

Ispitivanje kvalitete zavarenih spojeva

Balać, Nikola

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:212:819989>

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



Nikola Balać

ISPITIVANJE KVALITETE ZAVARENIH SPOJEVA

Završni rad

Pula, 2024.

ISTARSKO VELEUČILIŠTE –
UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE APPLICATE

Nikola Balać

ISPITIVANJE KVALITETE ZAVARENIH SPOJEVA

Završni rad

JMBAG: 0233009027, izvanredni student

Studijski smjer: Stručni prijediplomski studij Mehatronika

Predmet: Mjeriteljstvo i upravljanje kvalitetom

Mentor: doc.dr.sc. Vedrana Špada

Komentor: Ivan Pentek, pred.

Pula, 2024.



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisan Nikola Balać, 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

Nikola Balać



IZJAVA
o korištenju autorskog djela

Ja, Nikola Balać dajem odobrenje Istarskom veleučilištu – Università Istriana di scienze applicate, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom **ISPITIVANJE KVALITETE ZAVARENIH SPOJEVA** 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

Nikola Balać

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. METODE ZAVARIVANJA I NJIHOVE PRIMJENE | 2 |
| 3. ISPITIVANJE KVALITETE ZAVARENIH SPOJEVA | 3 |
| 3.1. Povijest ispitivanja zavarenih spojeva | 3 |
| 3.2. Primjena ispitivanja zavarenih spojeva | 5 |
| 3.3. Standardi i norme za ispitivanje zavarenih spojeva | 7 |
| 3.4. NDT metode ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva | 10 |
| 3.4.1. Vizualna inspekcija | 11 |
| 3.4.2. Radiografsko ispitivanje..... | 12 |
| 3.4.3. Ultrazvučno ispitivanje | 12 |
| 3.4.4. Magnetsko ispitivanje..... | 13 |
| 3.4.5. Tekući penetranti | 14 |
| 3.5. Primjer ispitivanja kvalitete zavarenog spoja NDT metodama | 15 |
| 4. MAKROSKOPSKO ISPITIVANJE ZAVARENOG SPOJA PREMA HRN EN ISO 17639 17 | |
| 4.1. Važnost makroskopskog ispitivanja zavarenog spoja | 18 |
| 4.2. Makroskopsko ispitivanje uzoraka zavarenog spoja u laboratoriju | 20 |
| 5. RASPRAVA | 27 |
| 6. ZAKLJUČAK | 29 |
| LITERATURA | 30 |
| SAŽETAK | 32 |
| SUMMARY | 32 |

1. UVOD

Zavarivanje je ključna tehnologija u modernoj industriji koja omogućava spajanje materijala u čvrste i trajne spojeve. Kroz povijest, zavarivanje je evoluiralo od jednostavnih metoda do sofisticiranijih tehnika koje se koriste u različitim industrijskim sektorima koji uključuju građevinarstvo, automobilsku industriju, brodogradnju i zrakoplovstvo. Proces zavarivanja koristi toplinu i/ili tlak za stvaranje trajnih spojeva između materijala, obično metala, osiguravajući strukturalni integritet i dugovječnost proizvoda (Smith & Brown, 2020). Zavareni spojevi često su kritični dijelovi konstrukcija koje podliježu velikim opterećenjima, vibracijama i ekstremnim uvjetima te je stoga njihova kvaliteta i pouzdanost od vitalnog značaja (Jones, 2018). Bilo kakve pogreške u procesu zavarivanja mogu imati ozbiljne posljedice, uključujući smanjenje sigurnosti i performansi krajnjeg proizvoda. Ispitivanje zavarenih spojeva postaje važno za prepoznavanje i prevenciju potencijalnih kvarova koji mogu utjecati na funkcionalnost i sigurnost (Lee & Kim, 2019).

U ovom radu istražiti će se različite metode ispitivanja zavarenih spojeva koje su ključne za osiguranje kvalitete i sigurnosti zavarenih konstrukcija. Metode ispitivanja mogu se podijeliti na nerazorne metode (NDT) i metode sa razaranjem, a svaka od njih ima specifične primjene i prednosti. Razmotriti će se također standardi i norme koje reguliraju ispitivanje zavarenih spojeva. Nerazorna ispitivanja omogućuju ispitivanje zavara bez njegovog uništavanja, što je ključno za očuvanje funkcionalnosti komponenti, dok razorne metode zahtijevaju izradu uzoraka iz zavarenih elemenata i njihovo uništavanje kako bi se procijenila kvaliteta zavara.

Osim metoda nerazornih ispitivanja zavarenih spojeva koje se provode na terenu (na licu mjesta), vrlo važne metode koje slijede norme za ispitivanje kvalitete zavarenih spojeva su: ISO 5178 Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Uzdužno vlačno ispitivanje metala zavara zavarenih spojeva nastalih taljenjem i ISO 17639 Razorna ispitivanje zavara metalnih materijala – Makroskopsko ispitivanje zavara koje se provode u laboratorijima i za koje treba uzeti uzorak, odnosno izraditi ispitne epruvete.

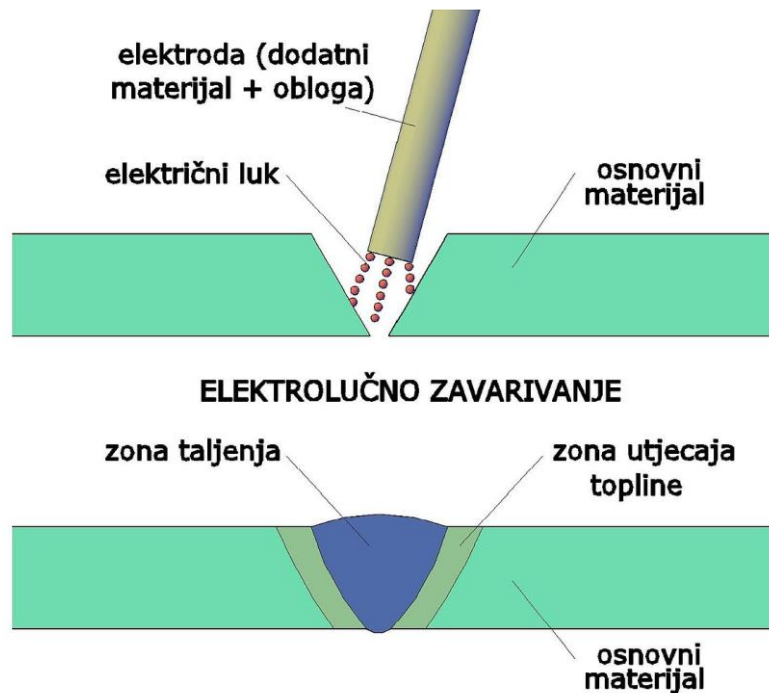
Ovim radom pokazujem značaj različitih metoda ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva te prema ispitnoj normi HRN EN ISO 17639 odraditi makroskopsko ispitivanje u laboratoriju na stvarnom uzorku iz industrije. Makroskopsko ispitivanje je dio standardne procedure kod ispitivanja postupaka zavarivanja i atestiranja zavarivača i neizostavna metoda ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva. Cilj rada je pružiti sveobuhvatan uvid u metode ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva, te istaknuti važnost primjene odgovarajućih standarda i normi u osiguravanju kvalitete i sigurnosti zavarenih konstrukcija.

2. METODE ZAVARIVANJA I NJIHOVE PRIMJENE

Zavareni spoj predstavlja cjelinu ostvarenu zavarivanjem, koja obuhvaća skrutnuti dio metala šava stvoren taljenjem, te rubne dijelove zavarenih komada. Zavarivanje je jedna od metoda spajanja materijala u nerastavljiv spoj. Zavarivanje se temelji na spajanju elemenata kroz taljenje ili pritisak. U postupcima zavarivanja taljenjem, zbog uvjeta atmosfere koja nastaje između elektrode i osnovnog materijala (metala) metal se u području spoja zagrijava do temperature tališta, te se zatim spaja s dodatnim materijalom, koji može biti u obliku elektrode ili dodan izvana. U postupcima zavarivanja pritiskom, metal se spaja bez taljenja, primjenom pritiska ili udarca. Postoji više metoda ostvarivanja zavarenih spojeva koje se međusobno razlikuju prema korištenoj opremi, elektrodama, zaštitnim plinovima, temperaturama i slično. Također se razlikuju i prema primjeni. MIG zavarivanje (eng. *Metal Inert Gas*) metoda koristi zaštitni plin kako bi spriječila oksidaciju metala zavara. MIG zavarivanje je poznato po svojoj brzini i jednostavnosti, što ga čini pogodnim za automobilski sektor i zavarivanje tankih materijala (Doe, 2021). TIG zavarivanje (eng. *Tungsten Inert Gas*) koristi volframovu elektrodu i inertni plin za stvaranje preciznih i visokokvalitetnih zavarenih spojeva. TIG zavarivanje često se koristi za legure i materijale visoke čvrstoće zbog svoje sposobnosti da proizvede visokokvalitetne spojeve (Smith & Brown, 2020).

Elektrolučno zavarivanje je metoda koja koristi električnu energiju za stvaranje topline koja spaja materijale. Pogodna je za zavarivanje velikih debelih materijala i često se koristi u brodogradnji i industrijskim aplikacijama (Jones, 2018). Na slici 1 prikazano je

ostvarivanje zavarenog spoja metodom elektrolučnog zavarivanja te su prikazani svi elementi zavarenog spoja (zona taljenja i zona utjecaja topline ZUT).



Slika 1. Zavareni spoj

Izvor: Autor Mmarre - Vlastiti crtež, Javno vlasništvo

<https://hr.wikipedia.org/w/index.php?curid=332555>

3. ISPITIVANJE KVALITETE ZAVARENIH SPOJEVA

3.1. Povijest ispitivanja zavarenih spojeva

Razvoj metoda ispitivanja zavarenih spojeva prati se unatrag nekoliko desetljeća. Početne metode uključivale su jednostavne vizualne inspekcije koje su bile ograničene u sposobnosti otkrivanja unutarnjih defekata. Razvoj radiografskih tehnika sredinom 20. stoljeća omogućio je detaljno ispitivanje unutarnjih struktura zavarenih spojeva (International Organization for Standardization, 2019). Prvi standardi za ispitivanje zavarenih spojeva pojavili su se u ovom razdoblju, pružajući osnovne smjernice za industriju. S dolaskom novih tehnologija, kao što su ultrazvučno ispitivanje i magnetsko ispitivanje, sposobnost otkrivanja i analize defekata značajno je poboljšana. Slika 2 prikazuje ultrazvučnu metodu ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva.



Slika 2. Ultrazvučno ispitivanje kvalitete zavarenog spoja

Izvor: <https://www.bigagroup.com/ndt-kontrola-zavarenih-spojeva>

Razumijevanje teorije metoda ispitivanja zavarenih spojeva ključno je za pravilnu primjenu i interpretaciju rezultata. Radiografsko ispitivanje se temelji na principu prolaska rendgenskih zraka kroz materijal, stvarajući slike koje pokazuju varijacije u gustoći materijala (ISO, 2019). Ultrazvučno ispitivanje koristi zvučne valove za detekciju defekata. Zvuk se širi kroz materijal, a reflektirani valovi ukazuju na postojanje i identifikaciju unutarnjih nepravilnosti (Lee & Kim, 2019). Magnetsko ispitivanje koristi magnetska polja za otkrivanje promjena u magnetskim svojstvima materijala uzrokovanih prisustvom defekata (ISO, 2020). Penetrantni testovi su utemeljeni na načelu kapilarnosti, gdje tekućina koja prodire u pore i pukotine na površini uzorka omogućava vizualizaciju defekata nakon aplikacije razvijачa penetranta (Jones, 2018). To su sve zapravo u početku bile nerazorne metode (eng. NDT, *non-destructive testings*) ispitivanja zavarenih spojeva koje su se mogle provesti na licu mjesta bez razaranja, bez rastavljanja konstrukcije i bez zaustavljanja proizvodnog pogona.

Tek su norme poput ISO 5178 i HRN EN ISO 17639 uvele strukturirane pristupe za makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva, osiguravajući dosljednost i pouzdanost u industrijskoj praksi (ISO, 2020) korištenjem razornih ispitivanja zavarenih spojeva na umjerenoj ispitnoj opremi u akreditiranim ispitnim laboratorijima. Osim toga, u laboratoriju se provode razorna ispitivanja na posebno pripremljenim ispitnim epruvetama zavarenih spojeva. Ispitivanja razaranjem koja se provode su

vlačno ispitivanje, ispitivanje savijanjem, a za šavne cijevi i ispitivanje tlačenjem na univerzalnoj statičkoj kidalici. Provode se i ispitivanja udarne radnje loma pomoću Charpy-jevog bata i ispitivanja tvrdoće (Vickersova i Brinellova metoda).

Zavarivanje je neizostavan postupak spajanja u industriji modernog doba. Njegova primjena je široka i raznovrsna, a uključuje brodogradnju kroz izgradnju brodova i drugih plovnih objekata, strojogradnju kroz izradu strojeva, alata i opreme, zatim građevinarstvo u izgradnji mostova, zgrada i drugih konstrukcija kao i proizvodnju automobila u izradi karoserija i drugih dijelova automobila. Također u izgradnji cjevovoda za transport nafte, plina i drugih tekućina. Prisutno je i u djelatnostima popravaka i odražavanja strojeva, konstrukcija i drugih metalnih predmeta.

3.2. Primjena ispitivanja zavarenih spojeva

Ispitivanje zavarenih spojeva primjenjuje se u različitim industrijama kako bi se osigurala kvaliteta i sigurnost. U brodogradnji, kvaliteta zavarivanja je ključna za izradu sigurnih i dugotrajnih brodskih konstrukcija. Defekti u zavarivanju mogu uzrokovati ozbiljne probleme poput propuštanja i strukturnih oštećenja (Smith & Brown, 2020). U građevini, zavareni spojevi koriste se za spajanje čeličnih greda i stupova. Osiguranje čvrstih spojeva otpornih na opterećenja ključno je za stabilnost građevinskih objekata (Lee & Kim, 2019). U automobilskoj industriji, kvaliteta zavarenih spojeva utječe na sigurnost vozila. Ispitivanje se koristi kako bi se provjerila čvrstoća i otpornost zavarenih spojeva na stresne uvjete i vibracije (Doe, 2021). Gdje god se u proizvodnji izrađuju zavareni spojevi, odnosno gdje se materijali spajaju zavarivanjem, propisano je i njihovo ispitivanje prema strogim normama i zahtjevima kvalitete.

Različiti metali zavaruju se različitim metodama i u različitim uvjetima. Zavarivanje aluminija predstavlja veći izazov u odnosu na zavarivanje čelika. Ipak, zahvaljujući svojim prednostima, aluminij je sve češći materijal u industriji. Postoje različite metode koje se koriste za postizanje kvalitetnih zavara, a najčešće tehnike uključuju MIG, MAG I TIG zavarivanje. Prednosti upotrebe aluminija nalaze se u njegovim karakteristikama materijala, jer ima malu masu i otporan je na koroziju. Zavarivanjem aluminijskih elemenata mogu se izraditi lake i trajne konstrukcije otporne na koroziju. Značajno je lakši od mnogih drugih metala te ga to čini idealnim za primjene kod kojih je ključno

smanjenje težine poput automobilske industrije. Radi visoke električne provodljivosti zavareni aluminij idealan je za električne provodnike i toplinske izmjenjivače. Prednosti zavarivanja aluminija su i u estetskom izgledu, jer aluminij ima atraktivan srebrnkast izgled metalnog sjaja, pa se često koristi u dekorativne svrhe. Zavareni spojevi aluminija često su vrlo estetski privlačni, posebno kada se koristi tehnika poput TIG zavarivanja koja omogućuje čiste i precizne zavare. Aluminij je također i reciklabilan te ne gubi kvalitetu što ga čini ekološki prihvatljivim materijalom. Najčešći izazovi na koje se nailazi kod zavarivanja aluminija su njegov oksidacijski sloj s obzirom da aluminij brzo stvara vrlo tvrd oksidacijski sloj koji otežava stvaranje kvalitetnog zavara. Oksid se mora ukloniti prije zavarivanja. Zatim, problem predstavlja i njegova visoka toplinska vodljivost, jer aluminij brzo odvodi toplinu, što može otežati postizanje dovoljno visoke temperature za stvaranje kvalitetnog spoja te može uzrokovati deformaciju materijala. Nailazi se i na poroznost, stoga ako se zavareni spoj ne zaštiti adekvatno, u njemu mogu nastati šupljine ili pore radi zarobljenih plinova što oslabljuje spoj. Također, aluminij je sklon stvaranju naprezanja tokom procesa zavarivanja, što može prouzročiti pucanje materijala i nižu čvrstoću spoja. I naposljetku, obzirom da je aluminij visoko reflektivan, to može otežati zavarivanje, naročito kod korištenja laserskih tehnika.

Najčešće metode zavarivanja aluminija su:

- TIG zavarivanje (eng. *Tungsten Inert Gas*), precizna metoda koja omogućava čist i kvalitetan zavareni spoj. Kod TIG zavarivanja koristi se netopiva volframova elektroda kao i argon, inertni plin koji štiti zavareni spoj te omogućava precizniju kontrolu topline i visokokvalitetne spojeve. Kontrola temperature je ključna kako bi se minimizirale deformacije i naprezanja;
- MIG zavarivanje (eng. *Metal Inert Gas*), koristi inertni plin radi sprječavanja oksidacije te omogućuje brzo zavarivanje s dobrom kontrolom temperature. Brža metoda od TIG zavarivanja, ali uz inertni plin za zaštitu potrebna je i posebna žica za zavarivanje;
- Plazma zavarivanje kod kojeg se koristi električni luk za pregrijavanje plinova i stvaranje struje plazme koja je nevjerojatno vruća i visoko koncentrirana unutar malog područja. Koncentrirani plamen omogućava precizno rezanje i zavarivanje aluminija.

Izbor metode za zavarivanje aluminija ovisi o potrebnim karakteristikama zavara. Unatoč svim izazovima, pravilna priprema površine, kontrola temperature i korištenje odgovarajućih tehnika vrlo su važni u postizanju kvalitetnih zavara.

Zavarivanje inoxa, iako slično zavarivanju čelika, ima svoje specifičnosti koje je potrebno uvažiti za postizanje optimalnih rezultata. Zahtjeva posebnu pažnju zbog specifičnih svojstava ovog materijala kao što je osjetljivost na pregrijavanje, što može dovesti do promjene boje i smanjenja otpornosti na koroziju. Najčešće vrste inoxa su AISI 30, popularna opcija koja ima dobru opću otpornost na koroziju, AISI 316 često korištena u nautici te ima poboljšanu otpornost na soli i kemikalije te AISI 321 koja ima visoku otpornost na temperaturu i koroziju. Metode zavarivanja inoxa koje se koriste su TIG metoda, idealna za tanke materijale i visokokvalitetne zavare, zatim MIG/MAG kao i REL zavarivanje koje su brže metode, dobre su za deblje materijale i manje zahtjevne konstrukcije.

3.3. Standardi i norme za ispitivanje zavarenih spojeva

Postoji mnoštvo standarda i normi za ispitivanje kvalitete zavarenih spojeva. Neki od njih su:

HRN EN ISO 17640: Nedestruktivno ispitivanje - Ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva. Ovaj standard definira metode i opremu za ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva. Opisuje se postupak kalibracije opreme, priprema površine, izvođenje ispitivanja i interpretacija rezultata. Standard se koristi za otkrivanje unutarnjih nepravilnosti u zavarenim spojevima, kao što su pukotine, šupljine i nemetalni uključci. Prednosti ultrazvučnog ispitivanja su brzina, jednostavnost i mogućnost korištenja na raznim materijalima. Nedostaci su potreba za osposobljenim osobljem i poteškoće u interpretaciji rezultata za složene geometrije.

HRN EN ISO 3452-1: Nerazorno ispitivanje -- Ispitivanje penetrantima . Ovaj standard definira metode i opremu za penetrantnu kontrolu zavarenih spojeva. Opisuje se postupak čišćenja površine, nanošenje penetranta i razvijanja te interpretacija rezultata. Penetrantna kontrola se koristi za otkrivanje površinskih nepravilnosti u zavarenim spojevima, kao što su pukotine, poroznost i neprovari. Prednosti penetrantne kontrole su osjetljivost na površinske nepravilnosti i mogućnost korištenja

na raznim materijalima. Nedostaci su potreba za pripremom površine i ovisnost o iskusnom operateru.

HRN EN ISO 5579: Nedestruktivno ispitivanje - Radiografsko ispitivanje - Metalni materijali. Ovaj standard definira metode i opremu za radiografsko ispitivanje zavarenih spojeva. Opisuje se postupak izrade radiografija, interpretacija rezultata i zaštitne mjere. Radiografsko ispitivanje se koristi za otkrivanje unutarnjih i površinskih nepravilnosti u zavarenim spojevima. Prednosti radiografskog ispitivanja su sposobnost otkrivanja različitih tipova nepravilnosti i mogućnost korištenja na raznim materijalima. Nedostaci su skupa oprema, izloženost operatora zračenju i poteškoće u interpretaciji rezultata.

AWS D1.1: Structural Welding Code – Steel. Ovaj standard definira zahtjeve za dizajn, izradu i ispitivanje zavarenih konstrukcija od čelika. Standard obuhvaća niz tema, uključujući kvalifikaciju zavarivača, postupke zavarivanja i metode ispitivanja. AWS D1.1 je široko korišten standard u industriji za zavarivanje čeličnih konstrukcija.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Ovaj američki standard definira zahtjeve za dizajn, izradu i ispitivanje kotlova i posuda pod tlakom. ASME Boiler and Pressure Vessel Code se sastoji od različitih dijelova, a svaki se bavi specifičnim aspektima kotlova i posuda pod tlakom. Standard obuhvaća niz tema, uključujući materijale, konstrukciju, zavarivanje, ispitivanje i nedestruktivno ispitivanje. ASME Boiler and Pressure Vessel Code je široko korišten standard u industriji za izradu kotlova i posuda pod tlakom.

EN ISO 17635, Nerazorno ispitivanje zavara -- Opća pravila za metalne materijale europski standard koji definira metode za vizualnu kontrolu zavarenih spojeva. Standard opisuje terminologiju, opremu i postupak za vizualnu kontrolu. EN ISO 17635 se koristi za otkrivanje površinskih nepravilnosti u zavarenim spojevima, kao što su pukotine, poroznost i neprovari. Prednosti vizualne kontrole su jednostavnost, brzina i nepotrebnost za skupom opremom. Nedostaci su ograničenost na površinske nepravilnosti i ovisnost o iskusnom operateru.

Osim prethodno navedenih standarda, postoji širok spektar relevantnih standarda koji se koriste za ispitivanje zavarenih spojeva, ovisno o specifičnim materijalima, metodama ispitivanja i industrijskim aplikacijama:

HRN EN ISO 17635:2017. Nedestruktivno ispitivanje – Penetrantska kontrola – Opća načela, pruža osnovna pravila za izvođenje penetrantske kontrole, koja se koristi za otkrivanje površinskih oštećenja, poput pukotina ili poroznosti. Ovaj standard je dio šire serije koja pokriva različite aspekte penetrantskog ispitivanja, uključujući ispitivanje materijala i opreme.

AWS D1.3: Structural Welding Code - Stainless Steel and Nickel Alloy Welding (AWS D1.3: Structural Welding Code - Stainless Steel and Nickel Alloy Welding) - Ovaj američki standard se koncentrira na zahtjeve za zavarivanje konstrukcija od nehrđajućeg čelika i legura nikla. AWS D1.3 dopunjuje standard AWS D1.1 koji je specifičan za čelične konstrukcije.

ISO 5579 pod nazivom Nedestruktivno ispitivanje – Radiografsko ispitivanje metalnih materijala pomoću filma i X- ili gama zraka – Osnovna pravila (Non-destructive testing — Radiographic testing of metallic materials using film and X- or gamma rays — Basic rules). Ovaj standard opisuje osnovna pravila za radiografsko ispitivanje koristeći film.

ISO 9712: Standard za kvalifikaciju i certificiranje osoblja za nerazarajuće metode.

ASME IX: Welding and Brazing Qualifications (ASME IX: Welding and Brazing Qualifications) - Ovaj američki standard se bavi kvalifikacijama postupaka zavarivanja i nagrizanja te osposobljavanjem zavarivača. Kvalifikacija postupaka obuhvaća ispitivanja kako bi se demonstriralo da određeni postupak zadovoljava definirane standarde.

ISO 5178 (Destructive tests on welds in metallic materials — Longitudinal tensile test on weld metal in fusion welded joints)) - Ovaj europski standard definira metode ispitivanja vlačnom snagom za različite tipove zavarenih spojeva. Ispitivanje vlačnim testom je ključna metoda za određivanje mehaničkih svojstava zavara.

Standardi igraju ključnu ulogu u osiguranju kvalitete i pouzdanosti zavarenih konstrukcija. Izbor relevantnog standarda ovisit će o specifičnim materijalima, metodama ispitivanja i industrijskim aplikacijama. Koristeći se dostupnim resursima, mogu se pronaći standardi koji se najviše odnose na specifične potrebe za ispitivanjem zavarenih spojeva. Spomenuti standardi i norme su samo neki od mnogih koji se koriste za ispitivanje zavarenih spojeva. Izbor relevantnog standarda ovisi o vrsti spoja, materijalu, metodi ispitivanja i specifičnim zahtjevima projekta. Važno je koristiti se

standardima i normama kako bi se osigurala kvaliteta i pouzdanost zavarenih konstrukcija. Postoje i upute i propisi koje su izdale certifikacijske kuće posebno za neku od industrija, poput pravila Bureau Veritas-a za brodogradnju.

3.4. NDT metode ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva

Tri glavna razloga za ispitivanje kvalitete zavarenih spojeva koja su važna su sigurnost, pouzdanost i ekonomičnost. Zavarivanje se često koristi u izgradnji kritične infrastrukture poput mostova, zgrada i tlačnih posuda. Loša kvaliteta zavarenog spoja može dovesti do kvarova koji ugrožavaju ljudske živote i stvaraju materijalnu štetu. Ispitivanje pomaže identificirati potencijalne probleme i spriječiti takve situacije. Zavarivanje se primjenjuje u proizvodnji strojeva, opreme i drugih mehaničkih komponenti. Kvaliteta zavarenog spoja utječe na opterećenja koja konstrukcija može izdržati, a time i na njenu trajnost i pouzdanost. Ispitivanje osigurava da zavari ispunjavaju potrebne performanse i mogu izdržati očekivana opterećenja tijekom radnog vijeka konstrukcije. Troškovi popravka ili zamjene konstrukcije zbog loše kvalitete zavara mogu biti veliki. Ispitivanje omogućava otkrivanje nedostataka u ranoj fazi, čime se izbjegavaju daleko skuplji popravci kasnije. Osim toga, kvalitetni zavari produžavaju vijek trajanja konstrukcije, što rezultira dodatnim uštedama. Radi svega navedenog NDT metode imaju nezamjenjivu ulogu u ispitivanju kvalitete zavarenih spojeva.

Metode nerazornih ispitivanja (NDT) ključne su za razumijevanje značaja i načina ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva. Za svaku NDT metodu, u nastavku rada, dan je detaljan opis postupka, korištenih materijala i opreme, te specifičnih tehnika koje omogućuju precizno ispitivanje zavarenih spojeva, a sve prema relevantnim ispitnim normama, standardima, uputama i propisima. Za potrebe kontrole kvalitete korišteni su u primjerima različiti materijali i oprema specifični za svaku metodu ispitivanja. Materijali uključuju čelike (konstrukcijski čelici, legure), aluminijske legure i nikal-ploče, dok su korišteni instrumenti uključivali rendgenske cijevi, ultrazvučne pretvornike, magnetske uređaje, tekuće penetrante i njihove razvijače. Osim navedenih NDT metoda neizostavna je i laboratorijska metoda opisana normom ISO 5178 koja je sastavni dio ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva u laboratoriju. Prema krovnoj normi za ispitivanje zavarenih spojeva metalnih materijala ISO 17639 na zavarenim

spojevima se osim vlačnog i ispitivanja savijanjem provodi i ispitivanje tvrdoće te makroskopska i mikroskopska analiza i to pri ispitivanju postupka zavarivanja, atestaciji zavarivača i pri kontroli kvalitete ostvarenog zavarenog spoja.

3.4.1. Vizualna inspekcija

Vizualna inspekcija je osnovna metoda ispitivanja koja se koristi za otkrivanje površinskih defekata (pora, pukotina). Ova metoda uključuje pregled zavarenih spojeva golim okom ili uz pomoć povećala i mikroskopa (ISO, 2020). Površina zavarenih spojeva čisti se od nečistoća kao što su korozija, ulje i prašina. Pregledava se površina uzorka koristeći povećalo ili mikroskop, tražeći nepravilnosti poput pukotina, korozije ili nepravilnih spojeva. Svi uočeni nedostaci bilježe se i dokumentiraju uz pomoć fotografija i zapisnika (Smith & Brown, 2021). Prednosti vizualne kontrole su jednostavna i brza metoda, kao i niski troškovi i zahtjevi za opremom. Nedostaci su ograničena sposobnost otkrivanja unutarnjih nedostataka. Na slici 3 prikazana je provedba vizualne inspekcije zavarenog spoja.



Slika 3. Vizualna inspekcija zavarenog spoja

Izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Vizualna_kontrola

3.4.2. Radiografsko ispitivanje

Radiografsko ispitivanje koristi rendgenske zrake za stvaranje slika unutarnjih struktura zavarenih spojeva. Ova metoda omogućuje detekciju unutarnjih nedostataka i oštećenja kao što su pukotine, poroznost i nekompletno zavarivanje (Jones, 2018). Postupak se sastoji od pripreme uzorka koji se postavlja između rendgenske cijevi i detektora. Površina uzorka mora biti ravna i čista. Zatim rendgenske zrake prolaze kroz uzorak i stvaraju sliku na filmskom mediju ili digitalnom senzoru. Slike se analiziraju kako bi se identificirali nedostaci. Detektirane nepravilnosti dokumentiraju se i procjenjuju (ISO, 2019). Prednosti su sposobnost otkrivanja unutarnjih defekata kao i visoka preciznost i detaljnost slika. Nedostaci su visoki troškovi i potreba za posebnom opremom i potrebna zaštita od zračenja. Slika 4 prikazuje radiografsko ispitivanje zavarenog spoja.



Slika 4. Radiografsko ispitivanje zavarenog spoja

Izvor: <https://www.gozetim.com/hr/muayene/tahribatsiz/radyografik-muayene-%28rt%29/>

3.4.3. Ultrazvučno ispitivanje

Ultrazvučno ispitivanje koristi visokofrekventne zvučne valove za otkrivanje unutarnjih defekata u zavarenim spojevima. Metoda omogućuje detekciju defekata poput pukotina i poroznosti (Lee & Kim, 2019). Površina uzorka mora biti pripremljena i

očišćena. Primjenjuje se posebni gel ili mast za poboljšanje prijenosa ultrazvučnih valova. Ultrazvučni pretvornik emitira zvučne valove u uzorak. Valovi se reflektiraju od nepravilnosti i detektiraju pomoću prijemnika. Reflektirani valovi analiziraju se na monitoru ultrazvučnog uređaja kako bi se identificirali defekti. Rezultati se dokumentiraju (Smith & Brown, 2021). Prednosti su sposobnost detekcije različitih vrsta nedostataka kao i visoka preciznost. Nedostaci su potreba za kvalitetnom pripremom površine uzorka.

3.4.4. Magnetsko ispitivanje

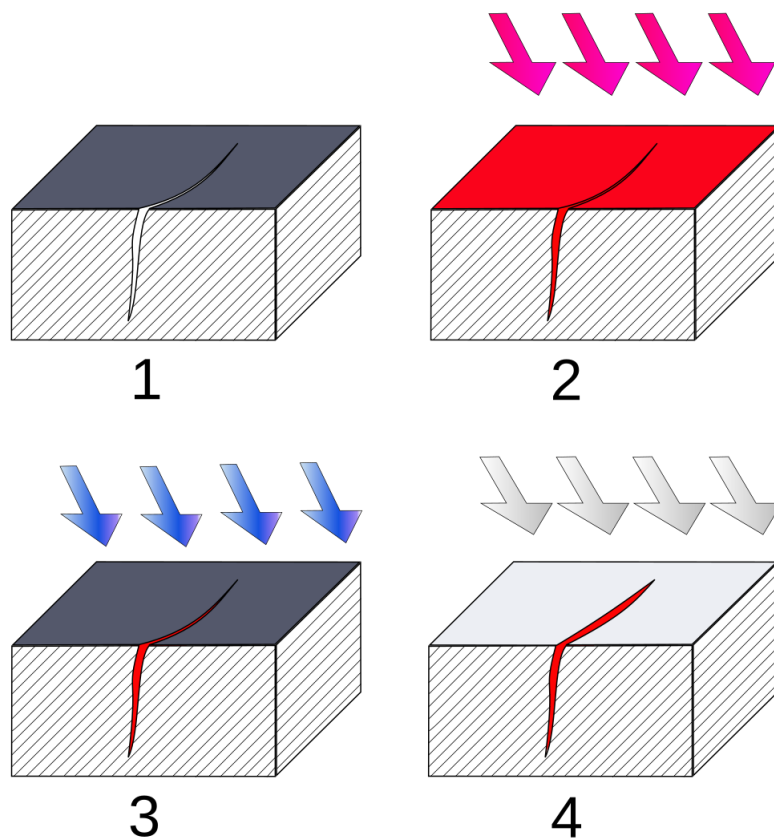
Magnetsko ispitivanje koristi magnetska polja za otkrivanje površinskih i blago ispod površinskih nepravilnosti u feromagnetnim materijalima (Jones, 2018). Uzorak se magnetizira pomoću elektromagneta ili permanentnih magneta. Na površinu uzorka nanose se feromagnetne čestice koje se privlače na oštećenja. Pregledava se površina uzorka pod svjetlom kako bi se otkrila i dokumentirala oštećenja. (ISO, 2020). Prednosti su što je to brza metoda za otkrivanje površinskih nepravilnosti, jednostavna je i relativno ekonomski isplativa. Nedostaci su ograničenje na feromagnetnim materijalima i nepotpuna detekcija ispod površinskih oštećenja. Na slici 5 prikazano je magnetsko ispitivanje zavarenih spojeva.



Slika 5. Magnetsko ispitivanje zavarenog spoja

3.4.5. Tekući penetranti

Penetrantni testovi koriste tekući penetrant za otkrivanje površinskih defekata. Ova metoda omogućuje vizualizaciju defekata koji su inače teško uočljivi (Lee & Kim, 2019). Tekući penetrant se nanosi na površinu uzorka i ostavlja da prodre u pukotine. Višak penetranta se uklanja s površine uzorka. Na površinu se zatim nanosi razvijatelj koji omogućava vizualizaciju oštećenja koji su prodrli u površinske pore. Defekti se vizualiziraju i dokumentiraju, obično uz pomoć povećala (Smith & Brown, 2021). Prednosti su visoka osjetljivost na površinske nepravilnosti kao i ekonomska isplativost, Nedostatak je ograničenost samo na površinska oštećenja. Ispitivanje tekućim penetrantom sa svim koracima ilustrirano je na slici 6.



Slika 6. Koraci ispitivanja materijala tekućim penetrantom

Izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Penetrantsko_iskipivanje

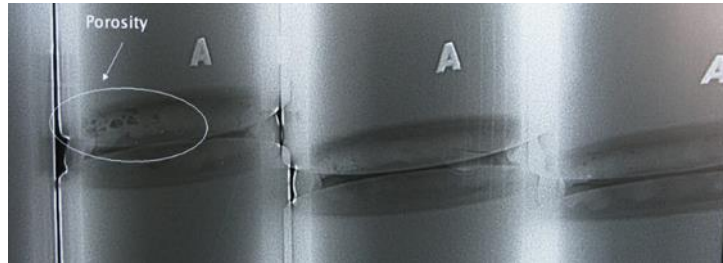
3.5. Primjer ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva NDT metodama

Prema literaturi NDT ispitivanja daju osnovne informacije o kvaliteti zavarenog spoja na licu mjesta. S obzirom na opisane prednosti i nedostatke, idealno je kada u proizvodnom postrojenju ili pogonu postoji mogućnost korištenja i kombiniranja više metoda. Uzorak se pritom ne reže i ne mora se odnijeti u laboratorij već se direktno na samoj konstrukciji vrše ispitivanja od strane educiranih operatera sa specifičnom opremom te se gotovo trenutno izdaje izvještaj ispitivanja i dobivaju važne informacije o integritetu ostvarenog spoja. Time se proizvodnja ne zaustavlja i kontrola kvalitete je upravo tamo gdje je najpotrebnija, pri samoj izradi elemenata i konstrukcija. Osoba koja provodi testiranje može biti djelatnik proizvodnog pogona ili vanjska tvrtka koja se bavi NDT ispitivanjima. Primjer obrađen u ovom radu zavareni je spoj niskolegiranog čelika S355 ostvaren MIG zavarivanjem kao dio konstrukcije trupa broda. Tijekom vizualne inspekcije, različiti defekti su uočeni, uključujući pukotine, koroziju i nepravilnosti u zavarivanju. Pukotine su najčešće otkrivene duž spojeva, dok su manji defekti poput korozije uočeni na površini zavarivačkih spojeva (Smith & Brown, 2021). U uzorku su identificirane površinske pukotine širine 0,2 mm, smještene duž zavarivačkog spoja te su pronađeni su tragovi korozije u neposrednoj blizini zavarivačkog spoja. Rezultati vizualne inspekcije uzorka A iz literature prikazani su u tablici 1.

Tablica 1: Primjer rezultata vizualne inspekcije zavarenog spoja

| Uzorak | Tip defekta | Lokacija | Širina/Površina |
|--------|-------------|----------|-----------------|
| A | Pukotina | Spoj | 0,2 mm |
| A | Korozija | Površina | |

Radiografsko ispitivanje otkrilo je unutarnje defekte kao što su poroznost i nekompletno zavarivanje. Slike su prikazale različite varijacije u gustoći materijala, što ukazuje na prisutnost defekata (Jones, 2018). Na slici 7 prikazana je radiografska snimka uzorka iz literature na kojoj se može uočiti poroznost u središnjem dijelu zavarivačkog spoja te je detektiran nekompletno zavareni spoj koji zahtijeva dodatno istraživanje.



Slika 7: Radiografska snimka uzorka

Izvor: <https://atslab.com/wp-content/uploads/2019/11/Radiographic-Weld-Inspections-Banner.jpg>

U tablici 2 prikazani su rezultati radiografskog ispitivanja uzorka iz literature.

Tablica 2. Primjer rezultata radiografskog ispitivanja uzorka zavarenog spoja

| Uzorak | Tip defekta | Lokacija |
|--------|-----------------------|---------------|
| A | Poroznost | Središnji dio |
| A | Nepotpuno zavarivanje | Spoj |

Ultrazvučno ispitivanje identificiralo je razne unutarnje defekte, uključujući pukotine i poroznost. Defekti su uspješno detektirani na različitim dubinama u materijalu (Lee & Kim, 2019). U uzorku su detektirane pukotine na dubini od 5 mm i pronađena je poroznost u unutarnjim slojevima zavarenog spoja.

Magnetsko ispitivanje otkrilo je površinske defekte poput pukotina i nepravilnosti na feromagnetnim materijalima (Jones, 2018). Uočene su površinske pukotine u blizini ruba zavarivačkog spoja te su identificirane nepravilnosti uzrokovane neadekvatnim pripremanjem površine.

Penetrantni testovi omogućili su uočavanje površinskih defekata kao što su pukotine i pore. Rezultati su prikazani na temelju boje razvijaača (Lee & Kim, 2019). U uzorku iz primjera detektirane su površinske pukotine i pore te su uočene nepravilnosti na rubovima zavarivačkih spojeva.

4. MAKROSKOPSKO ISPITIVANJE ZAVARENOG SPOJA PREMA HRN EN ISO 17639

Ispitivanje kvalitete zavarenih spojeva je ključno za osiguranje sigurnosti, pouzdanosti i dugovječnosti konstrukcija u različitim industrijskim granama poput građevinarstva, brodogradnje, energetike i proizvodnje strojeva. Makroskopsko ispitivanje, kao dio sveobuhvatnog procesa kontrole kvalitete, igra važnu ulogu u ovom kontekstu.

Norma HRN EN ISO 17639 (naslovna stranica prikazana na slici 8) odnosi se na makroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva. Ova norma pruža smjernice za pripremu, pregled i procjenu makroskopskih uzoraka zavarenih spojeva. U njoj su definirani postupci za uzimanje uzoraka zavarenih spojeva, uključujući rezanje, brušenje i poliranje uzorka kako bi se dobila čista površina za pregled. Uzorci se često tretiraju kemijskim ili elektrolitskim postupcima kako bi se naglasila struktura zavarene zone i osnovnog materijala. Ovaj proces se naziva nagrivanje. Uzorak se pregledava pod mikroskopom, ali na način koji omogućuje makroskopski pregled, što znači kako se obično koristi povećanje koje je dovoljno da se jasno vidi cjelokupna struktura zavarenog spoja, ali bez prelaska u mikroskopski nivo detalja. Prema normi, definirani su kriteriji za ocjenjivanje kvalitete zavarivanja, uključujući prepoznavanje grešaka kao što su pore, pukotine, nepravilnosti u obliku zavara, uključujući i drugi nedostaci koji se mogu pojaviti na zavarenom spoju. Dane su i smjernice za dokumentiranje nalaza, uključujući fotografije ili skenove uzoraka, bilježenje vrsta i lokacija grešaka, kao i kriteriji za ukupnu ocjenu kvalitete zavarenog spoja. Norma je namijenjena osiguravanju da zavari budu pravilno ocijenjeni u smislu kvalitete i sigurnosti, što je ključno za osiguranje integriteta zavarenih konstrukcija.

English Version

**Destructive tests on welds in metallic materials - Macroscopic
and microscopic examination of welds (ISO 17639:2003)**

Essais destructifs des soudures sur matériaux métalliques -
Examens macroscopique et microscopique des
assemblages soudés (ISO 17639:2003)

Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an
metallischen Werkstoffen - Makroskopische und
mikroskopische Untersuchungen von Schweißnähten (ISO
17639:2003)

This European Standard was approved by CEN on 8 August 2013.

CEN members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the CEN-CENELEC Management Centre or to any CEN member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN member into its own language and notified to the CEN-CENELEC Management Centre has the same status as the official versions.

CEN members are the national standards bodies of Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, Former Yugoslav Republic of Macedonia, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey and United Kingdom.



EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG

Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels

Slika 8. Naslovna stranica norme HRN EN ISO 17639

4.1. Važnost makroskopskog ispitivanja zavarenog spoja

Makroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva pruža uvid u cjelokupnu strukturu spoja bez potrebe za složenim mikroskopskim analizama. Makroskopskim ispitivanjem mogu se otkriti greške poput nepravilnog taljenja, loše penetracije, poroznosti, pukotina i uključaka, što je ključno za osiguranje kvalitete zavara. U usporedbi s mikroskopskim tehnikama, makroskopsko ispitivanje omogućuje bržu i jednostavniju provjeru većeg broja uzoraka. Omogućuje analizu općeg oblika zavarenog spoja, kao i njegove

homogenosti. Pregledom makroskopske strukture zavara može se ocijeniti kvaliteta postupka zavarivanja, uključujući parametre poput brzine zavarivanja, temperature i tehnike koja je korištena. Loše odabrana tehnika ili loši parametri zavarivanja često se mogu otkriti na makroskopskoj razini. Makroskopsko ispitivanje omogućuje inženjerima koji rade u kontroli kvalitete da usporede stvarni zavareni spoj s projektiranim ili normiranim zahtjevima, što je ključno za usklađenost s tehničkim crtežima i specifikacijama. U konačnici, makroskopsko ispitivanje daje brzu, relativno jednostavnu i pouzdanu metodu za detekciju nedostataka te osigurava da zavaren spoj zadovoljava potrebne kriterije kvalitete.

Prema normi ISO 17639, izvještaj o makroskopskom ispitivanju zavarenih spojeva treba sadržavati određene ključne elemente koji osiguravaju da su svi aspekti ispitivanja dokumentirani i evaluirani. Također, norma definira kriterije na temelju kojih se procjenjuje kvaliteta zavara. Moraju se zapisati detalji o uzorku (materijal, dimenzije, način rezanja uzorka) te se treba dati identifikacija položaja i orijentacije zavara u odnosu na uzorak. Opisuje se postupak rezanja, brušenja i poliranja uzorka. Iznose se detalji o korištenim tehnikama nagrizanja (kemijska sredstva, koncentracije, trajanje i uvjeti). Zapisuju se uvjeti pod kojima je ispitivanje provedeno, uključujući povećanje koje je korišteno tijekom pregleda te se navodi vrsta i model opreme korištene za ispitivanje (npr. mikroskop).

Detaljni opis makroskopske strukture zavarenog spoja, uključujući sve uočene greške uz identifikaciju i lokaciju svih nepravilnosti, poput pukotina, poroznosti, uključaka, loše penetracije ili nepravilnog oblikovanja zavara sastavni je dio izvještaja o provedenom makroskopskom ispitivanju.

Fotodokumentacija se sastoji od fotografija ili skenova zavarenih spojeva s označenim greškama i nedostacima, ako su prisutni. Opisuje se svaka slika s naglaskom na uočene karakteristike ili nepravilnosti.

Ocjena kvalitete zavara daje se na temelju utvrđenih kriterija te se iznosi zaključak o tome zadovoljava li zavareni spoj tražene standarde ili ne. Mogu se dati i preporuke za daljnje postupke ako je potrebno (npr. popravak, ponavljanje zavarivanja).

Kriteriji za ocjenjivanje zavara u normi ISO 17639 uključuju homogenost i oblik zavara, što znači kako zavareni spoj mora imati ujednačen i pravilan oblik bez nepravilnosti u geometriji. Zavareni spoj mora pokazati odgovarajuću dubinu penetracije kroz cijelu

debljinu spoja, bez nepotpune fuzije ili korijenskih grešaka. Neprihvatljive greške uključuju pukotine, poroznost, uključke (npr. troska ili oksidi), udubljenja, ili prekomjerne šupljine. Norma ili upute mogu specificirati dopuštenu veličinu, količinu i raspodjelu određenih vrsta nepravilnosti (npr. maksimalna veličina pora ili pukotina). Spojevi trebaju biti dobro poravnati, bez vidljivih odstupanja u osi zavarenih dijelova i smiju imati minimalne dopuštene deformacije i distorzije nakon zavarivanja, kako bi se osigurala funkcionalnost spoja.

Zavareni spoj je zadovoljio zahtjeve norme ako ispunjava sve gore navedene kriterije, uključujući:

- odsutnost neprihvatljivih grešaka ili njihovo minimalno prisustvo unutar dopuštenih granica,
- pravilnu penetraciju i homogenost zavara,
- zadovoljavajući geometrijski oblik i minimalne deformacije.

Zavareni spoj nije zadovoljio zahtjeve norme ako:

- postoje nepravilnosti koje premašuju dopuštene granice (pukotine, poroznost, loša penetracija),
- geometrija zavara je nepravilna ili postoji vidljiva distorzija,
- postoje znakovi nedostatka fuzije ili nepotpune penetracije.

Kvaliteta zavara se konačno procjenjuje na temelju usporedbe rezultata ispitivanja sa zahtjevima specificiranim u tehničkim dokumentima, crtežima ili drugim relevantnim normama. Ako zavareni spoj zadovoljava sve tražene zahtjeve, smatra se prihvatljivim. Ako ne zadovoljava, mora se poduzeti korektivne mjere, što može uključivati popravak zavara ili ponavljanje zavarivanja.

4.2. Makroskopsko ispitivanje uzoraka zavarenog spoja u laboratoriju

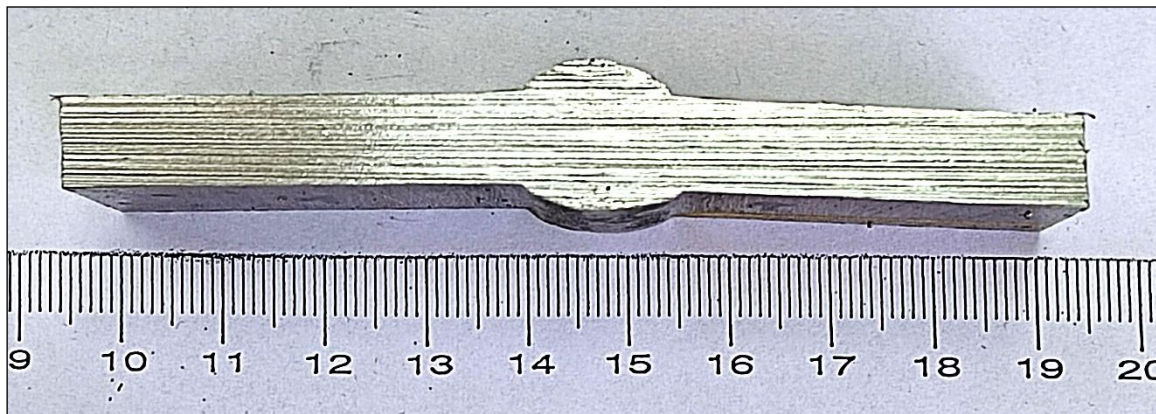
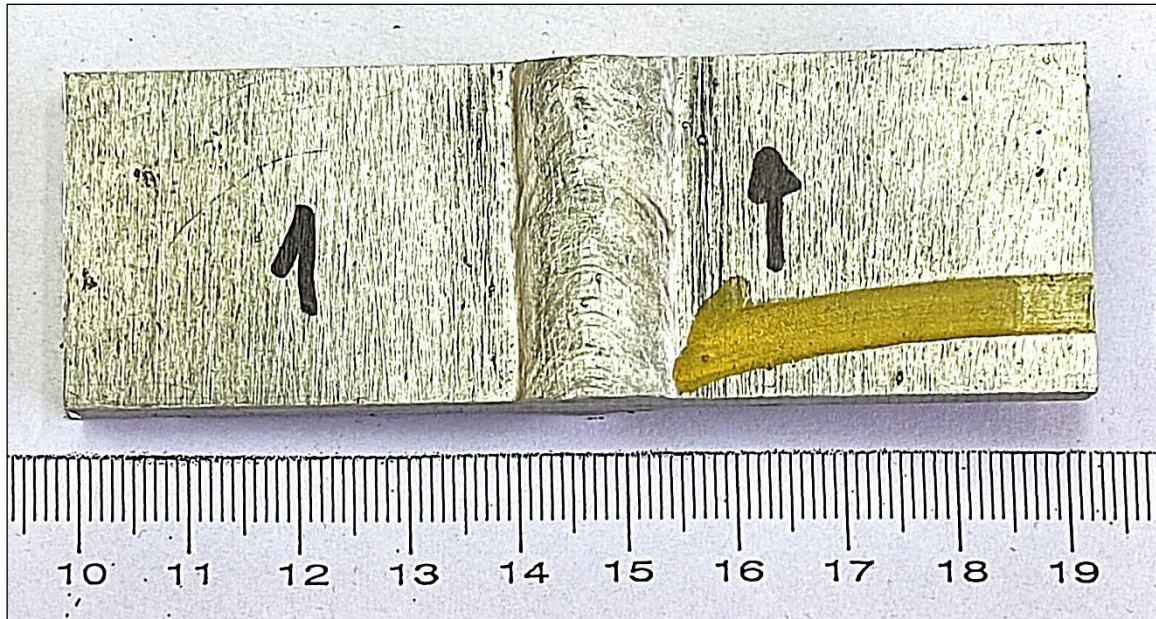
Od tvrtke koja se bavi brodogradnjom srednjih brodova u laboratoriju Centra za istraživanje materijala METRIS zaprimljeno je tri uzorka zavarenih spojeva izvedenih na aluminiju u svrhu provedbe ispitivanja kvalitete, odnosno makroskopske analize

prema normi ISO 17639. Predmet ispitivanja je sučeljeni spoj s pripremom V-žlijeba. Oprema na kojoj se provodilo makroskopsko ispitivanje je Optički stereomikroskop Olympus SZX10 (slika 9) u Centru za istraživanje METRIS.

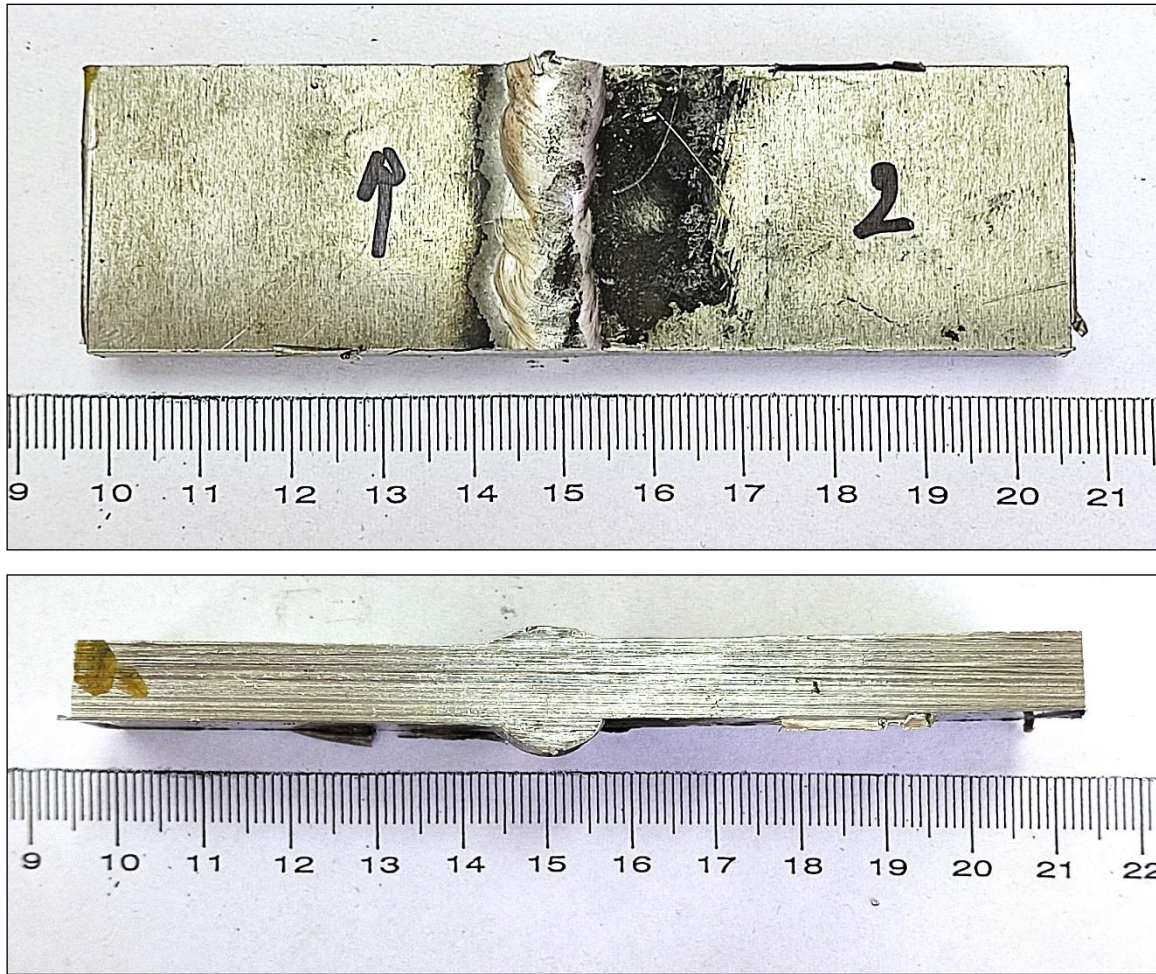


Slika 9. Optički stereomikroskop Olympus SZX10

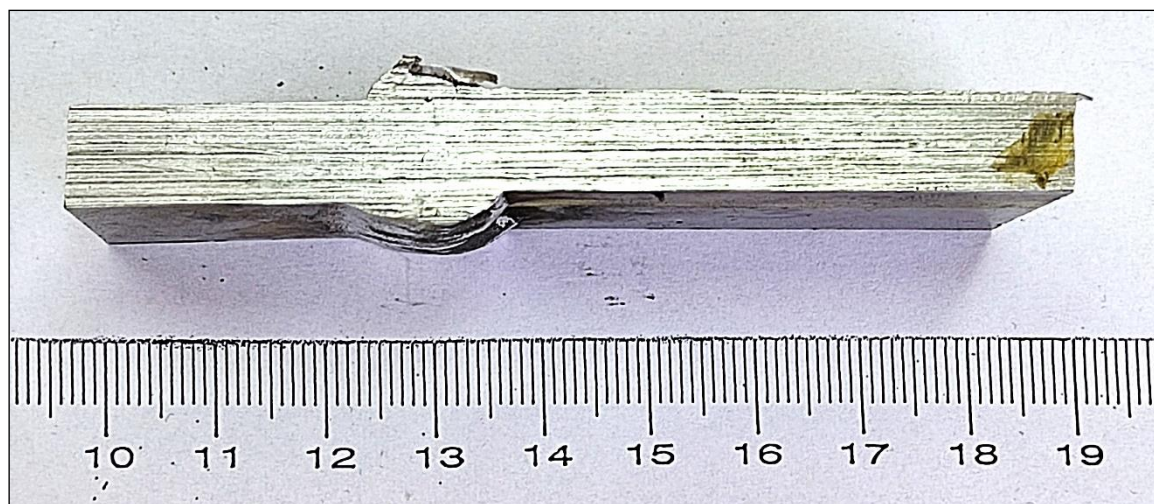
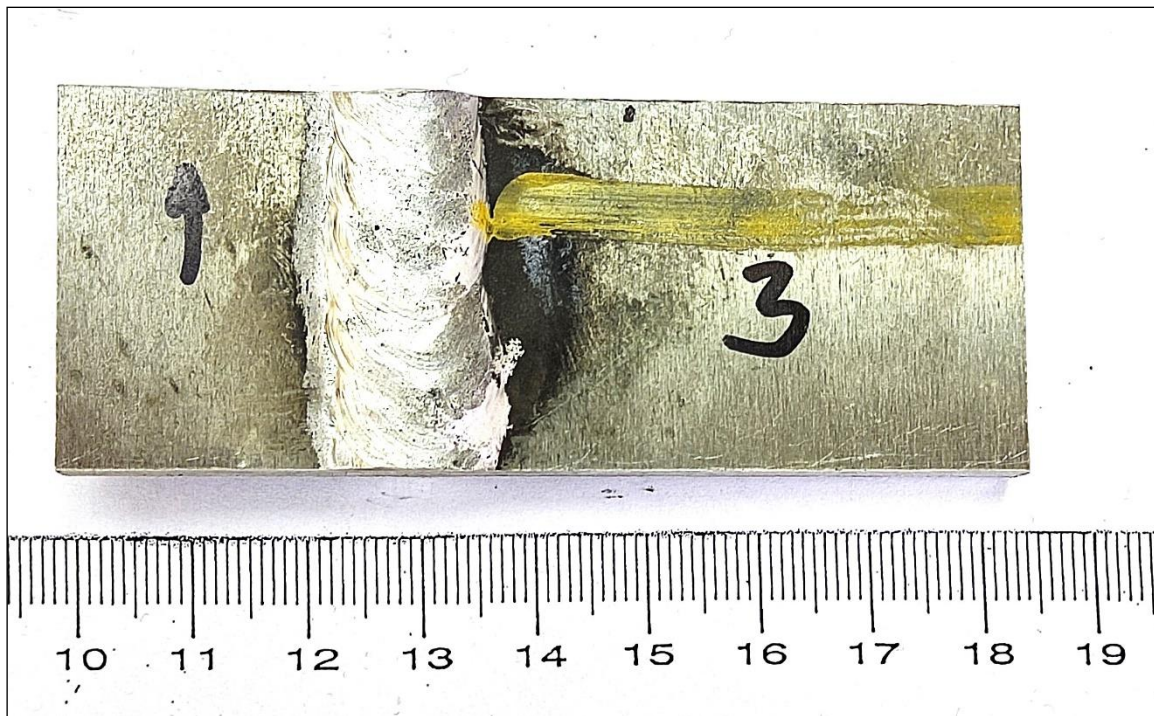
Uzorke donose klijenti iz industrije, ali ih priprema laboratorij. Priprema uzorka za makroskopsko ispitivanje sastojala se od preciznog brušenja na stroju za automatsko brušenje i poliranje STRUERS LABO POL. Uzorci se po zaprimanju u laboratorij fotografiraju uz mjernu skalu. Fotografije dostavljenih uzoraka prikazane su na slikama 10, 11 i 12. Nakon fotografiranja, uzorci se označavaju. Uzorci su označeni prema broju radnog naloga i oznakama klijenta 2024/12-1, 2024/12-2 i 2024/12-3.



Slika 10. Fotografije uzorka 2024/12-1



Slika 11. Fotografije uzorka 2024/12-2



Slika 12. Fotografije uzorka 2024/12-3

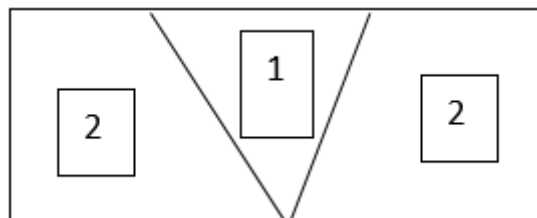
Rezultati makroskopskog ispitivanja prikazuju se tek nakon nagrizanja uzorka po završenom brušenju. Nagrizanje se provodi prema recepturi dostupnoj u literaturi laboratorija, a ona ovisi o materijalu. U toj recepturi ovisno o vrsti materijala navedena je reagens (otopina) koju treba pripremiti te vrijeme koliko je treba ostaviti da reagira s metalnim materijalom nakon što se nanese na svježe brušenu površinu. Za legure aluminija najčešće se koristi otopina Kellerovog reagensa koja daje dobre rezultate nagrizanja. Ostavlja se da reagira s metalom oko 20-tak sekundi uz stalno promatranje.

Kellerova otopina koristi se za nagrivanje aluminija i njegovih legura kako bi se otkrila mikrostruktura metala pod mikroskopom. Ova otopina sastoji se od mješavine kiselina i vode, a najčešći sastav je:

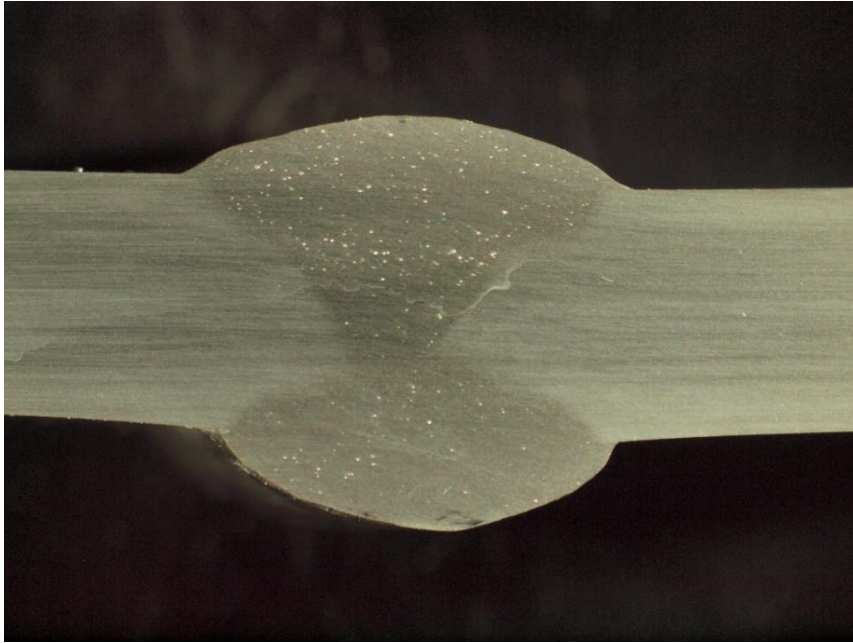
- Dušična kiselina (HNO_3): 2,5 ml
- Solna (klorovodična) kiselina (HCl): 1,5 ml
- Fluorovodična kiselina (HF): 1,0 ml
- Destilirana voda: 95 ml

Nakon pripreme otopine, uzorak aluminija se uranja na kratko (obično nekoliko sekundi do nekoliko minuta, ovisno o leguri i željenom efektu) kako bi se postiglo ujednačeno nagrivanje, koje omogućava uvid u strukturu materijala pod mikroskopom. Nagriva se poprečno na smjer zavora.

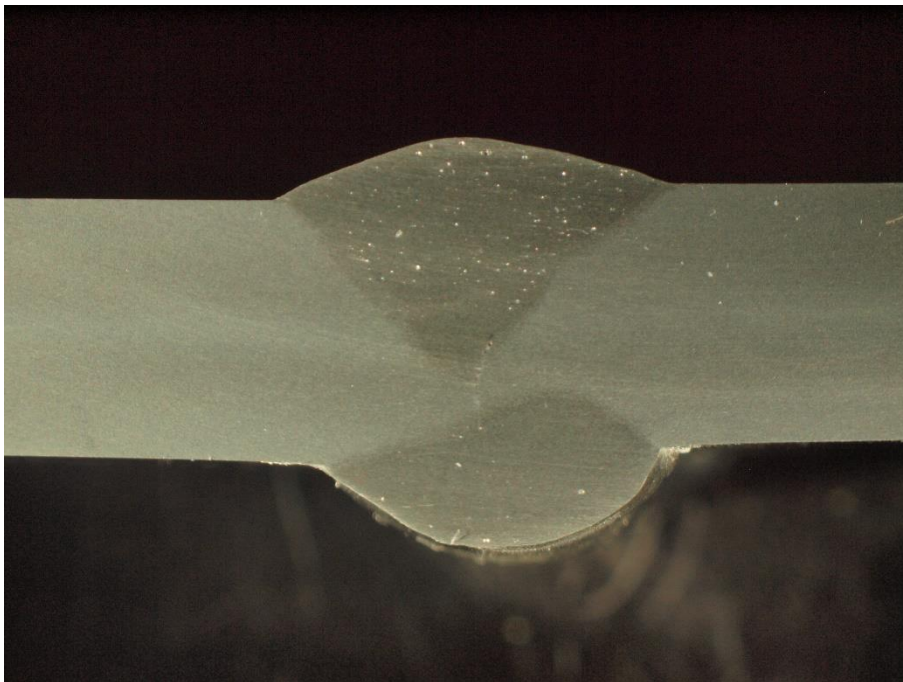
Na slici 13, 14, 15 i 16 prikazane su fotografije nagrivenih uzoraka potpuno pripremljenih za makroskopsku analizu s ilustracijom elemenata zavarenog spoja, gdje 1 predstavlja dodatni materijal zavora, a 2 predstavlja osnovni materijal, aluminij u ovom slučaju. Na jednak način fotografirani su i uzorci 2 i 3 na slikama 15 i 16.



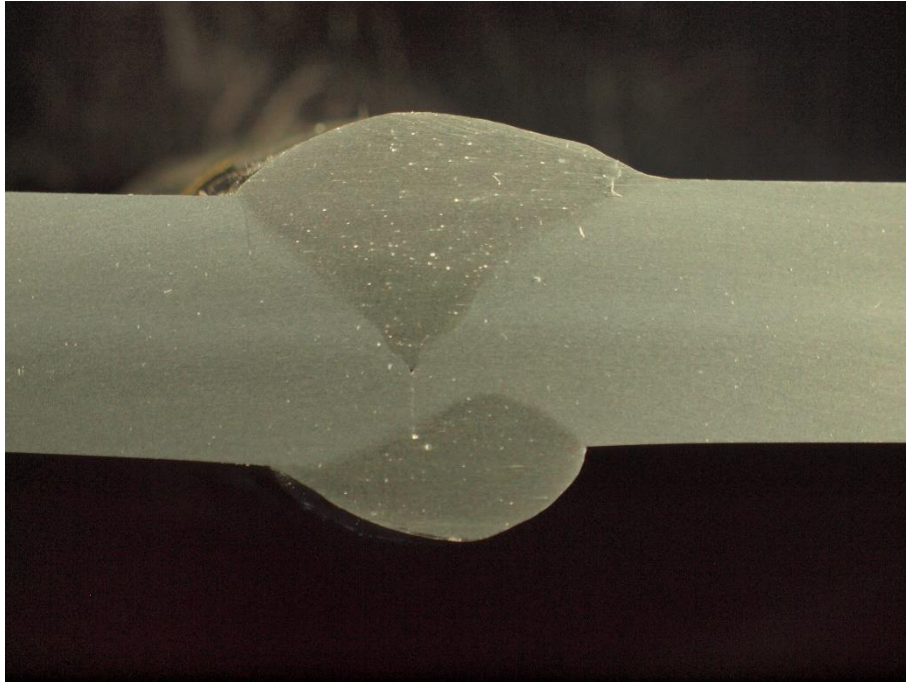
Slika 13. Ilustracija zavarenog spoja



Slika 14. Uzorak 2024/12-1 nakon nagrizanja s ilustracijom elemenata zavarenog spoja



Slika 15. Uzorak 2024/12-2 nakon nagrizanja



Slika 16. Uzorak 2024/12-3 nakon nagrizanja

Tumačenje rezultata analize vrši certificirano tijelo, u ovom slučaju registar Bureau Veritas. U normi je propisano kako treba fotografirati uzorak i to je ono što se uz pripremu brušenjem i nagrizanjem radi u laboratorijima. Rezultat ispitivanja koji ide u izvještaj je upravo kvalitetna slika na kojoj se vidi cijeli zavareni spoj, uz naravno podatke o uzorku, materijalu, vrsti spoja te pripremi za ispitivanje.

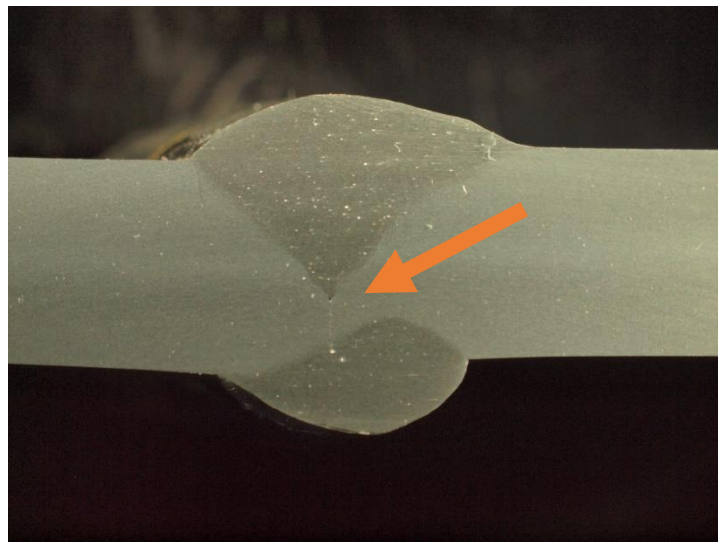
5. RASPRAVA

U ovom radu analiziraju se rezultati svake od prikazanih metoda ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva, uspoređuju se i pružaju preporuke za industriju. Rezultati različitih metoda ispitivanja pružaju komplementarne uvide u kvalitetu zavarenih spojeva.

Vizualna inspekcija je korisna za brzu procjenu površinskih defekata, dok radiografsko i ultrazvučno ispitivanje omogućuju detaljno ispitivanje unutarnjih defekata. Magnetsko ispitivanje i ispitivanje tekućim penetrantima su također učinkoviti za otkrivanje specifičnih vrsta defekata. Vizualna inspekcija otkriva samo površinske defekte, što je ograničeno u odnosu na druge metode koje mogu otkriti unutarnje defekte.

Radiografsko ispitivanje pruža detaljan prikaz unutarnjih defekata, ali može biti skupo i zahtijeva zaštitu od zračenja. Ultrazvučno Ispitivanje omogućuje precizno lociranje defekata i kvantifikaciju, ali zahtijeva visoku stručnost operatera. Magnetsko Ispitivanje je efikasno za površinske defekte, ali ograničeno na feromagnetne materijale. Ispitivanje tekućim penetrantima pruža jednostavan i jeftin način za otkrivanje površinskih defekata, ali je ovisan o kvaliteti pripreme površine.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada makroskopski je ispitano tri uzorka zavarenih spojeva na aluminiju iz industrije. Ispitivanja su provedena prema normi ISO 17639. U uzorcima koji su obrađeni u ovom radu, registar je zaključio kako prva dva zavarena spoja (uzorci 2024/12-1 i 2024/12-2) pokazuju odsutnost neprihvatljivih grešaka ili njihovo minimalno prisustvo unutar dopuštenih granica, pravilnu penetraciju i homogenost zavara te zadovoljavajući geometrijski oblik i minimalne deformacije. Treći uzorak ima pukotinu te je on odbačen. Slika 17 pokazuje pukotinu u zavarenom spoju uzorka 2024/12-3. Kod uzorka 2024/12-2 je granično vidljiva nepotpuna penetracija pa je ipak upućen na ponavljanje postupka zavarivanja, a potom i ispitivanja kvalitete u laboratoriju, što je standardna procedura u graničnim slučajevima koji su česti u industriji. Uzorak 2024/12-1 u potpunosti zadovoljava sve kriterije norme ISO 17639.



Slika 17. Pukotina zavarenog spoja uzorka 2024/12-3

Rezultati rada su u skladu s prethodnim istraživanjima koja pokazuju da kombinacija različitih metoda ispitivanja pruža najpotpuniju sliku o kvaliteti zavarenih spojeva te kako su norme i standardi neizostavni u kontroli kvalitete u proizvodnom pogonu. Ta

kontrola će se zapravo odviti u više koraka i u više faza proizvodnje. Kontrola kvalitete je sastavni dio pogona, a na gotovom proizvodu kontrola se vrši u vanjskim akreditiranim ispitnim laboratorijima od strane neovisnih tijela uz prisutnost raznih registara i certifikacijskih kuća. Usporedba s ranijim studijama pokazuje da su slične metode korištene za uspješno otkrivanje sličnih vrsta defekata.

6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenog pregleda literature i ispitivanja u laboratoriju, može se zaključiti da se kombinacija vizualne inspekcije, radiografskog ispitivanja, ultrazvučnog ispitivanja, magnetskog ispitivanja, ispitivanja tekućim penetrantima te makroskopskih ispitivanja pokazuje kao najkompletniji pristup za otkrivanje različitih vrsta defekata u zavarenim spojevima. Svaka metoda doprinosi svojoj specifičnoj vrsti defekta, a njihova primjena osigurava sveobuhvatnu kontrolu kvalitete. Uvijek je ako je moguće dobro odraditi i nerazorna ispitivanja i ispitivanja zavarenih spojeva razaranjem, a često je to zapravo i obavezno te propisano strogim normama i standardima kontrole kvalitete.

Vizualna inspekcija je korisna za brzu identifikaciju površinskih defekata, ali ima ograničenja u otkrivanju unutarnjih problema. Radiografsko ispitivanje i ultrazvučno ispitivanje su vrlo precizne, ali zahtijevaju visoku stručnost i složenu opremu. Magnetsko ispitivanje i tekući penetranti su učinkoviti za posebne vrste oštećenja, ali se ne mogu primjenjivati na sve materijale kao i na sve greške i oštećenja.

Ispitivanje kvalitete zavarenih spojeva, uključujući makroskopsko ispitivanje prema normi HRN EN ISO 17639, ključan je proces za osiguranje sigurnosti, pouzdanosti i učinkovitosti industrijskih konstrukcija. Makroskopsko ispitivanje pruža osnovnu, ali izuzetno važnu procjenu stanja zavarenih spojeva, omogućujući pravovremeno otkrivanje i ispravljanje defekata te osiguravanje da konačni proizvod zadovoljava sve potrebne standarde kvalitete.

LITERATURA

American Welding Society (AWS). (2020). Structural Welding Code - Steel (D1.1). Miami, FL: AWS.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code. New York, NY: The American Society of Mechanical Engineers.

Brown, R., & White, T. (2021). *Advanced techniques in non-destructive testing*. Engineering Publications.

Doe, J. (2021). *Advanced welding techniques in automotive manufacturing*. Automotive Engineering Journal, 45(2), 112-125.

EN ISO 17635:2019. Non-destructive testing - Visual testing of fusion-welded joints. Geneva, Switzerland: ISO

European Committee for Standardization (CEN). (2012). Nondestructive testing - Radiographic testing - Metal materials (EN 1330-1). Brussels, Belgium: CEN.

Hrvatska norma. (2013). *HRN EN ISO 17639:2013: Destructive tests on welds in metallic materials — Macroscopic and microscopic examination of welds*. Prvo izdanje, rujan 2013. Zamjenjuje HRN EN 1321:1999. Hrvatska agencija za normizaciju.

International Organization for Standardization. (2019). *Non-destructive testing — Radiographic testing — Part 1: Classification of films*. ISO 17636-1.

International Organization for Standardization. (2020). *Non-destructive testing — Magnetic particle testing*. ISO 9934-1.

International Organization for Standardization (ISO). (2012). Nondestructive testing - Ultrasonic testing of welded joints (ISO 9712). Geneva, Switzerland: ISO.

International Organization for Standardization (ISO). (2017). Nondestructive testing - Penetrant testing (ISO 15613). Geneva, Switzerland: ISO.

ISO. (2005). *ISO/TR 15608: Welding — Guidelines for a metallic materials grouping system*. International Organization for Standardization.

Jones, A. (2018). *Structural integrity of welded joints in shipbuilding*. *Marine Engineering Review, 58*(4), 321-335.

Lee, H., & Kim, S. (2019). *Ultrasonic testing methods for high-strength materials*. *Journal of Non-Destructive Testing, 37*(1), 45-59.

Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units. (2023). *NR216 - July 2023*.

Smith, R., & Brown, T. (2020). *Welding methods and their applications*. Industrial Materials and Processes, 62(3), 204-219.

SAŽETAK

U ovom radu istražene su različite metode ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva metalnih materijala. Objasnjen je princip samog ostvarivanja zavarenog spoja, opisane su nedestruktivne i destruktivne metode ispitivanja kvalitete zavarenih spojeva uz naglasak na ispitne norme i standarde kvalitete. Nerazorne metode prikazane su na primjeru iz literature, a makroskopsko ispitivanje tri uzorka zavarenog spoja odrađeno je prema normi ISO 17639 u akreditiranom ispitnom laboratoriju Centra za istraživanje METRIS za klijenta iz industrije. Rezultati ispitivanja uspoređeni su sa zahtjevima norme. Za sveobuhvatno ispitivanje kvalitete zavarenih spojeva najbolje je kombinirati više dostupnih metoda u proizvodnji i u vanjskoj kontroli kvalitete, a metode su propisane i detaljno opisane ISO normama i standardima certifikacijskih kuća.

Ključne riječi: zavareni spoj, nedestruktivne metode, ISO 17639, makroskopsko ispitivanje

SUMMARY

This paper explores various methods for testing the quality of welded joints in metallic materials. The principles of creating welded joints are explained, and both non-destructive and destructive testing methods are described, with an emphasis on testing norms and quality standards. Non-destructive methods are illustrated with examples from the literature, and macroscopic testing of three welded joint samples was conducted according to ISO 17639 in an accredited testing laboratory at the METRIS Research Center for an industrial client. The test results were compared with the standard requirements. For comprehensive testing of welded joint quality, it is best to combine multiple available methods in production and external quality control. The methods are prescribed and thoroughly described in ISO standards and certification body guidelines.

Keywords: welded joint, non-destructive methods, ISO 17639, macroscopic testing

POPIS SLIKA

Slika 1. Zavareni spoj

Slika 2. Ultrazvučno ispitivanje kvalitete zavarenog spoja

Slika 3. Vizualna inspekcija zavarenog spoja

Slika 4. Radiografsko ispitivanje zavarenog spoja

Slika 5. Magnetsko ispitivanje zavarenog spoja

Slika 6. Koraci ispitivanja materijala tekućim penetrantom

Slika 7: Radiografska snimka uzorka

Slika 8. Naslovna stranica norme HRN EN ISO 17639

Slika 9. Optički stereomikroskop Olympus SZX10

Slika 10. Fotografije uzorka 2024/12-1

Slika 11. Fotografije uzorka 2024/12-2

Slika 12. Fotografije uzorka 2024/12-3

Slika 13. Ilustracija zavarenog spoja

Slika 14. Uzorak 2024/12-1 nakon nagrizanja s ilustracijom elemenata zavarenog spoja

Slika 15. Uzorak 2024/12-2 nakon nagrizanja

Slika 16. Uzorak 2024/12-3 nakon nagrizanja

Slika 17. Pukotina zavarenog spoja uzorka 2024/12-3

POPIS TABLICA

Tablica 1: Primjer rezultata vizualne inspekcije zavarenog spoja

Tablica 2. Primjer rezultata radiografskog ispitivanja uzorka zavarenog spoja