U BRODOGRADNJI	2
2.1. Metode zavarivanja	3
2.2. Priprema površine i postupak spajanja.....	5
2.3. Standardi i norme	6
3. NERAZORNE METODE ISPITIVANJA MATERIJALA.....	9
3.1. Uvod u NDT i metode ispitivanja	9
3.2. Ultrazvučno ispitivanje materijala	13
3.3. Primjena UZV u brodogradnji	14
4. PRIMJER ULTRAZVUČNOG ISPITIVANJA U PROCESU GRADNJE BRODA	15
5. ZAKLJUČAK.....	28
LITERATURA	29
POPIS SLIKA	30
SAŽETAK	31
ABSTRACT	32

1. UVOD

Ultrazvuk predstavlja zvučne valove čija je frekvencija približna 20000 herca (Hz). Osim u medicini ima znatnu korist i u mnogim granama industrije pa tako i u brodogradnji gdje se koristi za ispitivanje integriteta zavara i materijala. Ultrazvučnim ispitivanjem moguće je identificirati greške u materijalu poput raznih nemetalnih uključaka, šupljina i pukotina, a sve to bez narušavanja integriteta elemenata i sklopova koji se ispituju. Osim navedenog, prednost ultrazvuka kao metode za ispitivanje je da omogućava i dijagnosticiranje grešaka koje nisu vidljive golim okom, odnosno ne nalaze se na površini uzorka. Pored prednosti, kao i sva naprednija tehnologija i dijagnostika, postoje i prepreke koje usporavaju učinkovitost i kvantitativan rad pri ultrazvučnom ispitivanju. Vršiti kvalitetno ultrazvučno dijagnosticiranje može samo operater s mnogo iskustva i razvijene vještine. Također, sama podloga na kojoj se vrši dijagnosticiranje mora biti ispravno pripremljena i to očišćena od svih mogućih prepreka koje mogu ometati detekciju u radu ultrazvuka kao što su razni premazi, korozija ili krhotine. U brodogradnji se također koriste i ostale metode NDT (eng. *Non Destructive Testing*), odnosno nerazorne metode ispitivanja.

Povijest upotrebe ultrazvuka i ultrazvučnih uređaja bilježi se od 1790. godine, kada je Lazzaro Spallanzani primijetio da se šišmiši za svoje kretanje više oslanjaju na sluh nego na vid. U svojim je eksperimentima pokazao da kada se šišmišima pokriju usta sposobnost za izbjegavanje prepreka u letu im značajno opada. Na temelju svojih eksperimenata zaključio je da se šišmiši koriste visokim zvučnim frekvencijama pomoću kojih ostvaruju prostornu navigaciju. Zatim su Paul Langevin i Constantin Chilowsky nakon potonuća Titanika osmislili rješenje kako se tragedija ne bi ponovila, odnosno hidrofon koji je služio za detekciju ledenih santi. Uređaj je radio na principu slanja i primanja niskofrekventnih zvučnih valova, koji su dolazili do prijemnika manifestirajući se kao jeka objekata u vodi.

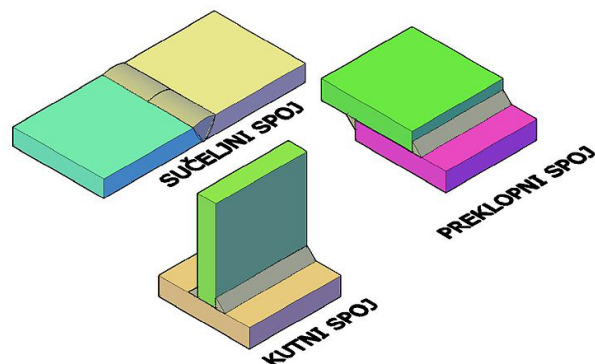
U brodogradnji se primjenjuju različite vrste spojeva pa tako i zavarenih spojeva čija priprema treba biti ispravno izvedena kako bi se zajamčila trajnost, izdržljivost, čvrstoća i cjelovitost zavarenih konstrukcija. Vrsta materijala koji se zavaruje, debljina ploča, mjesto i položaj zavarivanja i vrsta tehnike zavarivanja koja se koristi, neki su od elemenata koji utječu na izbor spoja, njegovu pripremu, a na kraju i uspješnost izvođena kvalitetnog zavarenog spoja. Kako bi se postiglo navedeno, potrebno je

poznavati metode zavarivanja i poteškoće, odnosno greške koje se mogu pojaviti pri zavarivanju. Razni standardi i norme koje se koriste u kontroli kvalitete definiraju način otkrivanja i karakterizaciju pojedinih grešaka koje se pojavljuju unutar zavarenih spojeva.

2. ZAVARIVANJE U BRODOGRADNJI

Zavarivanje je postupak spajanja dvaju ili više dijelova s ili bez dodatnog materijala. Na taj način dobiva se kontinuirani nerastavljivi spoj jednoličnih svojstava (mehanička svojstva, otpornost na trošenje). Tijekom zavarivanja zona spoja dovedena je u tekuće ili plastično stanje. Zavarivanjem se mogu spajati metalni (čelici, aluminij, bakar itd) i nemetalni materijali (Gojić, 2003).

Prema međusobnom položaju dijelova koji se zavaruju, zavareni spojevi se dijele na sučeljene (čeone), kutne, naliježuće i preklopne spojeve. Da bi se osigurao kvalitetan zavareni spoj po čitavu presjeku materijala, rubne dijelove koji se zavaraju potrebno je pripremiti u obliku žlijeba (zavara). Rubovi za zavarivanje mogu se pripremiti strojnom obradom, toplinskim rezanjem ili strojevima za skošavanje rubova. Prema oblicima razlikujemo zavarene spojeve : I-spoj, V-spoj, X-spoj, U-spoj, dvostruki U-spoj, K-spoj, J-spoj, dvostruki J-spoj, 1/2V-spoj. Označavanje zavarenih spojeva na nacrtima provodi se prema međunarodno priznatim oznakama u skladu s nacionalnim standardima (Gojić, 2003). Na slici 1 prikazani su primjeri različitih zavarenih spojeva, gdje je moguće raspoznati osnovni materijal te dodatni materijal zavara.

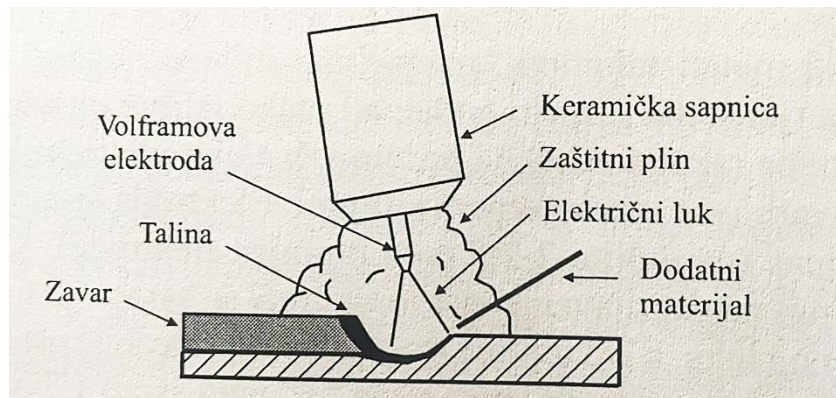


Slika 1 Ilustracija zavarenih spojeva

Izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Suceljni_spoj.jpg

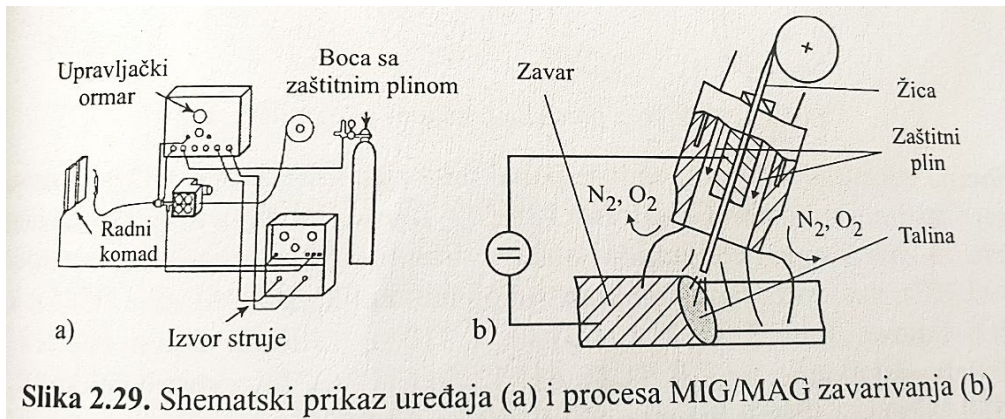
2.1. Metode zavarivanja

TIG zavarivanje (eng. *Tungsten Inert Gas*) je metoda koja omogućava precizan i kvalitetan zavareni spoj. Kod TIG zavarivanja koristi se netaljiva volframova (W) elektroda kao i argon (Ar), inertni plin koji štiti zavareni spoj te omogućuje održavanje topline i visokokvalitetne spojeve. Održavanje temperature u području električnog luka je ključna kako bi se minimizirale deformacije i naprezanja u spoju. Na slici 2 prikazan je shematski prikaz TIG postupka zavarivanja i njegovi elementi gdje se može vidjeti da se dodatni materijal dodaje izvana u područje zavara odnosno električnog luka.



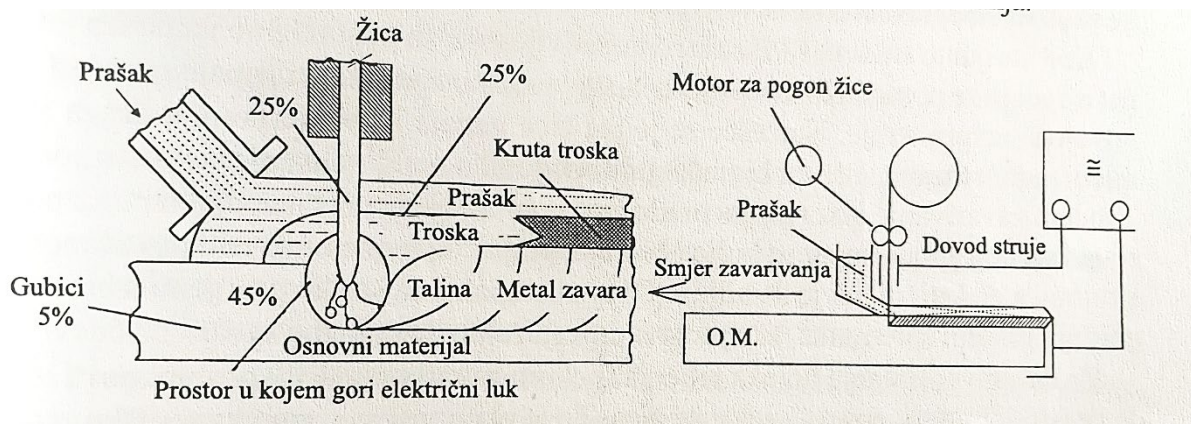
Slika 2 Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja (Gojić, 2003)

MIG zavarivanje (eng. *Metal Inert Gas*), koristi inertni plin radi sprječavanja oksidacije te omogućuje brzo zavarivanje s dobrom kontrolom temperature. Metoda omogućava veće brzine zavara od TIG postupka, ali uz inertni plin za zaštitu potreban je i dodatni materijal za zavarivanje koji se u ovom slučaju dodaje u obliku žice kroz gorionik. MAG zavarivanje (eng. *Metal Active Gas*) češće se upotrebljava za željezne metale poput čelika i željeza. MAG zavarivanje odlaže više topline u obradak, što može biti korisno za deblje materijale ili kada je potrebno napraviti duboki zavar. Na slici 3 prikazan je shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja s njihovim osnovnim elementima.



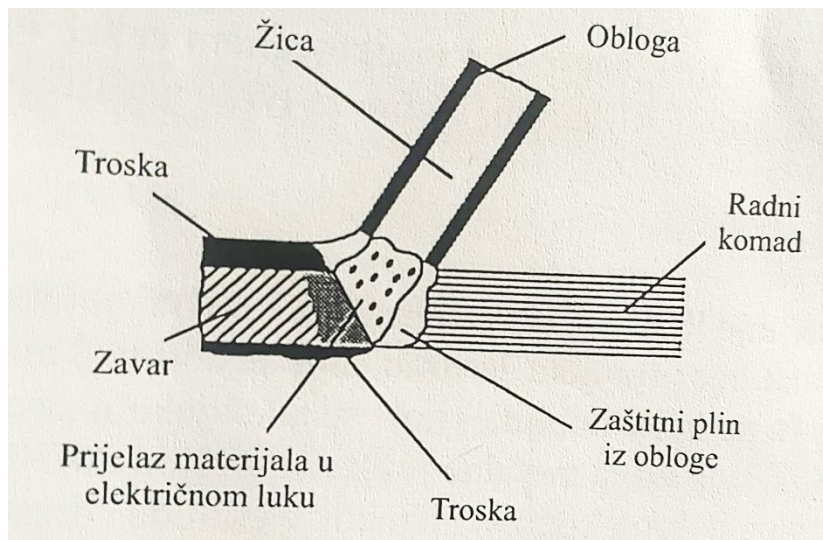
Slika 3 Shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja (Gojić, 2003)

Elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP), koristi se najčešće za sučeljeno i kutno zavarivanje koje se često mogu pronaći u brodogradnji. Uloga praška (slika 4) prilikom zavarivanja je zaštita rastaljene i očvrsnute zone od zraka, oblikovanje površine zavara, sprječavanje njegovog hlađenja, poboljšanje stabilnosti električnog luka povećanjem provodljivosti lučnog prostora. Karakteristično je što se koristi za zavarivanje vrlo velikih elemenata, što je čest slučaj u procesu gradnje broda.



Slika 4 Shematski prikaz EPP zavarivanja (Gojić, 2003)

Ručno elektrolučno zavarivanje s obloženom elektrodom (REL), je postupak zavarivanja kod kojeg toplinska energija dobivena od električnog luka tali dodatni materijal, odnosno elektrodu i osnovni materijal. Koristi se za zavare do 25 mm te se s ovom metodom mogu zavarivati nelegirani, niskolegirani i visokolegirani čelici, bakar, nikal, aluminij te njihove legure (Gojić, 2003, 57str). Osnovni elementi REL postupka zavarivanja mogu se vidjeti na slici 5.



Slika 5 Shematski prikaz REL zavarivanja (Gojić, 2003)

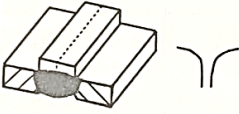
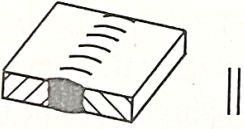
2.2. Priprema površine i postupak spajanja

Kako bi se postigli čvrsti i besprijeborni zavari, spojne površine moraju biti pravilno pripremljene prije zavarivanja. Debljina materijala i vrsta zavara koji se izvodi određuju vrstu potrebne pripreme spoja. Da bi se ostvarilo najbolje moguće okruženje zavarivanja, materijali moraju biti očišćeni, skošeni i poravnati. Nečistoće poput prašine, korozije, masnoće, boje ili vlage mogu unijeti greške poput poroznosti ili nedostatka fuzije u zavar, smanjujući njegovu kvalitetu. Za čišćenje površine i uklanjanje površinskih nečistoća koriste se žičana četka ili brušenje kao metode mehaničke obrade i kemijsko čišćenje kod kojeg se koriste razna otapala za uklanjanje ostataka poput ulja koji mogu uzrokovati probleme pri zavarivanju. Kako bi se zajamčilo potpuno prodiranje zavara kroz veće ploče, skošenje poboljšava površinu dostupnu za zavarivanje i pristup korijenu zavara. Skošnje rubova ploča pod odgovarajućim kutom može se postići brušenjem ili rezanjem plamenom, odnosno rezanje kisikom, što se često koristi za skošenje rubova većih ploča. Kako bi se zajamčilo dosljedno prodiranje zavara i ravnomjerna raspodjela naprežanja po spoju nakon zavarivanja, pravilno poravnanje spoja je vrlo važno. Predgrijavanje metala je postupak koji se provodi prije zavarivanja kako bi se smanjila mogućnost pucanja, osobito u pločama većih dimenzija ili materijalima, koji će nakon zavarivanja vjerojatnije postati kruti ili tvrdi (kao što su čelici visoke čvrstoće). Predgrijavanje čelika podrazumijeva zagrijavanje područja zavarivanje iznad temperature okoliša prije početka zavarivanja te održavanje







temperature tijekom zavarivanja (Gojić, 2003). U važnijim primjenama predgrijavanje se koristi za precizno upravljanje procesom održavanja temperature obratka.

2.3. Standardi i norme





Standardno označavanje zavarenih spojeva se provodi prema međunarodno priznatim oznakama u skladu s nacionalnim standardima. U brodogradnji se susreću razne vrste spojeva, a često su to sučeljeni i kutni spojevi. Prema pripremi osnovnog materijala, na slici 6, 7 i 8 prikazani su nazivi, simboli i shematski prikazi određenih vrsta spojeva.

Naziv spoja	Prikaz i oznaka	Primjena
Rubni spoj		Za vrlo tanke limove. Rub se pretaljuje, obično bez dodatnog materijala.
Sučeljeni I-spoj		Za tanke stijenke (2-5 mm). Kod EPP zavarivanja 4-12 mm. Zavaruje se s jedne ili s obje strane.

Slika 6 Vrste zavarenih spojeva (Gojić, 2003)

Sučeljeni V-spoj		∨	Za debljine stijenke 4-18 mm. Zavaruje se samo s jedne strane s provarom.
Sučeljeni polu V-spoj		∨	Kao kod V-spoja, na mjestima gdje s druge strane nije moguće ili ne treba uskošenje, ili za zidni položaj.
Sučeljeni Y-spoj		Y	Kao kod V-spoja, tamo gdje se ne zahtijeva potpuno provarivanje.
Sučeljeni polu Y-spoj		Y	Kao kod polu V-spoja, tamo gdje se ne zahtijeva potpuno provarivanje.
Sučeljeni U-spoj		U	Za vrlo debele materijale, deblje od 30 mm. U nekim slučajevima i kod tanjih materijala uz TIG zavarivanje korijena.
Sučeljeni J-spoj		J	Za vrlo debele materijale; tamo gdje drugu stranu nije moguće obraditi.

Slika 7 Vrste zavarenih spojeva (Gojić, 2003)

Sučeljeni X-spoj		X	Za debljine stijenke 15-40 mm, a za bakar već od 8 mm. Zavaruje se s obje strane.
Sučeljeni K-spoj		K	Kao kod X-spoja, na mjestima gdje s druge strane nije moguće iskositi rub ili u pripremi za zidni položaj. Može biti i kutni spoj.
Sučeljeni dvostruki Y-spoj		Y	Kao kod X-spoja, tamo gdje se ne zahtijeva potpuno provarivanje ili u pripremi za EPP zavarivanje.
Dvostruki polu Y-spoj		Y	Kao kod K-spoja, tamo gdje se ne zahtijeva potpuno provarivanje. Može biti i kutni spoj.

Slika 8 Vrste zavarenih spojeva (Gojić, 2003)

U nastavku su navedene neke od normi koje se koriste prilikom zavarivanja, odnosno ispitivanja zavarenih spojeva u procesu kontrole kvalitete:

ASME IX: *Welding and Brazing Qualifications* – norma koja uključuje propise koji reguliraju kvalifikaciju postupaka zavarivanja i zavarivača. Ovaj odjeljak uključuje formulaciju i ispitivanje postupaka zavarivanja i lemljenja, osiguravajući njihovo pridržavanje strogih kriterija kvalitete i sigurnosti. ASME odjeljak IX daje sveobuhvatne smjernice za utvrđivanje primjerenosti u praksi zavarivanja, jamčeći pouzdanost i strukturnu cjelovitost komponenti podložnih pritisku. Služi kao neophodan resurs u održavanju standarda potrebnih za siguran rad različitih konstrukcija i opreme.

ISO 5178 *Destructive tests on welds in metallic materials — Longitudinal tensile test on weld metal in fusion welded joints* - definira metode ispitivanja vlačnim testom za sve vrste zavarenih spojeva. Vlačno ispitivanje metoda je koja služi za određivanje mehaničkih svojstava zavara.

EN ISO 6947:2019 - *Zavarivanje i srodni postupci - Položaji pri zavarivanju* - definira položaje zavarivanja za ispitivanje i proizvodnju, za čeone i kutne zavare, u svim oblicima proizvoda. Dokument prikazuje primjere ograničenja nagiba osi zavara i rotacije površine zavara oko osi zavara za položaje zavarivanja u proizvodnim zavarima.

HRN EN ISO 3834:2021 *Quality requirements for fusion welding of metallic materials* - norma definira sveobuhvatne zahtjeve kvalitete za zavarivanje taljenjem metalnih materijala u radionicama i na mjestima postavljanja na terenu.

ISO 10863:2011 *Time-of-flight diffraction (TOFD)* - polu ili potpuno automatizirano ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva kod minimalne debljine 6 mm. Primjenjuje se na zavarene spojeve s punim prodiranjem jednostavne geometrije u pločama, cijevima i posudama, gdje su i zavareni spoj i osnovni materijal niskolegirani ugljični čelik.

3. NERAZORNE METODE ISPITIVANJA MATERIJALA

Zbog velikog broja metoda i tehnika ispitivanja bez razaranja, primjena i mogućnost detekcije grešaka su jako široki. Istovremeno cijeli proces, odnosno tehnika u procesu, ima za cilj detektirati određene vrste grešaka, određena mjerenja ili utvrditi stanje materijala, odnosno konstrukcije. Budući da se metode ispitivanja bez razaranja temelje na međudjelovanju materijala i ulazne energije ili medija s kojim materijal dolazi u kontakt, poznate su vizualna, ultrazvučna, magnetska i elektromagnetska, penetrantska te radiografska kontrola. Posebna pozornost pridaje se stručnosti osoblja za nerazorna ispitivanja zbog velike odgovornosti ispitivača, a potrebno je planirati i provoditi obvezne provjere i potvrde znanja prema važećim standardima. Posebno je važno napomenuti da je dobiveni certifikat vremenski ograničen u smislu načina, trajanja i namjene. S obzirom na intenzivan razvoj metoda i brzo širenje područja primjene, to treba uzeti u obzir.

3.1. Uvod u NDT i metode ispitivanja

Prilikom upotrebe NDT metoda potrebna je stručnost osoblja. Za kvalifikaciju i certifikaciju NDT osoblja (ISO 9712:2021; EN ISO 9712:2022) u Hrvatskoj postoje dva centra za obuku osoblja, HDKBR i CENI. Time je postignut temeljni cilj za ocjenu osposobljenosti, a to je provjera i potvrđivanje od strane nepristrane organizacije koja nema izravne koristi niti interesa za određeno ispitivanje ili rezultate kontrole pojedine tvrtke (Krstelj, 2003). Stručno osoblje se dijeli u tri stupnja, svaki stupanj podrazumijeva određenu stručnost, djelatnost i odgovornost. U prvome stupnju operater ima mogućnost provođenja NDT ispitivanja u skladu s postupkom i pod nadzorom je od strane osoba osposobljenih na višim stupnjevima. U prvome stupnju operater može odrađivati pripremu kontrole bez razaranja (KBR) opreme za ispitivanje, registraciju i klasifikaciju rezultata ispitivanja u skladu s propisanim kriterijima i izvješće. U prvome stupnju operater nije odgovoran za izbor metoda, niti za procjenu rezultata ispitivanja. Operateri drugog stupnja imaju pristup djelatnostima kao što su provođenje i nadzor svih djelatnosti nad osobama prvog stupnja, organizacija i izvještaj o rezultatima ispitivanja, priprema KBR instrukcija, ispitivanje i nadzor ispitivanja, priprema i provjera KBR opreme, izbor tehnike nerazornog ispitivanja za određenu metodu ispitivanja, definiranje ograničenja primjene odabrane metode, provođenje KBR norme i

specifikacija u KBR instrukcije, interpretacija i procjena rezultata u skladu s primijenjenim normama, propisima i specifikacijama. Operateri na razini trećeg stupnja ovlaštene su za djelatnosti: preuzimanje pune odgovornosti za ispitnu opremu, ispitni centar i osoblje, za izradu i procjenu KBR instrukcija i postupaka, interpretaciju normi, propisa, specifikacija i postupaka, definiranje određenog ispitivanja, postupaka i KBR instrukcija, provođenje i nadzor djelatnosti sa prvog i drugog stupnja.

Vizualna kontrola (EN ISO 17635) je najjednostavnija metoda kojom se mogu utvrditi nepravilnosti na površinama, također makro i mikro pogreške. Prilikom vizualne kontrole moguće se koristiti uz pomoć pomagala kao što su povećala, boroskopi, endoskopi. Na slici 9 prikazana je vizualna metoda ispitivanja.



Slika 9 Primjer vizualne metode ispitivanja s pomagalom
Izvor: <https://xweld.hr/usluge/ispitivanje-zavarenih-spojeva>

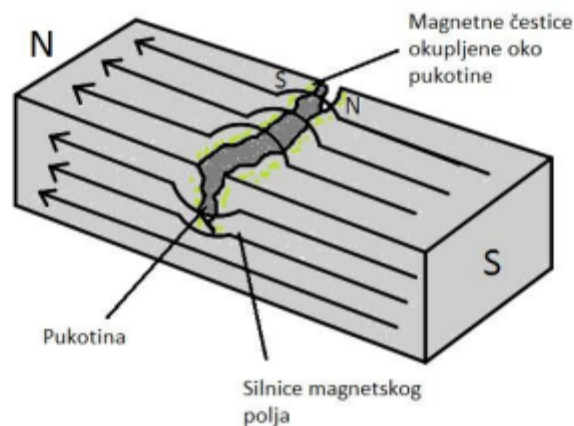
Zvučne i ultrazvučne metode ispitivanja definirane su normom po nazivu HR EN ISO 17640, a u ovome radu biti će detaljnije opisano u idućem poglavlju. Na slici 10 prikazan je primjer ispitivanja ultrazvučnom metodom.



Slika 10 Primjer ultrazvučne metode ispitivanja

Izvor: <https://www.laboratuar.com/hr/testler/mekanik-testleri/iso-5577-tahribatsiz-muayene---ultrasonik-muayene---sozluk/>

Električne metode ispitivanja rade na principu mjerenja električkog otpora, vodljivosti, tribo – električkih ili termo – električkih učinaka te zaključivanja o stanju objekta ispitivanja i pogreškama u objektu, temeljem promjena mjernih veličina. Nedostatak je što su metode ograničene na električki vodljive materijale (bakar i njegove legure, aluminij i njegove legure, srebro, željezo i čelici) (Krstelj, 2003). Magnetska metoda ispitivanja koristi magnetsko polje za otkrivanje površinskih i nepravilnosti neposredno ispod površine materijala u feromagnetnim materijalima (Jones, 2018). Uzorak se magnetizira pomoću elektromagneta ili permanentnih magneta. Na površinu uzorka nanose se feromagnetne čestice koje se privlače na nepravilnosti. Pregledava se površina uzorka pod svjetlom kako bi se otkrila i dokumentirala oštećenja. Na slici 11 prikazan je shematski primjer magnetskog ispitivanja, odnosno principa detekcije grešaka navedenom metodom.



Slika 11 Primjer magnetskog ispitivanja

Izvor: <https://core.ac.uk/download/pdf/198089039.pdf>

Radiografsko ispitivanje metalnih materijala upotrebom filma i rendgenskog ili gama zračenja (HRN EN ISO 5579) ispitivanja se dijele na radiografiju, radioskopiju, neutronska radiografiju. Ove metode omogućavaju kvalitativno i kvantitativno praćenje otkrivenih pogrešaka i nepravilnosti ispitivanog materijala. Princip rada radiografskog ispitivanja je takav da zračenje prolazi kroz objekt i stvara sliku na digitalnom mediju (filmski medij) o objektu i elementima (greškama) unutar njega. Pri tome prilikom prolaska zračenja kroz objekt dolazi do međudjelovanja zračenja i materijala objekta. Također, kao jedna od metoda ispitivanja bez razaranja koristi se metoda ispitivanja tekućim penetrantima (EN ISO 3452-3) koja je vrlo rasprostranjena zbog niske cijene korištenja te se nadovezuje na vizualnu metodu jer uz pomoć penetranta se može bolje i brže uočiti pogreške na površini. Prilikom nanošenja penetranta na površinu, penetrant prodire u pukotine i druge pogreške na površini ispitivanja te omogućuje pregled pogrešaka. Zadnja od navedenih metoda ispitivanja termografskim kamerama, koje upotrebljavaju infracrvene detektore koji pružaju informacije temeljem snimanja rasporeda temperatura na površini ispitivanog objekta. Na slici 12 prikazana je penetrantska metoda kontrole zavarenog spoja.



Slika 12 Penetrantska metoda kontrole
Izvor: <https://pondt.hr/penetrantska-kontrola/>

3.2. Ultrazvučno ispitivanje materijala

Ultrazvučno ispitivanje (UZV), ponekad poznato i kao ultrazvuk, tehnika je ispitivanja bez razaranja (NDT) koja vrlo često koristi u brodogradnji za ispitivanje i ocjenu integriteta zavara i materijala. Uz korištenje visokofrekvencijskih zvučnih valova (ultrazvuk), ova tehnologija može identificirati nepravilnosti u materijalu uključujući nemetalne uključke, šupljine i pukotine bez narušavanja integriteta elemenata i sklopova. Princip korištenja je vrlo jednostavan, iz sonde se odašilje ultrazvučni val, koji se odbija od prepreke u materijalu te se prema vremenu potrebnom da se val vrati određuje udaljenost i oblik objekta, odnosno nepravilnosti u materijalu. Materijal koji se ispituje mora provoditi zvuk (Krstelj, 2003.). Prilikom ultrazvučnog ispitivanja materijala potrebno se koristiti s ultrazvučnim uređajem koji ima ulogu da proizvodi električne impulse visokog napona i kratkog trajanja, koje piezoelektrični pretvarač u ispitnoj glavi pretvara u mehaničke oscilacije u području ultrazvuka. Potrebno je pravilno podešavanje vremenske baze uređaja kako bi se mogla odrediti dužina puta zvuka do reflektora, odnosno nepravilnosti u materijalu, kao rastojanje između emitiranog impulsa i primljenog ehoa, odnosno odziva, a time i položaj prepreke za UZ valove. Također, postoje više vrsta ultrazvučnih sonda koje se dijele prema smjeru odašiljanja i prijema ultrazvučnog snopa u odnosu na materijal ispitivanja. Koristi se i ispitivanje vrtložnim strujama za pronalaženje površinskih i pri površinskih nedostataka u

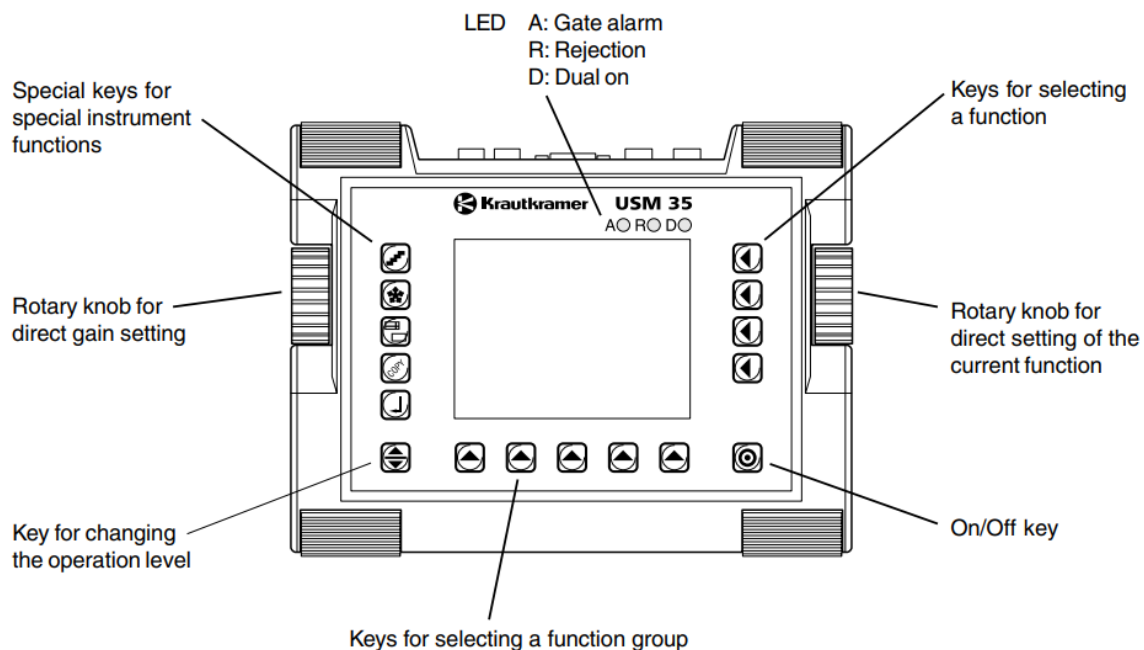
provodljivim materijalima. Standardne sonde se prema smjeru odašiljanja dijele na ravnu i kutnu sondu koje također mogu biti izvedene kao dvostruka i fokusirajuća sonda. Ravna sonda odašilje i prima ultrazvučne valove okomito na svoju izlaznu plohu, dok se kod kutne sonde se najčešće koriste kutovi od 45°, 60°, 70° i 80°.

3.3. Primjena UZV u brodogradnji

Primjena ultrazvuka kao metode neraznog ispitivanja u brodogradnji doprinosi sigurnijim i pouzdanijim plovilima pružajući preciznost, sigurnost i sposobnost otkrivanja unutarnjih grešaka koje nisu vidljive na površini. Budući da može otkriti razne probleme prije nego što postanu ozbiljni i osigurati da su brodovi strukturno zdravi, ultrazvučno ispitivanje ključan je alat u brodograđevnoj industriji u svrhu kontrole kvalitete. Ultrazvuk se koristi za pregled zavarenih spojeva kako bi se osiguralo da nema nedostataka koji bi mogli ugroziti strukturni integritet broda. Čak i na teško dostupnim mjestima, ultrazvuk može identificirati unutarnju koroziju ili stanjivanje ploča trupa i drugih metalnih komponenti. Ova metoda pomaže u određivanju debljine čelika i drugih komponenti broda kako bi se osiguralo da su u skladu sa specifikacijama i da se ne oštećuju. Korištenjem ultrazvučnim ispitivanjima trupovi brodova se ispituju kako bi se pronašli bilo kakvi materijalni nedostaci ili područja oštećenja, osobito kod starijih brodova koji su s vremenom možda dotrajali. Zavaravanje je uobičajena metoda u brodogradnji za spajanje različitih strukturnih elemenata kao što su ploče, okviri i pregrade. Cjelokupna čvrstoća i sigurnost broda uvelike ovisi o kvaliteti zavarenih spojeva. Prodirući u materijal visokofrekventnim zvučnim valovima, ultrazvučno ispitivanje olakšava pregled zavara. Dio valova reflektira se kada ti valovi dođu u kontakt s diskontinuitetom, poput pukotine ili praznine, signalizirajući problem. Tehničari mogu utvrditi točnu lokaciju, veličinu i vrstu greške u zavaru ispitivanjem tih signala i odaziva. Kako bi se dala temeljita procjena materijala i strukture broda, ultrazvučno ispitivanje (UZV) često se kombinira s drugim tehnikama ispitivanja bez razaranja (NDT). Najčešće među tim tehnikama su radiografsko ispitivanje ili X-zrake koje se koristi se za ispitivanje komponenti i zavarenih spojeva kada ultrazvuk ne može dati dovoljno detalja, dok se ispitivanje magnetskim česticama koristi za otkrivanje površinskih pukotina. Potrebno je osigurati da su svi aspekti cjelovitosti broda detaljno istraženi primjenom različitih tehnika.

4. PRIMJER ULTRAZVUČNOG ISPITIVANJA U PROCESU GRADNJE BRODA

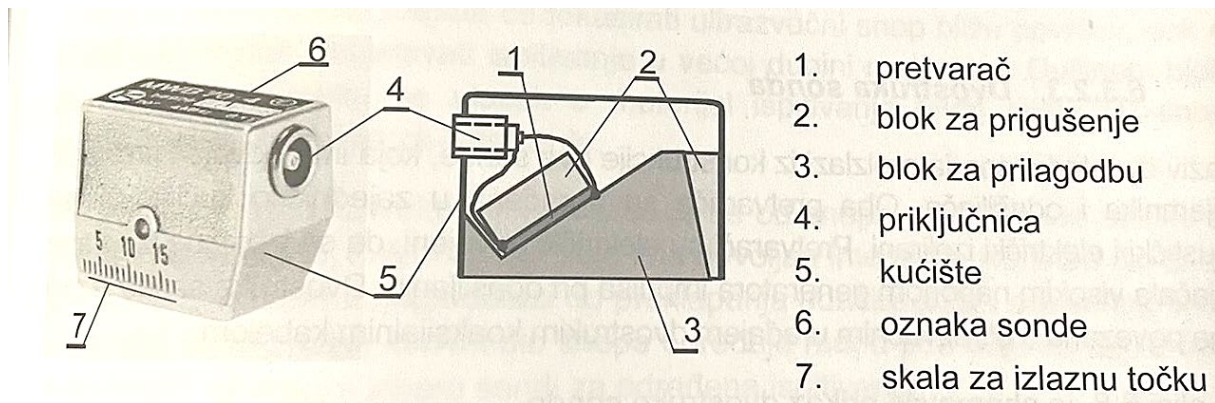
Primjer ultrazvučnog ispitivanja odrađeno je u Tehnomont brodogradilištu prema uputama i s nadzorom operatera drugog stupnja. Na početku je potrebno definirati ultrazvučni ispitni sustav po uputama za provedbu UT ispitivanja. Uređaj korišten u provedbi UT ispitivanja je Krautkramer USM 35 (slika 13). USM 35 je certificirani ultrazvučni uređaj koji se koristi za ispitivanja raznih materijala, zavara i debljina materijala. Uređaj svojim frekvencijskim rasponom od 0,5 do 20 MHz i maksimalni raspon kalibracije od 10 m (čelik). USM 35 uređaj dizajniran je za korištenje na velikim radnim komadima u mjerenjima visoke razlučivosti, a zbog svoje male težine i dimenzija te napona koji dolazi od Li-ion baterija NI2020 (10.8 V, 6.6 Ah) koje imaju mogućnost punjena, lako je prenosiv na teren što mu daje prednost i visoke mogućnosti kontrole kvalitete u raznim uvjetima.



Slika 13 Funkcije tipki uređaja USM 35

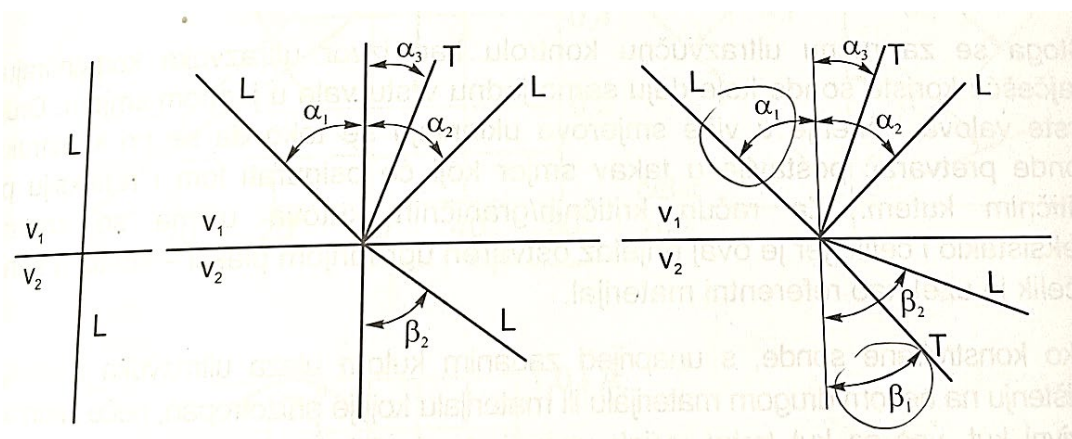
Izvor: <https://www.jwjndt.com/wp-content/uploads/2016/04/USM-35X-Operating-Manual.pdf>

Sonda korištena za ultrazvučno ispitivanje zavarenog spoja je AM4R- 8X9 – 70 (kutna sonda od 70 stupnjeva) čiji su dijelovi prikazani na slici 14.



Slika 14 Dijelovi kutne sonde

Princip rada kutne sonde je takav da se ulaz ultrazvuka pod kutom u objekt ispitivanja postiže s nagibom pretvarača pod kutom prema izlaznoj plohi pri konstrukciji sonde. Ultrazvučne valove prenosi blok za prilagodbu odnosno usmjeravanje od pretvarača do objekta. Blok za prilagodbu najčešće je izrađen od pleksistakla jer se tako postiže relativno mali ulazni kut ultrazvuka između sonde i materijala u skladu s Snellovim zakonom. Uz pomoć toga je omogućena konstrukcija sonde ulaznog kuta u čelik između 45° i 90° . Snellov zakon prikazuje poznatu pojavu lomljenja svjetlosti na granici dvaju sredstava, taj zakon se također koristi u ultrazvuku zbog toga što umjesto svjetlosti se koriste ultrazvučni valovi koji dolaze na granicu s dvaju sredstava te utječu na daljnji smjer širenja. Na ispitnoj površini dolazi do refleksije i loma ultrazvučnih valova te se reflektirani dio ultrazvučne energije uklanja blokom za prigušenje, kako se on ne bi ponovno prenosio u ispitni objekt. Kutne sonde generiraju longitudinalne, transverzalne i površinske valove, a na slici 15 prikazan je lom i refleksija ultrazvučnih valova na granici loma.



Slika 15 Lom i refleksija UZ-valova na granici loma (Krstelj, 2003)

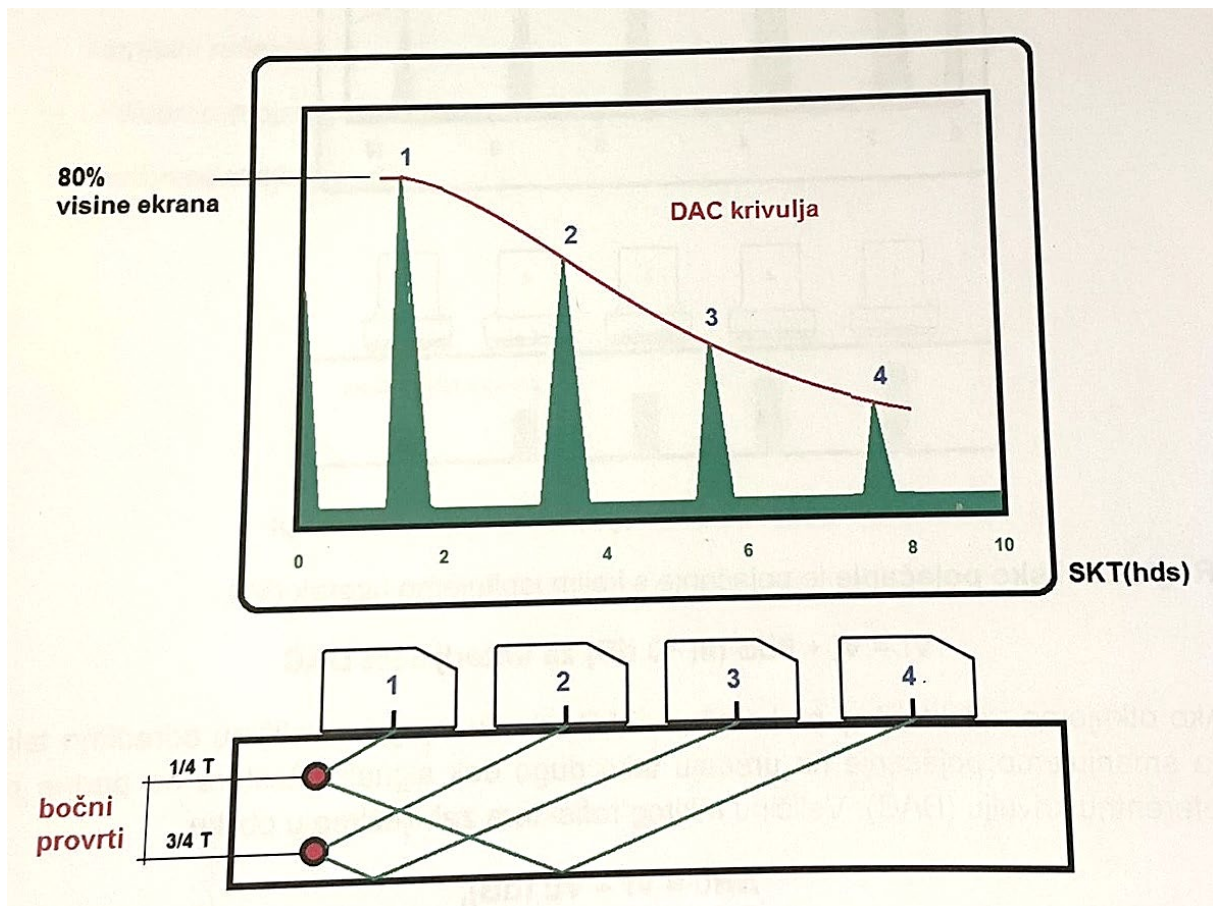
Ispitna frekvencija (mjerno područje) koja se koristi u primjeru iznosi 2 MHz i 4 MHz. Frekvencija se odabire pažljivo jer izbor frekvencije određuje duljinu ultrazvučnih valova u ispitivanom materijalu. Povećanjem frekvencije na uređaju se smanjuje valna duljina i obratno. Promjenom frekvencije ultrazvučna sonda mijenja ultrazvučni snop, povećanjem frekvencije uzrokuje se veće prigušenje ultrazvučnih valova u ispitivanom materijalu. Za spajanje kutne sonde s ultrazvučnim uređajem korišten je kabel MPKL-2.

Kontaktno sredstvo na granici kutne sonde i ispitivanog objekta je bio gel. Svrha kontaktnog sredstva je osigurati što bolji prijenos ultrazvučne energije između sonde i objekta koji se ispituje. Kontaktni gel se lako odstranjuje s ispitne površine, ne kaplje, nije korozivan, kemijski neutralan, može se koristiti na temperaturama od -20° C do +100° C. (Bubalo, 2017)

Prilikom kalibracije osjetljivosti kutne sonde korištena je DAC (eng. *distance – amplitude – correction*) metoda. Pomoću DAC standardnih kalibracijskih blokova s provrtima potrebno je napraviti DAC krivulju za kontrolu zavarenih spojeva pomoću standardnih kutnih sondi. Svaka sonda ima svoju karakterističnu DAC krivulju. Prije kalibracije potrebno je odrediti ishodišnu točku i kut sonde. Mjerno područje se računa na temelju poznate debljine uzorka (T) i jednog koraka puta zvuka prema izrazu:

$$S_B = \left(\frac{2T}{\cos \alpha} \right) * 1,25$$

Signal od bočnog provrta koji ima najveći eho potrebno je postaviti na 80 % visine ekrana te zabilježiti ostale ehoe s njihovim visinama i povezati ih u krivulju te zabilježiti osnovno pojačanje. Skica konstrukcije DAC krivulje za kutne sonde prikazana je na slici 16.



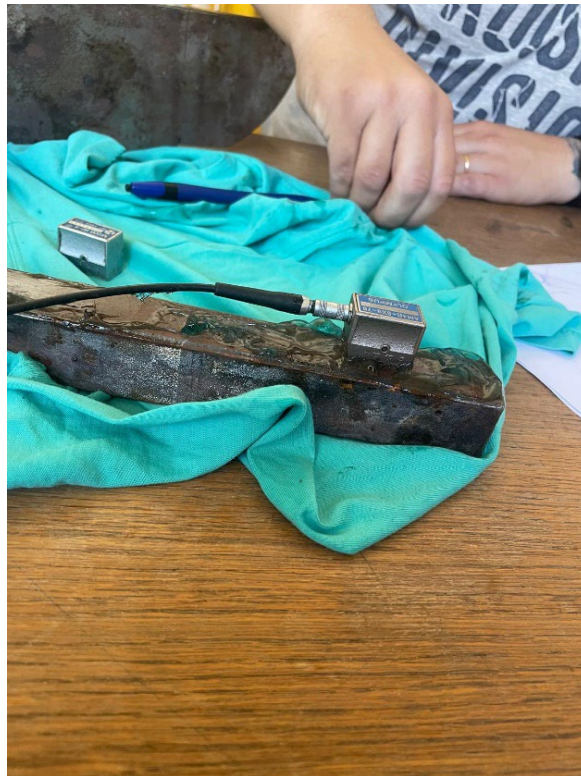
Slika 16 Izrada DAC krivulje za kutne sonde (HDKBR)

Etaloni su uzorci strogo definiranog sastava materijala, toplinske obrade, geometrijskog oblika i kvalitete površinske obrade, koji su definirani određenim standardom (Krstelj, 2003). Svaki etalon mora imati atest i dokumentaciju kojom mjerodavna organizacija potvrđuje deklarirana svojstva. Etalon debljine 25 mm korišten za kalibraciju UZV uređaja izrađen je prema normi HRN EN 12223. Referentni etalon po kojemu se kalibrira ultrazvučni sustav je V1 etalon koji je prikazan na slici 17.



Slika 17 V1 Etalon za kalibraciju UZV uređaja

Etalon IOW koristi se za provjeru geometrije i rasporeda intenziteta ultrazvučnog snopa, također je temeljni etalon ultrazvučnog sustava. Praktičan je za određivanje geometrije ultrazvučnog snopa jer omogućava osam različitih mogućnosti izravne refleksije s umjetnih uvrta za sonde standardnih kutova (Krstelj, 2003). Na osnovu toga je izrađen nestandardni blok koji se koristi u Tehnomontu za umjeravanje uređaja prikazan na slici 18. Na slici 19 vidljiv je uređaj USM 35 prilikom kalibracije sa svim podacima koji se kontroliraju za vrijeme postupka.

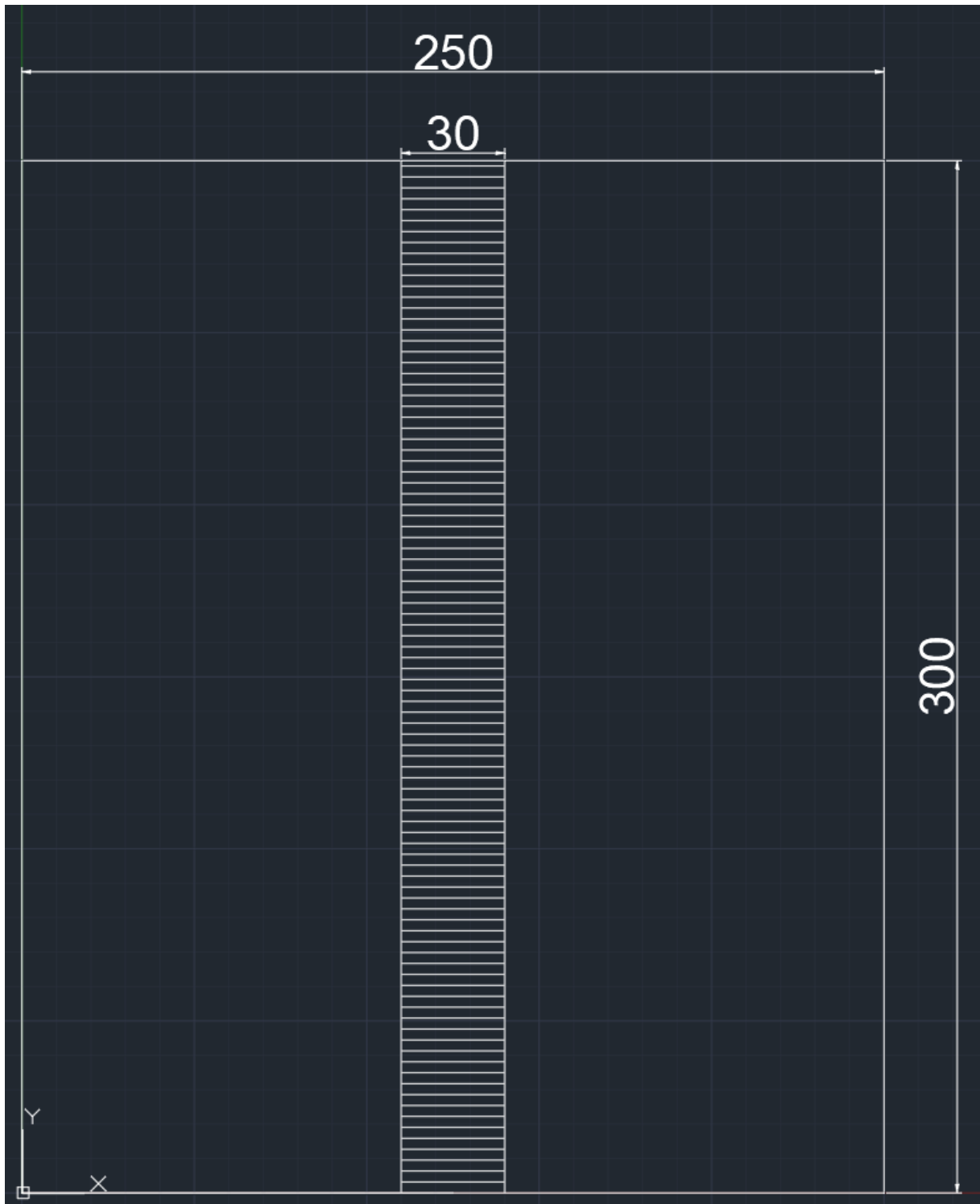


Slika 18 Nestandardni blok za umjeravanje



Slika 19 USM 35 uređaj pri kalibraciji

U idućem koraku je potrebno identificirati zadani ispitni objekt. Na slici 20 je prikazana skica ispitnog objekta s dimenzijama i zavarom.



Slika 20 Skica ispitnog objekta u programu AutoCAD

Ispitni objekt je izrađen od „GRADE A“ čelika koji se koristi i prilikom gradnje broda. Na ispitnom objektu zavaren je sučeljeni V spoj s REL tehnikom (postupak 111). Dimenzije objekta su 300 x 250 x 15 mm (duljina x širina x debljina). Važno je u izvješću ispitivanja

dokumentirati sve informacije o izvođenju ispitivanja pa tako i položaj objekta, odnosno smjer ispitivanja.

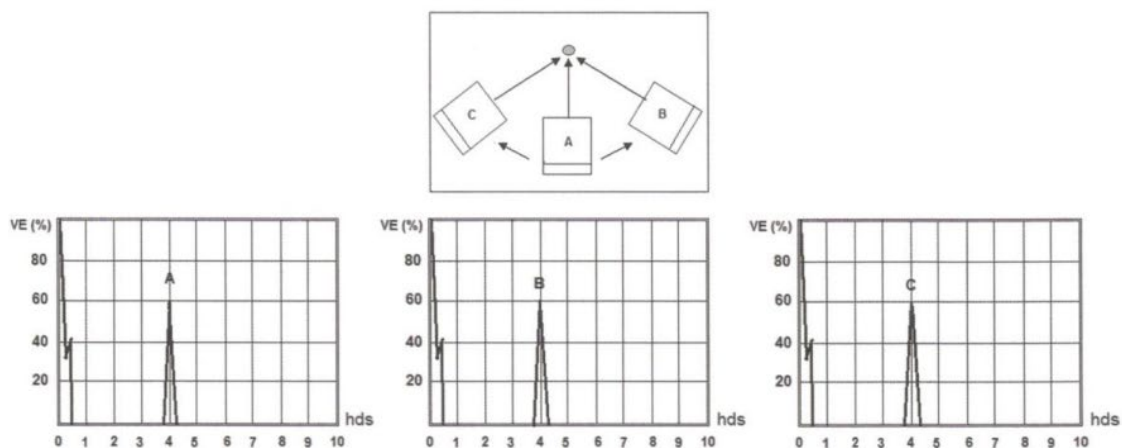
Prilikom ultrazvučnog ispitivanja zavara ispitana je samo vidljiva ploha objekta, odnosno njegovog zavara. Bilježenje indikacije s ultrazvučnog uređaja definirano je na samome ispitnom objektu s kredom kako bi se dodatno provjerile indikacije što je prikazano na slici 21. Zatim je potrebno ponovno izmjeriti duljinu indikacija uz prema uputi koja definira da ako se visina amplitude mijenja, odnosno nije uvijek jednaka u odnosu na poziciju sonde potrebno je ponoviti mjerenje. Ukoliko se amplituda mijenja u rasponu od 40 – 80% pune visine ekrana tada se zapisuje raspon amplitude. U ovome slučaju varijacije amplitude moguće je izmjeriti duljinu indikacije. Ukoliko je indikacija veća od 80% visine ekrana potrebno je oduzeti određeni broj decibela (dB) kako bi se visina indikacije spustila što bliže iznosu od 80% visine ekrana. Ukoliko je indikacija manja od 80% visine ekrana dodaje se određeni broj decibela (dB) kako bi se indikacija podigla što bliže iznosu od 80% visine ekrana.



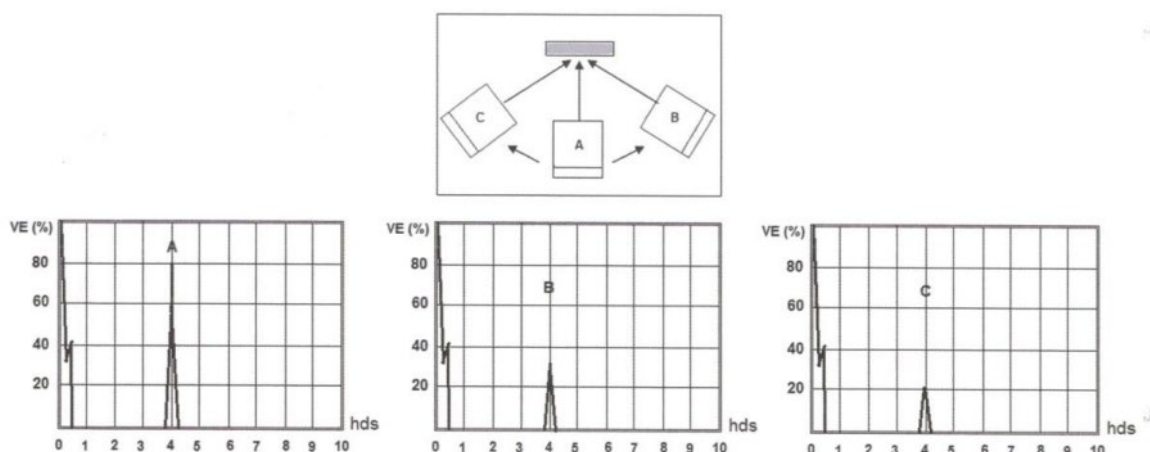
Slika 21 Ispitni objekt s pogledom na lice zavara

Ultrazvučnim ispitivanjem uzdužnog zavara ustanovljeno je više indikacija koje su okarakterizirane kao greške u zavaru prema normi HRN EN ISO 6520:2008 i EN 26520/1991. Navedene norme definiraju greške u zavarenom spoju metala izvedenog taljenjem. Prva zabilježena indikacija je greška s oznakom EN201 1 koja je prikazana u tablici za šupljine u normi HRN EN 26520. Standardizirani naziv za promatrane greške je „Plinski mjehurić – pora“ s opisom „Pojedinačni plinski uključak, mjehurić ili pora, kuglastog oblika u zavaru. Procesom ultrazvučnog ispitivanja ustanovljena je i greška nedovoljnog provara koja se prema normi HRN EN26520 označuje kao pogreška nedovoljnog provara EN402 uz opis „Nedovoljni provar je nedovoljno protaljivanje po cijelom presjeku zavarenog spoja, odnosno neprovarivanje korijena zavara.“ Na slici 25 prikazana je ploča sa strane korijena zavara, na kojoj je ustanovljena navedena greška EN402, gotovo po cijeloj duljini objekta. U ovome

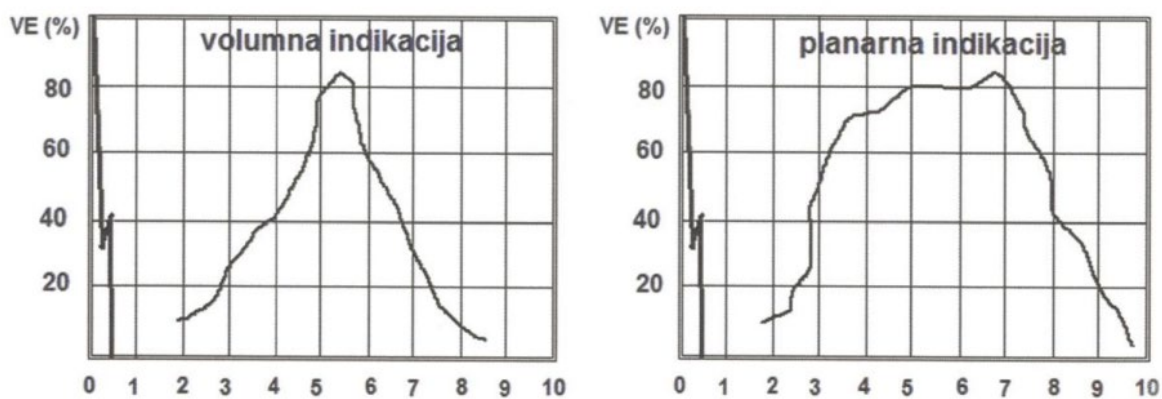
slučaju za karakterizaciju oblika reflektora koriste se tehnike skeniranja po luku na stalnom razmaku i tehnika pomicanja sonde po liniji u ravnini reflektora. Reflektori se po obliku mogu razvrstati u volumne i planarne. Razlika između volumnih i planarnih indikacija je u prikazivanju indikaciju u ovisnosti o položaju kutne sonde prilikom ultrazvučnog ispitivanja. Na slici 22 prikazana je volumna karakteristika (ako je udaljenost od sonde do reflektora iste duljine bez obzira na položaj sonde, visina ehoa će biti jednaka za slučaj A, B i C). Na slici 23 prikazana je planarna karakteristika (zakretom sonde iz položaja A u položaj B ili C eho od nepravilnosti brzo pada jer smjer snopa više ne pada okomito na nepravilnost). Slika 24 prikazuje ehodinamičku krivulju koja je ovisnost visine ehoa od položaja sonde, kod njezinog kretanja okomito ili paralelno sa osi zavarenog spoja. Kod volumnih reflektora ehodinamička krivulja nema površinu koja je karakteristična za planarne reflektore.



Slika 22 Točkasti reflektor-volumna karakteristika (Trgovčić, 2019)



Slika 23 Planarna karakteristika (Trgovčić, 2019)



Slika 24 Volumna i planarna indikacija (Trgovčić, 2019)

Ispitani zavareni spoj nije zadovoljio kriterije prihvatljivosti te prema zahtjevima normi zavarivač nije prošao osposobljavanje za zavarivanje u ovoj poziciji. Nakon provedenog ispitivanja, sve podatke je potrebno o postupku s napomenama potrebno je evidentirati u izvješću ispitivanja. Na slici 26 prikazan primjer izvješća ispitivanja ultrazvukom.



Slika 25 Ispitni objekt sa strane korijena zavara

5. ZAKLJUČAK

Primjena ultrazvučnih ispitivanja kao jedna od nerazornih metoda ispitivanja u brodogradnji predstavlja vrlo važan element osiguranja kvaliteta i sigurnosti brodskih konstrukcija. Različite metode zavarivanja u brodogradnji često dovode do unutrašnjih deformacija, koji mogu oslabiti strukturu broda, pa je pravodobno otkrivanje tih nepravilnosti od presudnog značaja. Kvalitetna priprema ispitne površine u brodogradnji omogućuje učinkovitije ultrazvučno ispitivanje, jer ravna i čista površina poboljšava preciznost mjerenja. Također, bitno je poznavati vrste zavara i spojeva koje se koriste u brodogradnji kako bi se na pravilan način pristupilo ispitivanjima. Pored toga, strogo poštivanje standarda i normi u brodogradnji osigurava sigurnost u primjeni tehnika i pouzdanost rezultata ispitivanja. NDT metode ispitivanja materijala, igraju ključnu ulogu u procesu kontrole kvaliteta, jer omogućavaju otkrivanje unutrašnjih deformacija bez oštećenja materijala. Uporaba ultrazvuka u brodogradnji je nezamjenjiva za osiguranje kvalitete konstrukcija u smislu trajnosti i sigurnosti brodova, jer ova tehnologija omogućava precizno i učinkovito otkrivanje problema u svim fazama gradnje broda, čime se smanjuju troškovi i povećava sigurnost.

LITERATURA

Bubalo, Luka. *Dijagnostika ultrazvukom*. Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje. 2017. Zagreb

“DD EKSPERT”. *Usluge Ispitivanja Materijala I Zavara Metodama Bez Razaranja, Nerazorna Ispitivanja (NDT Ispitivanja)*, 2024, dd-ekspert.hr/nerazorna-ispitivanja-ndt. pristupljeno 9 rujna. 2024.

Denetim. “*Ispitivanje Bez Razaranja*” *Denetim.com*, 2020. www.denetim.com/bs/muayene/tahribatsiz-muayene/. pristupljeno 9 rujna. 2024.

“HDKBR”. *HDKBR – „Uputa za ispitivanje ultrazvukom“*. 2005.

“Hrvatska Enciklopedija.” *Enciklopedija.hr*, enciklopedija.hr/.

Krstelj, Vjera. *Ultrazvučna kontrola*, 2003. Zagreb

Mirko Gojić, *Tehnike spajanja i razdvajanja materijala*, 2003. Sisak

“Penetrantska Kontrola | Pondt.” *Pondt D.o.o.*, 2020, pondt.hr/penetrantska-kontrola/. pristupljeno 9 rujna. 2024.

Trgovčić, Antonija. *Utjecaj NDT ispitivanja na održavanje turbinskog postrojenja. Veleučilište u Karlovcu strojarski odjel specijalistički diplomski stručni studij strojarstva*. 2024. Karlovac

USM 35X Technical Reference and Operating Manual. <https://www.jwjndt.com/wp-content/uploads/2016/04/USM-35X-Operating-Manual.pdf> pristupljeno 14 rujna 2024

Vukoja, Andrea. *Ultrazvuk I Primjena*. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku odjel za fiziku. 2017. Osijek.

POPIS SLIKA

Slika 1 Ilustracija zavarenih spojeva.....	2
Slika 2 Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja (Gojić, 2003).....	3
Slika 3 Shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja (Gojić, 2003)	4
Slika 4 Shematski prikaz EPP zavarivanja (Gojić, 2003)	4
Slika 5 Shematski prikaz REL zavarivanja (Gojić, 2003)	5
Slika 6 Vrste zavarenih spojeva (Gojić, 2003)	6
Slika 7 Vrste zavarenih spojeva (Gojić, 2003)	7
Slika 8 Vrste zavarenih spojeva (Gojić, 2003)	7
Slika 9 Primjer vizualne metode ispitivanja s pomagalom	10
Slika 10 Primjer ultrazvučne metode ispitivanja.....	11
Slika 11 Primjer magnetskog ispitivanja.....	12
Slika 12 Penetrantska metoda kontrole	13
Slika 13 Funkcije tipki uređaja USM 35	15
Slika 14 Dijelovi kutne sonde.....	16
Slika 15 Lom i refleksija UZ-valova na granici loma (Krstelj, 2003)	16
Slika 16 Izrada DAC krivulje za kutne sonde (HDKBR)	18
Slika 17 V1 Etalon za kalibraciju UZV uređaja.....	19
Slika 18 Nestandardni blok za umjeravanje.....	20
Slika 19 USM 35 uređaj pri kalibraciji	20
Slika 20 Skica ispitnog objekta u programu AutoCAD	21
Slika 21 Ispitni objekt s pogledom na lice zavara	23
Slika 22 Točkasti reflektor-volumna karakteristika (Trgovčić, 2019).....	24
Slika 23 Planarna karakteristika (Trgovčić, 2019).....	25
Slika 24 Volumna i planarna indikacija (Trgovčić, 2019).....	25
Slika 25 Ispitni objekt sa strane korijena zavara	26
Slika 26 Primjer izvješća ispitivanja ultrazvukom.....	27

SAŽETAK

Ovaj završni rad se bavi ultrazvučnim ispitivanjima s fokusom na ispitivanje zavarenih spojeva. Osim uvoda u sam postupak zavarivanja s ciljem približavanja metode i očekivanih rezultata, u radu su opisane nerazorne metode ispitivanja materijala, navedene njihove prednosti i mane te prikazani neki od primjera upotrebe. Nakon obrade teorijskog dijela teme, kao cilj ovog završnog rada provedeno je ultrazvučno ispitivanje u Tehnomont brodogradilištu gdje je na primjeru prikazan postupak pripreme i kalibracije ispitnog sustava te sam rezultat ispitivanja uz zaključak. Ispitivanje je izvršeno na čeonu zavarenom spoju čelika uz upotrebu kutne sonde. Postupak ispitivanja ultrazvukom izvršen je prema važećim standardima te iskustvu operatera u navedenom području rada.

Ključne riječi : ultrazvučna mjerenja, zavareni spoj, NDT ispitivanja

ABSTRACT

This final thesis describes ultrasonic testing with a focus on the testing of welded joints. In addition to the introduction to the welding process itself with the aim of explaining both the method and the expected results, the paper describes non-destructive material testing methods, lists their advantages and disadvantages, and shows some examples of their use. After the theoretical part of the thesis, as the goal of this final work, an ultrasonic test on welded joint was conducted in the Tehnomont shipyard, with the presentation of preparation and calibration procedure for the test system used and the result of the test itself followed by a conclusion. The test was performed on a butt-welded joint on steel specimen using an angle probe. The ultrasonic test procedure was carried out according to valid standards and the operator's experience in the specified field of work.

Key words: ultrasonic measurements, welded joint, NDT tests