

Lasersko zavarivanje konstrukcijskog čelika S355

Simetić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:585396>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-02**



Repository / Repozitorij:

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Tehnički fakultet u Puli



Ivan Simetić

LASERSKO ZAVARIVANJE KONSTRUKCIJSKOG ČELIKA S355

Diplomski rad

Pula, 2024.

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli
Tehnički fakultet u Puli



Ivan Simetić

LASERSKO ZAVARIVANJE KONSTRUKCIJSKOG ČELIKA S355

Diplomski rad

JMB: 0303090621, redovan student

Studijski smjer: Konstruiranje i mehatronika

Predmet: Metodologija znanstvenog istraživanja

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarsvo

Znanstvena grana: Opće strojarstvo (konstrukcije)

Mentor: doc.dr.sc. Vedrana Špada

Pula, Rujan, 2024.

ZAHVALA

Zahvaljujem se svojoj mentorici, doc.dr.sc. Vedrani Špadi, za sve savjete i pomoć prilikom izrade ovog rada. Njezina podrška, sugestije i smjernice bile su od ogromne važnosti za uspjeh ovog diplomskog rada.

Također, zahvalio bi se svim djelatnicima Centra za istraživanje materijala Istarskog veleučilišta koji su bili od velike pomoći prilikom pripreme ispitnih uzoraka, samih ispitivanja i pružanja potrebne dokumentacije.

Posebno zahvaljujem gospodinu Samiru Grudiću i svim djelatnicima firme „DRAGON BAJUN d.o.o.“ na pruženom znanju, tehnologiji i materijalu potrebnom za izradu ovog rada. Njihova stručnost i pomoć uvelike mi je olakšala i pridonijela kvaliteti ovog rada.

Veliko hvala i gospodinu Slobodanu Buršiću i svim djelatnicima „AB – Projekt d.o.o“ na pomoći tijekom obrade ispitnih uzoraka.

Na posljetku, zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na neizmjernoj podršci, strpljenju i vjeri koju su mi pružili tijekom cijelog studija.

Hvala vam svima od srca!

— doc.dr.sc. Vedrana Špada —
(Ime i prezime nastavnika)

— Metodologija znanstvenog istraživanja —
(Predmet)



Tehnički fakultet u Puli

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

TEHNIČKI FAKULTET U PULI

ZADATAK TEME ZAVRŠNOGA RADA

Pristupniku/ci

Ivan Simetić

MBS: 0303090621

Studentu/ci stručnog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za završni rad – tema završnog rada pod nazivom:

Lasersko zavarivanje konstrukcijskog čelika S355

Sadržaj zadatka: Napisati osnovnu hipotezu, predmet i problem istraživanja te sukladno odabranoj hipotezi postaviti ciljeve istraživanja. Koristiti metodologiju koja je znanstvena kako bi se osigurala ponovljivost rezultata. Posložiti poglavlja koja odgovaraju postavljenim ciljevima. Donijeti zaključak u kojemu se odražavaju bitne spoznaje u radu i kritički osvrt autora.

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o završnom radu Sveučilišta u Puli.

Redovni, Strojarsvo

(redovni, strojarsvo)

Datum: Rujan 2024.

Potpis nastavnika _____

Potpis nastavnika _____



IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Ivan Simetić kandidat za magistra inženjera strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Diplomski 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 Diplomskog 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.

Student

U Puli, _____, _____ godine



IZJAVA
o korištenju autorskog djela

Ja, Ivan Simetić dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom „Lasersko zavarivanje konstrukcijskog čelika S355“ koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile 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, _____ (datum)

Student

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu prikazana je metoda laserskog zavarivanja konstrukcijskog čelika S355. Poblizje su opisane ostale često korištene metode zavarivanja današnjice, njihove prednosti i nedostaci te nedostaci i prednosti naspram postupka laserskog zavarivanja. U radu je opisana metoda laserskog zavarivanja, glavna metoda zavarivanja korištena u ovom diplomskom radu. Opisan je postupak ispitivanja zavarenih spojeva, ne-razorne i razorne metode ispitivanja. Naposljetku, prikazan je i detaljno opisan praktični dio rada, koji se sastoji od laserskog zavarivanja konstrukcijskog čelika S355, pripreme testnih epruveta, ispitivanja zavarenih spojeva i opisa korištenih uređaja za ispitivanje te prikazivanja i analize rezultata ispitivanja.

Ključne riječi: Zavarivanje, lasersko zavarivanje, konstrukcijski čelik S355, ne-razorne metode ispitivanja (NDT), razorne metode ispitivanja(DT), mehanička svojstva zavarenih spojeva

SUMMARY

The thesis of this final paper presents the method of laser welding of structural steel S355. It describes in more detail other more frequently used methods of welding that exist today, their advantages and disadvantages, as well as disadvantages and advantages compared to the laser welding process. This paper describes in detail the laser welding method, which is the main welding method used for the purpose of this thesis. The procedure of testing welded joints, non-destructive and destructive methods is described. Finally, the practical part of the paper is presented and described in detail, which consists of the procedure of laser welding structural steel S355, cutting and preparation of test tubes, testing of welded joints and description of the test devices used, as well as presentation and analysis of test results.

Keywords: Welding, laser welding, structural steel S355, non-destructive methods(NDT), destructive test methods(DT), mechanical properties of welded joints

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. Hipoteza rada | 1 |
| 1.2. Predmet istraživanja..... | 2 |
| 1.3. Problem istraživanja | 2 |
| 1.4. Ciljevi rada | 2 |
| 1.5. Metodologija rada..... | 2 |
| 1.6. Struktura rada | 3 |
| 2. ZAVARIVANJE MATERIJALA | 4 |
| 2.1. Postupci spajanja materijala..... | 5 |
| 2.2. Princip spajanja materijala postupcima zavarivanja | 7 |
| 2.3. Vrste zavarenih spojeva | 8 |
| 2.4. Postupci zavarivanja | 10 |
| 3. LASERSKO ZAVARIVANJE | 16 |
| 3.1. Oprema za lasersko zavarivanje | 16 |
| 3.1.1. Upravljačka ploča | 18 |
| 3.1.2. Glava za zavarivanje | 19 |
| 3.1.3. Dodavač za dodatni materijal | 20 |
| 3.1.4. Laserski izvor i hladnjak..... | 21 |
| 3.2. Opis postupka laserskog zavarivanja materijala S355 | 22 |
| 4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA KVALITETE ZAVARENOG SPOJA | 34 |
| 4.1. Priprema zavarenog spoja | 35 |
| 4.2. Norme za ispitivanje kvalitete zavarenih spojeva | 36 |
| 4.3. Priprema uzoraka za laboratorijsko ispitivanje | 38 |
| 4.4. Statični vlačni test zavarenog spoja | 39 |
| 4.4.1. Ispitna oprema..... | 40 |
| 4.4.2. Ispitne norme..... | 40 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.4.3. | Opis metode ispitivanja zavarenog spoja..... | 41 |
| 4.5. | Ispitivanje udarne radnje loma zavarenog spoja | 42 |
| 4.5.1. | Ispitna oprema..... | 42 |
| 4.5.2. | Ispitne norme i epruvete | 47 |
| 4.6. | Mikro i makro ispitivanje zavarenog spoja..... | 50 |
| 4.6.1. | Ispitna oprema..... | 50 |
| 4.6.2. | Ispitne norme..... | 51 |
| 4.6.3. | Opis metode makro i mikro ispitivanja zavarenog spoja | 51 |
| 5. | RASPRAVA I REZULTATI | 58 |
| 5.1. | Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja | 58 |
| 5.2. | Rezultati makro i mikro ispitivanja | 61 |
| 4.3 | Rezultati ispitivanje udarne radnje na lom..... | 64 |
| 6. | ZAKLJUČAK | 66 |
| | LITERATURA | 67 |
| | Literatura iz knjiga..... | 67 |
| | Literatura s interneta | 67 |
| | POPIS SLIKA | 68 |
| | POPIS TABLICA..... | 71 |
| | POPIS OZNAKA, KRATICA I MJERNIH JEDINICA | 72 |
| | POPIS PRILOGA..... | 73 |

1. UVOD

Zavarivanje je proces spajanja materijala, u najčešćem slučaju metala ili plastike, na način da se rubovi materijala tope i pomoću dodatnog materijala spajaju u jednu cjelinu, gdje nakon hlađenja nastaje snažna veza. Neki od prvih primjena zavarivanja datiraju čak iz brončanog doba gdje se postupkom rastapanja spajala bronca i bakar u svrhu estetskog i funkcionalnog poboljšanja oružja, oruđa te oklopa.[2]

Veliki napredak u postupku zavarivanja je nastupio početkom industrijske revolucije u 18. i 19. stoljeću gdje se ručna proizvodnja počela zamjenjivati parnim strojevima i razvijala se tehnologija autogenog zavarivanja te kasnije električnog luka. Daljnjim razvojem u 20. stoljeću pojavile su se metode plinskog zavarivanja i kasnije elektrolučnog zavarivanja koje su bile korak unaprijed ka masovnoj proizvodnji i rastu industrije. [2]

Tehnike današnjeg procesa zavarivanja uključuju nove metode i načine poput laserskog zavarivanja, TIG (eng. *Tungsten inert gas*) zavarivanja, MAG (eng. *Metal active gas*) zavarivanja, koje daju mogućnosti preciznijeg i učinkovitijeg spajanja materijala. [2]

Industrija i sam proces zavarivanja se danas koristi u različitim industrijama poput brodogradnje, energetike, zrakoplovstva, automobilske i građevinske industrije te mnogih drugih. Kao i na primjeru industrijske revolucije i kasnije 20. stoljeća, daljnji tehnološki napredak kao što su automatizacija, elektronika, robotika i mehatronika imaju veliku i važnu ulogu u modernizaciji i napretku zavarivanja.

1.1. Hipoteza rada

Moguće je tehnologijom laserskog zavarivanja, spojiti materijal S355 te dobiti zadovoljavajuće rezultate ispitivanja mehaničkih svojstava.

1.2. Predmet istraživanja

Pod predmet istraživanja spada izrada zavarenog spoja materijala S355 laserskom tehnologijom zavarivanja te naknadno laboratorijsko ispitivanje kvalitete zavarenog spoja.

1.3. Problem istraživanja

Problem istraživanja je korištenje laserske tehnologije zavarivanja za postizanje kvalitetnog zavara materijala S355 bez javljanja greška.

1.4. Ciljevi rada

Ciljevi diplomskog rada su:

1. Opisati korištenu metodu laserskog zavarivanja te osnovne pojmove vezane za zavarivanje
2. Opisati osnovni materijal za zavarivanje i postupak laserskog zavarivanja
3. Izvršiti laboratorijska ispitivanja mehaničkih svojstava te prikazati i analizirati dobivene rezultate

1.5. Metodologija rada

Za potrebe izrade diplomskog rada korištene su sljedeće metode:

- Eksperimentalna metoda: Kontrolirani eksperimenti gdje se mijenja jedna ili više varijabli (neovisne varijable) kako bi se tokom i nakon eksperimenta promatrale promjene.
- Metoda mjerenja: Mjerenje ponovljivosti i točnosti dobivenih rezultata
- Metoda analize: Raščlanjivanje složenih cjelina na dijelove
- Metoda promatranja: Podaci u vezi metoda analiziranja se promatraju i evidentiraju
- Deskriptivna metoda: Opisivanje i razrada te pojašnjenje procesa i predmeta

1.6. Struktura rada

Rad je posložen u šest glavnih dijelova od kojih je prvi dio uvodni dio. U uvodnom djelu navodi se hipoteza rada, predmet istraživanja, problem istraživanja, ciljevi rada, metodologija rada i sama struktura rada. U drugom se poglavlju opisuje tehnologija zavarivanja materijala, postupci i princip spajanja materijala, različite vrste zavarenih spojeva i nabrojani su i pobliže pojašnjeni postupci zavarivanja.

Treće poglavlje prikazuje lasersko zavarivanje, potrebnu opremu za lasersko zavarivanje i opisuje postupak laserskog zavarivanja materijala S355. Četvrto poglavlje obuhvaća izvršena laboratorijska ispitivanja kvalitete zavarenog spoja, opis osnovnog materijala S355 i njegove oznake i svojstva, korištene norme za ispitivanje kvalitete zavarenih spojeva, priprema uzoraka za laboratorijsko ispitivanje, statički vlačni test, ispitivanje udarne radnje loma i mikro i makro ispitivanja zavarenog spoja. U petom poglavlju prikazani su rezultati i slike svih provedenih ispitivanja u ovome diplomskom radu.

Dodatna poglavlja obuhvaćaju zaključak, literaturu, popis slika, popis tablica, popis simbola i popis priloga.

2. ZAVARIVANJE MATERIJALA

Zavarivanje materijala je jedno o najvažnijih procesa, ova tehnologija omogućila je izgradnju svijeta kakvog ga danas znamo. U prošlosti je jedini poznatiji način zavarivanja bilo „kovačko“ zavarivanje, gdje se procesom zagrijavanja i naknadnim „udaranjem“ spajalo i oblikovalo oruđe i oružje raznih namjena. Napretkom tehnologije dolazi do pojave prvih modernijih postupaka zavarivanja od kojih su jedne od prvih bile plinsko i lučno elektrolučno zavarivanje nastale iz industrijske revolucije i otkrića i korištenja električne energije. [2]

Zavarivanje nije nužno složen proces te je za njega potrebno imati tri osnovna elementa:

1. Opremu za zavarivanje (ovisno o metodi zavarivanja)
2. Materijal za zavarivanje
3. Zaštitnu opremu tijekom procesa zavarivanja

Razmatrajući današnji napredak u tehnologiji i hibridnom pristupu u procesu zavarivanja, postoji više od 75 različitih načina zavarivanja. Razlog ovako velikom broju mogućnosti je taj da svaki proces ima svoje jedinstvene prednosti i nedostatke koji ih čine idealnim izborom za jednu svrhu, a lošijim za drugu.

Prilikom odabira načina zavarivanja, potrebno je uračunati različite faktore poput brzine zavarivanja, temperature zavarivanja, potrebe za dodatnim materijalom, potrebe za plinom u svrhu goriva, veličine, cijene i jednostavnosti održavanja uređaja i aparature.

Postoji više metoda zavarivanja, a neke od njih su sljedeće: [2]

- Autogeno (plinsko) zavarivanje
- Električno lučno zavarivanje
- MIG/MAG zavarivanje
- Elektro-otporno zavarivanje
- TIG zavarivanje
- Lasersko zavarivanje

Zavarivanje je ključan postupak u industriji današnjice i povezano je s industrijama

poput automobilske, brodograđevne, građevinske i strojarske.

2.1. Postupci spajanja materijala

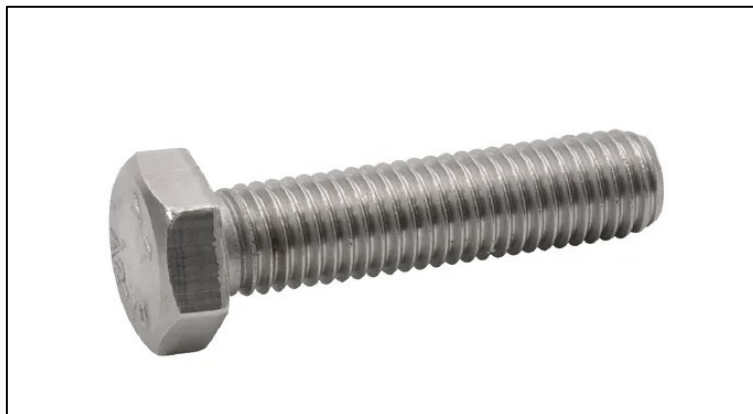
Materijali se ovisno o potrebi mogu spajati na različite načine, neki od glavnih načina spajanja materijala su sljedeći: [2]

- Zavarivanje
- Mehaničko spajanje
- Lijepljenje
- Lemljene

U slučaju kad se materijali moraju spojiti brzo i efikasno, a ne postoji potreba za zavarivanjem koje u slučajevima može biti zahtjevniji i skuplji proces, koriste se metode poput mehaničkog spajanja, lijepljenja i lemljenja.

Mehaničko spajanje je jedan on načina spajanja materijala korištenjem vijaka, matica, zatika i drugih vrsta mehaničkih komponenti. Ovakva vrsta spajanja materijala je brza, efikasna i eliminira potrebu za zahtjevnom obukom kako bi se koristila. Na slici broj 1 prikazan je vijak (din 933 M12X40). [2]

Slika 1. Vijak din 933 M12X40



Izvor: <https://www.milershop.hr/>

Također, moguće je lakše spajanje raznorodnih materijala zbog uklanjanja faktora poput topline koji uvelike može utjecati na strukturu materijala. Mehanički spojevi poput

vijaka i matica korisni su jer se po potrebi mogu lagano ukloniti ili zamijeniti bez štetnog utjecaja na izvorni materijal. [2]

Primjer trajne veze između materijala je lijepljenje, materijal koji je potrebno spojiti ovom metodom najprije se mora očistiti od nečistoća te se nakon tog procesa na željeno mjesto spoja nanosi lijepilo. Lijepila koje se generalno koriste za međusobno spajanje metala su dvo-komponentna lijepila na bazi akrila, poliuretana i epoksidnih tehnologija i lijepila s vrućim stvrdnjavanjem. Spoj između materijala je čvrst i u većini slučajeva, proces lijepljenja u sebi nema komponentu koja materijal zagrijava i samim time stvara opasnost od promjena strukture materijala i nastanka deformacija. Sama lijepila u sebi mogu imati komponente koje dugotrajno sprječavaju nastanak korozije i samim time štite materijal od vanjskih utjecaja. [2]

Lemljenje je proces sličan procesu zavarivanja, skaliran na manju mjeru i daleko jeftiniji, koristi se kad postoji potreba za stvaranjem čvrstog spoja između dva metala. Na slici broj 2 vidi se aparat za lemljenje bakrenih cijevi marke „REMS“.

Slika 2. Lemilica za bakrene cijevi "REMS"



Izvor: <https://www.alatimilic.hr/>

Kao i kod procesa zavarivanja glavni faktor spajanja materijala je toplina. Kod lemjenja također je moguće koristiti dodatni materijal prilikom spajanja ili samo taliti izvorni

materijal kako bi se postigla čvrsta veza između materijala.

2.2. Princip spajanja materijala postupcima zavarivanja

Sam princip spajanja materijala zavarivanjem, bazira se na stvaranju topline te opcionalnom dodavanju dodatnog materijala s ciljem postizanja čvrste veze (zavarenog spoja) između materijala koji će biti bez mehaničkih nedostataka. [2]

Kod procesa zavarivanja mjesto spoja je u trenutku dovedeno u tekuće ili plastično stanje, naknadno se hladi i stvara čvrstu vezu (zavareni spoj) između materijala. Sama svojstva nastalog zavarenog spoja ovise o korištenoj tehnologiji (vrsti zavarivanja), parametrima zavarivanja i vrsti korištenog dodatnog materijala. Jedna od glavnih podjela vrsta zavarivanja materijala je zavarivanje uz pomoć pritiska i zavarivanje taljenjem, neki od primjera za navedene vrste su prikazani u tablici 1. [2]

Tablica 1. Postupci zavarivanja pritiskom i zavarivanja taljenjem

| Zavarivanje pritiskom | Zavarivanje taljenjem |
|-----------------------------|---------------------------------|
| Zavarivanje ultrazvukom | Zavarivanje električnim lukom |
| Kovačko zavarivanje | Plinsko zavarivanje |
| Elektro otporno zavarivanje | Zavarivanje elektronskim snopom |
| Zavarivanje trenjem | Zavarivanje laserskim snopom |

Izvor: Autor

Svaka od navedenih metoda ima svoje prednosti i nedostatke, te se prilikom odabira osim tih faktora trebaju u obzir uzeti i faktori poput: [2]

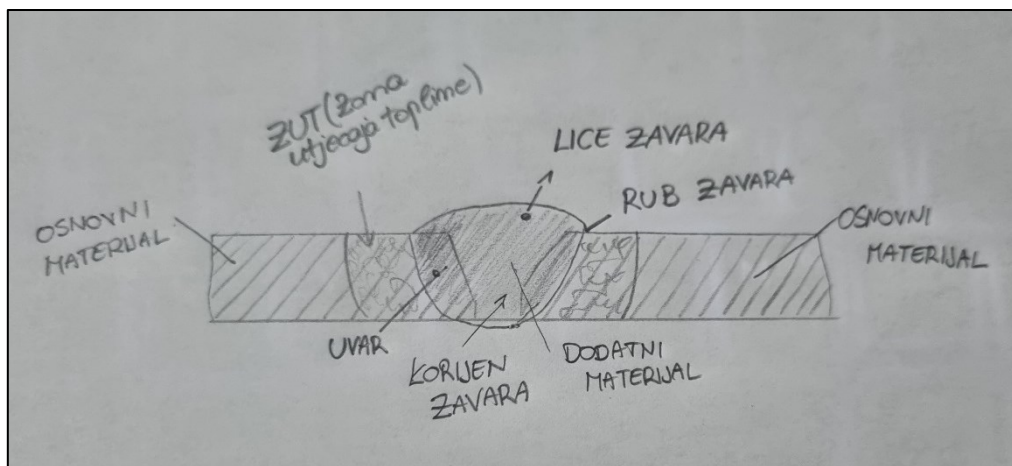
1. Debljina osnovnog materijala u obradi
2. Potreba za korištenjem dodatnog materijala
3. Potreba za korištenjem zaštitnog plina
4. Otpornost materijala na termičku deformaciju
5. Isplativost i efikasnost odabranog procesa

Kod postupka zavarivanja pritiskom, materijali se međusobno spajaju stvaranjem topline, prilikom trenja između istih. Spoj koji nastaje na površini, nastaje uslijed

hlađenja i djelovanja tlaka na mjesto koje je potrebno spojiti. Proces spajanja materijala pritiskom ne zahtijeva upotrebu dodatnog materijala ili zaštitnog plina. Koristi se zbog smanjenog unosa topline i visoke čvrstoće nastalog spoja.[2]

Zavarivanje taljenjem je proces u kojem se istorodni ili raznorodni materijali spajaju taljenjem materijala u željenom području spoja, većinom slučajeva uz dodavanja dodatnog materijala. Nastali zavareni spoj nakon procesa zavarivanja može se podijeliti na više područja ili zona koje su posljedično nastale djelovanjem energije(topline) prilikom zavarivanja. Nastala područja prikazana su na slici 3.

Slika 3. Područja zavarenog spoja



Izvor: Autor

2.3. Vrste zavarenih spojeva

Postoji nekoliko glavnih vrsta zavarenih spojeva koje se koriste učestalije od ostalih i one su sljedeće:

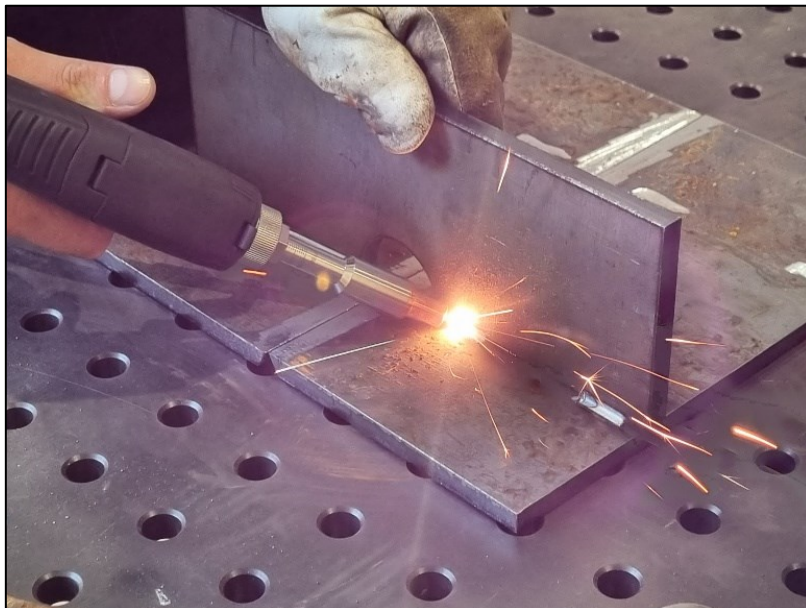
1. Sučeljeni zavar
2. Kutni zavar
3. T – spoj

Sučeljeni zavar se klasificira kao jedan od najjednostavnijih tipova zavara, a dobiva se međusobnim spajanjem dva materijala na njihovim ravnim krajevima, kao što je prikazano na slici 4.

Slika 4. Sučeljeni zavar

Izvor: Autor

Kutni zavar je spoj dvaju materijala koja su međusobno postavljena pod kutom od 90° . U primjeru na slici 5 za potrebe diplomskog rada izradio se jedan kutni zavar s jednim prolazom i jedan s više prolaznom metodom (3 prolaza), razlog većem broju prolaska zavara je postizanje veće visine zavarenog spoja i samim time dobivanje boljih mehaničkih svojstava.

Slika 5. Kutni zavar (primjer)

Izvor: Autor

T-spoj je zavar koji se može klasificirati pod kutni zavar, dva materijala se također spajaju pod kutem od 90° i često se koriste u industrijama poput izgradnje mostova i građevina.

2.4. Postupci zavarivanja

Ovisno o vrsti posla, radnom okruženju, uvjetima rada i financijskoj mogućnosti postoje razne vrste zavarivanja. Neke od glavnih vrsta navedene su i objašnjene u nastavku:

[8]

- Zavarivanje elektrodama
- „CO₂“ Zavarivanje
- MIG Zavarivanje
- TIG zavarivanje
- Lasersko zavarivanje

Zavarivanje elektrodama ili elektrolučno zavarivanje jedno je on učestalijih vrsta zavarivanja u industriji. Proces koji se odvija u ovoj vrsti zavarivanja je proces „fuzijskog zavarivanja“ koji spaja osnovni materijal u jednu cjelinu. Pomoću izvora napajanja na koji se spaja aparat, nastaje električni luk koji stvara toplinu za topljenje materijala. Luk nastaje između elektrode i samog osnovnog materijala namijenjenog za spajanje kao što je prikazano na slici 6. [3]

Slika 6. Elektrolučno zavarivanje



Izvor: <https://www.pit.ba/>

Fleksibilnost postupka je najveća prednost elektrolučnog zavarivanja, a samim tim i raznolikosti primjena. Široki spektar adekvatnih komponenti koji se kreće od tankih limova za konstrukciju karoserije automobila do u teoriji beskonačno debelih i velikih metalnih dijelova moguće je spojiti ovom metodom. Raspon zavarljivih materijala je također širok. [3]

Oprema koja je potrebna za ovakvu vrstu zavarivanja je relativno jeftina naspram drugih metoda te se sama metoda može izvoditi ručno od strane zavarivača ili po potrebi procesa automatizirano, gdje se oprema za elektrolučno zavarivanje ukomponira na robotsku ruku koja omogućuje veću preciznost i ponovljivost zbog uklanjanja ljudskog faktora poput umora i dekoncentracije koji se mogu javiti nakon određenog perioda uslijed napornog rada.

„CO₂“ zavarivanje (slika 7), poznatije još sa nazivima svojih podvrsta (MIG i MAG), je često upotrebljavana metoda zavarivanja koja koristi plin (ugljični dioksid) kao zaštitni plin tijekom procesa zavarivanja. Ugljični dioksid se tijekom zavarivanja koristi kako bi stvorio zaštitnu atmosferu koja sprječava kisik od ulaska i spajanja s materijalom. Također, u slučaju da se plin ne koristi materijal bi se previše ugrijao i izgorio. [8]

Slika 7. "CO₂" Zavarivanje



Izvor: <https://vatrozastita.com/>

Kod CO₂ zavarivanja, električni luk nastaje između elektrode i materijala koji se

zavaruje kako bi nastao var. Istovremeno, „prskanjem“ ugljikovog dioksida stvara se zaštitna atmosfera koja sprječava oksidaciju između kisika i taljenog metala, osiguravajući kvalitetan var. U nekim slučajevima plin koji se ubrizgava nije nužno 100% CO₂, ovisno o primjeni i materijalu u pitanju. [3]

S obzirom na način korištenja, CO₂ zavarivanje prikladno je za automatizirano zavarivanje (robotskom rukom) te se najčešće, s obzirom na slabu otpornost na vanjske uvjete gdje je ključan faktor vjetar, koristi u zatvorenim prostorijama.

Neke od prednosti CO₂ zavarivanja su sljedeće: [8]

1. Niska cijena postupka zavarivanja. Otprilike jeftinije za 40 do 50 % od ostalih načina zavarivanja.
2. Velika efikasnost, više od 1 do 4 puta nego primjerice zavarivanje elektrodama.
3. Lagano za izvedbu ili korištenje. Nema ograničenja s obzirom na debljinu materijala koji se zavaruje i može se variti u različitim pozicijama.
4. Nastali zavareni spojevi imaju veliku otpornost na lom. Sadrže mali udio vodika i dušika.

U sljedećoj tablici (tablica 2) prikazan je sastav plina i materijal koji je namijenjen za korištenje zajedno s navedenim plinom.

Tablica 2. Plin - čelik

| PLIN | MATERIJAL |
|------------------------------------|------------------|
| 100% CO ₂ | ČELIK |
| 82 % Argon + 18% CO ₂ | ČELIK |
| 92% Argon + 8% CO ₂ | ČELIK |
| 97,5% Argon + 2,5% CO ₂ | NEHRĐAJUĆI ČELIK |
| 98% Argon + 2% O ₂ | NEHRĐAJUĆI ČELIK |
| 100% Argon 5,0 | ALUMINIJ |

Izvor: Autor

Nedostatci CO₂ zavarivanja koji nastaju tijekom procesa su sljedeći: [8]

1. Prskanje materijala – prskanje materijala je čest problem koji se javlja kod

postupka CO₂ zavarivanja. Može uzrokovati neravnine u području oko zavara, a i u samom zavaru što uvelike utječe na kvalitetu i izgled zavara.

2. Porozivnost – u slučaju slabog poznavanja parametara zavarivanja i neadekvatno namještenih postavki na aparatu. Također, javlja se prilikom nečistoća na materijalu kojeg se zavaruje poput vlage, ulja, itd.
3. Deformacije – javljaju se uslijed visoke temperature zavarivanja, pogotovo prilikom zavarivanja tankih materijala.
4. Stvaranje dima – nastaje oksidacijom i kondezacijom vodene pare koja nastaje prilikom taljenja materijala(čelika).

MIG zavarivanje je popularan način zavarivanja koji se često koristi kod nisko- legiranih čelika. Ovi čelici nastaju dodavanjem elemenata poput nikla, kroma i molibdena.

Neki primjeri nisko-legiranih čelika su: [8]

- Krom – molibden čelik (0,5 – 9 % Cr; 0,5 – 1 % Mo)
- Precizni čelik
- Nikal čelik

Proces MIG zavarivanja (slika 8) odvija se pomoću električnog luka između žičane elektrode i materijala koji se zavaruje. Postupak je široko rasprostranjen i popularan zbog svoje jednostavnosti i brzine upotrebe. Izvor energije može biti istosmjernan ili izmjeničan, ali u većini slučajeva je istosmjernan s pozitivnim polaritetom, omogućujući efikasnije topljenje elektrode i bolju penetraciju. [3]

Slika 8. MIG Zavarivanje



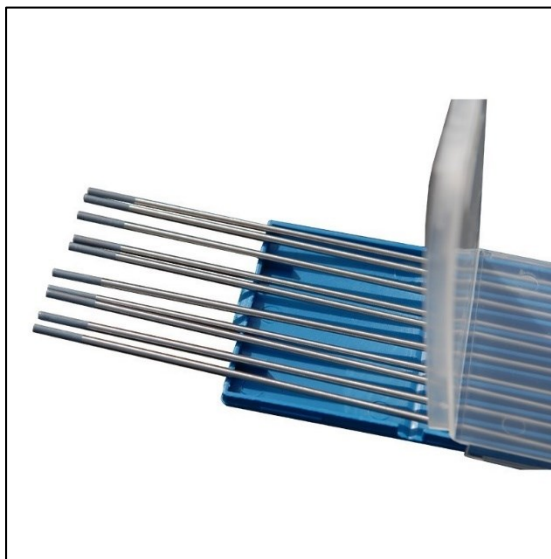
Izvor: <https://www.pit.ba/>

Kao i ostali postupci zavarivanja, MIG zavarivanje također zahtijeva unos inertnog plina tijekom procesa zavarivanja poput argona, helija i drugih različitih mješavina koje služe za zaštitu zavara od vanjskih atmosferskih faktora (kisik i vlaga), koje mogu prouzročiti neželjene poremećaje i kasnije nestabilne zavare. [3]

Metoda koja koristi netopivu volfram-ovu elektrodu za stvaranje električnog luka i u najčešćim slučajevima inertni plin argon kao zaštitni plin, naziva se TIG metoda zavarivanja. Ovaj postupak je cijenjen zbog vrlo visoke preciznosti i kvalitete. [8]

Na sljedećoj slici može se vidjeti Volfram-ova elektroda inače korištena u ovoj metodi zavarivanja: [8]

Slika 9. Volframova elektroda



Izvor: <https://www.sigmat.hr/>

Volfram je element koji se koristi za izradu ovih elektroda, te sam postupak TIG zavarivanja ovisi o njegovoj tvrdoći i otpornosti na visoke temperature. U usporedbi s ostalim metalima, Volfram ima najvišu točku topljenja koja iznosi 3410° . Boje na Volfram-ovim elektrodama označavaju određenu vrstu elektrode, svaka sa svojim različitim karakteristikama.

Najčešće boje su sljedeće: [3]

- Zelena boja
- Crvena boja
- Zlatna boja
- Siva boja
- Plava boja

3. LASERSKO ZAVARIVANJE

Prvi laser je razvijen i izrađen 1960. godine od strane Amerikanca T. Maiman-a. Riječ laser je akronim na engleskom jeziku i predstavlja „*Light Amplification by stimulated emission of radiation*“. Kad se uspoređuje svjetlosni izvor lasera s drugim svjetlosnim izvorima, može se zaključiti kako je laserska svjetlost koherentna i usmjerena što bi značilo da posjeduje jednaku valnu duljinu, amplitudu i fazni pomak. Laser je uvijek iste boje zbog valne duljine koja se ne mijenja. [7]

Sam postupak laserskog zavarivanja koristi lasersku zraku u svrhu taljenja materijala kako bi se stvorila veza između dva materijala koji se obrađuju. Prednost ovakve vrste zavarivanja je velika preciznost usmjeravanja energije (laserske zrake) kod koje se smanjuje te gotovo uklanja rasipanje energije. Moguće je stvoriti čiste, pouzdane i snažne zavarene spojeve. [7]

Kao i ostale tehnologije zavarivanja, lasersko zavarivanje koristi se u automobilskoj, zrakoplovnoj i medicinskoj industriji. Naročito je korisno kod inače zahtjevnijeg zavarivanja aluminija.

Prije samog upotrebljavanja laserskog zavarivača obradak je potrebno očistiti i fiksirati u poziciju spremnu za zavarivanje.

3.1. Oprema za lasersko zavarivanje

Korišteni aparat za lasersko zavarivanje u ovom radu je uređaj marke „HUGONG“, preciznije aparat „HGLW 3000EW LASER WELDING“ prikazan na slici 10. Laserski zavarivač korišten u svrhe ovog diplomskog rada ima po potrebi uz opciju zavarivanja i opcije rezanja i čišćenja materijala.

Slika 10. Aparat za zavarivanje "HGLW 3000EW LASER WELDING"



Izvor: Autor

Također, prednosti ovakvog aparata su jednostavnost korištenja, velika brzina zavarivanja, te automatsko dodavanje dodatnog materijala pomoću elektromotora koji garantira konstantnost i preciznost. Neki od materijala za koje je ovaj aparat namijenjen su nehrđajući čelik, ugljični čelik i aluminijske legure. Postoje razne primjene za ovaj aparat u različitim industrijama poput zavarivanja stepeništa i elevatora, kuhinja i kupatila, razvodnih kutija, polica itd. Tehničke specifikacije aparata pokazana su u tablici 3. [5]

Tablica 3. Tehničke specifikacije aparata "HGLW/HGLC - 3000E"

| Laserski aparat za ručno zavarivanje „HGLW/HGLC-3000E“ | |
|--|-----------------|
| Masa | 250 kg |
| Dimenzija | 1140x730x930 mm |
| Maksimalna snaga | 3000 W |
| Napon | 3P AC 380 V |
| Frekvencija | 50 Hz |
| Struja | 50 A |

Izvor: Autor

3.1.1. Upravljačka ploča

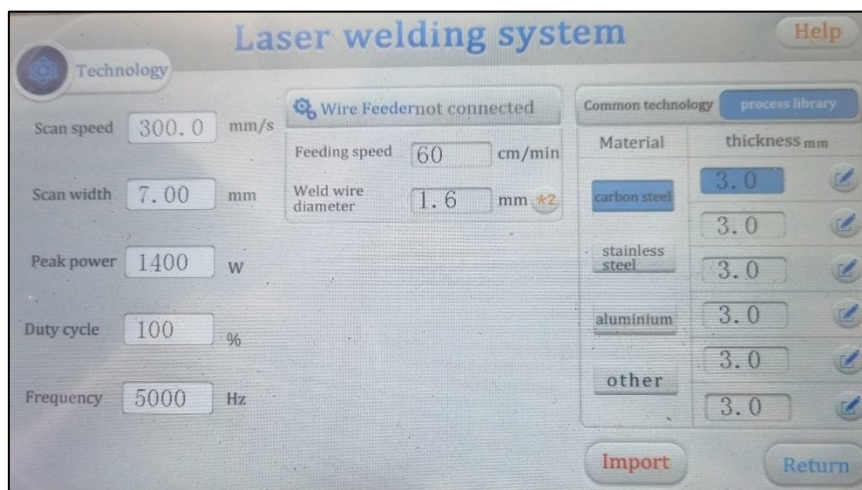
Slika 11. Upravljačka ploča laserskog zavarivača



Izvor: Autor

Na upravljačkoj ploči (slika 11) nalaze se glavne postavke koje su kalibrirane i namještane tijekom procesa zavarivanja konstrukcijskog čelika S355 u sučelju „Technology“ i to su brzina skeniranja lasera, širina skeniranja lasera, maksimalna snaga, radni ciklus lasera i frekvencija, navedeni parametri prikazani su na slici 12:

Slika 12. Upravljačka ploča - sučelje "Technology"



Izvor: Autor

Također, na upravljačkoj ploči postoji sučelje „Setting“ na kojem se namještavaju postavke vezane za laser, dodatni materijal, zaštitni plin i temperaturu.

3.1.2. Glava za zavarivanje

Na sljedećoj slici prikazana je glava za zavarivanje čija je glavna svrha usmjeravanje laserske zrake na površinu materijala koji se zavaruje.

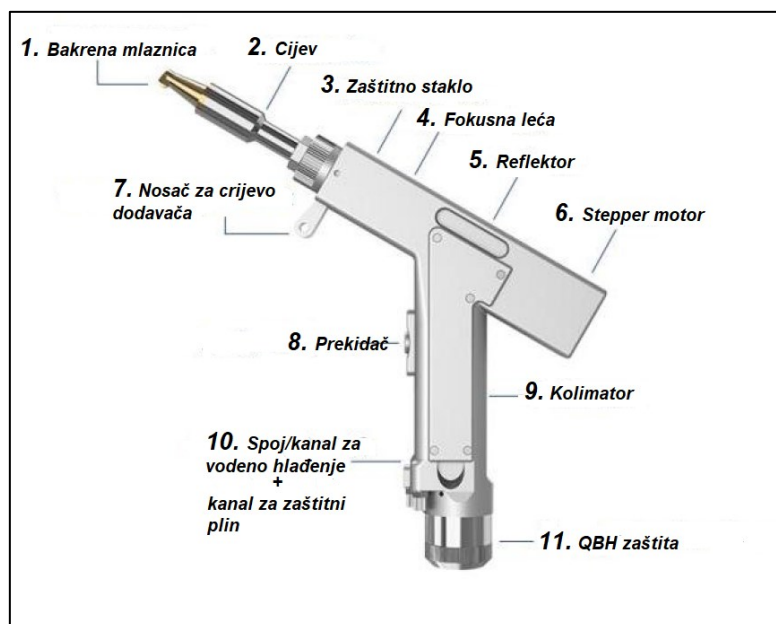
Slika 13. Glava za zavarivanje



Izvor: Autor

Neki od glavnih dijelova zavarivačke glave prikazani su na slici 14 i pojašnjeni u nastavku.

Slika 14. Glava za zavarivanje (dijelovi)



Izvor: Autor

Dijelovi zavarivačke glave označeni brojevima na slici su sljedeći: [5]

- Bakrena mlaznica – dio laserske glave koji pomaže i ima ulogu u vođenju laserskog snopa i također prolasku zaštitnog plina.
- Cijev - omogućava podešavanje žarišne duljine lasera
- Zaštitno staklo – ima ulogu zaštite optike od raznih prljavština, prašine i čestica koje bi mogle prouzročiti smetnje prilikom zavarivanja.
- Leća za fokusiranje - služi za fokusiranje laserskog snopa prema točki fokusa tj. željenoj točki zavarivanja
- Reflektor – element koji preusmjerava laserski snop
- Motor – mikro *stepper* motor kojim se upravlja položaj reflektora (reflektorske leće)
- Nosač žice za dodavanje materijala - nosač koji ima ulogu fiksiranja i pridržavanja cijevi kroz koju se dobavlja dodatni materijal
- Prekidač - omogućava korisniku uključivanje i isključivanje laserske glave
- Kolimator - optički uređaj za poravnanje ili "kolimiranje" laserskog snopa u pravocrtnu put prije samog fokusa na materijal koji obrađujemo
- Vodeni kanali – kanali za dovod i cirkulaciju vode koja služi za hlađenje glave prilikom procesa zavarivanja i samog održavanja stabilne temperature.
- Plinski kanali – kanali za dovod i cirkulaciju zaštitnog plina koji služi za sprječavanje oksidacije prilikom procesa zavarivanja
- QBH (eng. *Quick beam handling*) zaštitni omotač - omotač oko QBH konektora koji štiti sistem od opterećenja.

3.1.3. Dodavač za dodatni materijal

Sljedeći važan dio laserskog zavarivača je pomoćna kutija odvojena od samog laserskog zavarivača koja u sebi ima ugrađena dva elektro motora i postolja za kolute dodatnog materijala (slika 15) koji tijekom procesa zavarivanja uređaj po potrebi dodaje.

Slika 15. Dodavač

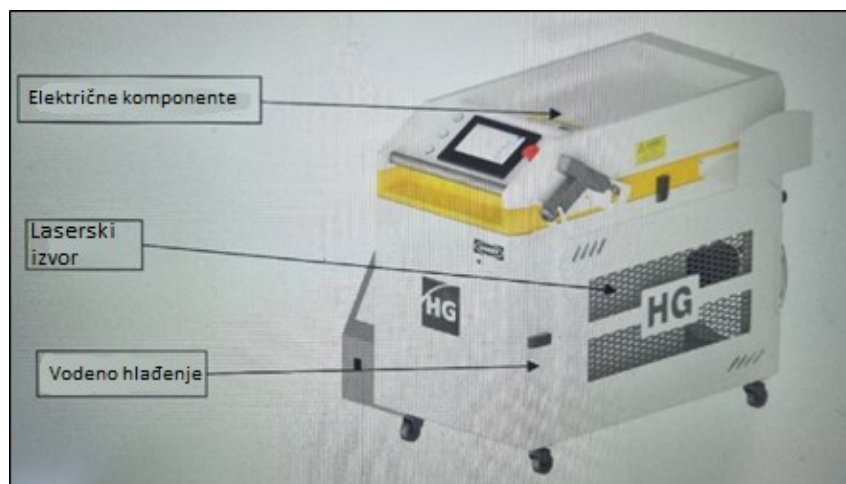


Izvor: Autor

U primjeru na slici vidi se dodavač žice s mogućnošću dodavanja dvije žice istovremeno ili po potrebi jednu.

3.1.4. Laserski izvor i hladnjak

Slika 16. Laserski izvor i vodeno hlađenje



Izvor: Autor

Laserski izvor pomoću poluvodičkih elemenata stvara lasersku zraku koja se putem optičkog kabla usmjerava prema zavarivačkoj glavi, cijeli sustav hladi vodeno hlađenje.

3.2. Opis postupka laserskog zavarivanja materijala S355

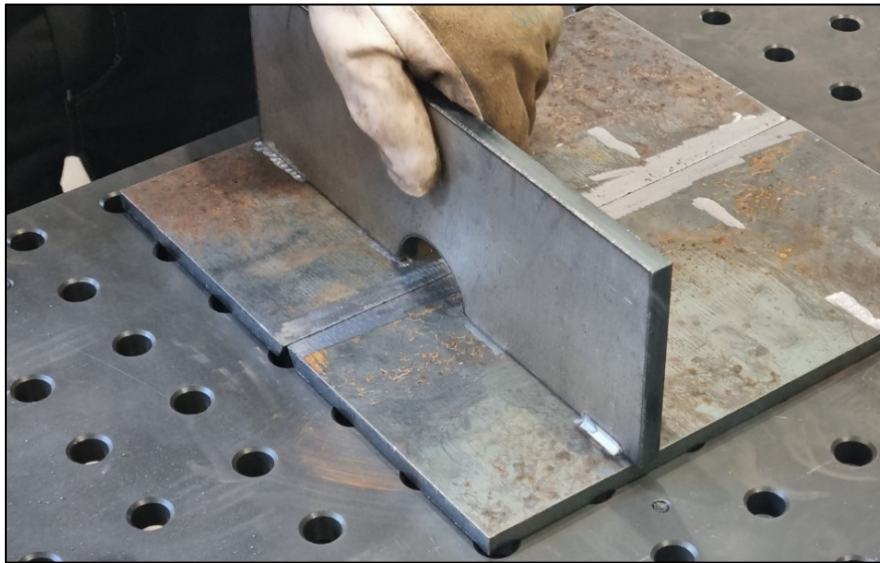
Za potrebe praktičnog dijela diplomskog rada, materijal koji se koristio je konstrukcijski čelik S355. Prije samog početka zavarivanja materijal je potrebno izbrusiti (očistiti) kako bi se uklonile nečistoće. Na slici 17 prikazana je obrada materijala brusilicom na otvorenom prostoru ispred radione.

Slika 17. Čišćenje materijala

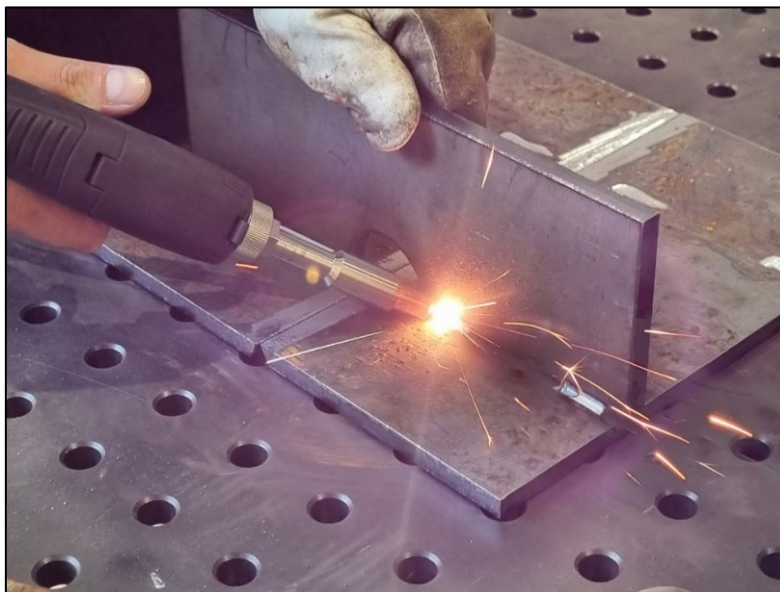


Izvor: Autor

Nakon postupka čišćenja, dvije čelične ploče (konstrukcijski čelik S355) spajaju se po dužini obrađene (očišćene) strane. Pomoću istog materijala, također obrađenog, stavljaju se dvije dodatne pomoćne pločice (ukrutka) koje će poslužiti kao postolje da dio materijala koji se zavaruje bude odvojen od radne površine. Montiranje i zavarivanje pomoćnih pločica vidljivo je na slikama 18 i 19.

Slika 18. Montiranje pomoćnih ploča

Izvor: Autor

Slika 19. Zavarivanje pomoćnih ploča

Izvor: Autor

Nakon pripreme, moguće je započeti s izradom sučeljenog zavora konstrukcijskog čelika S355, kao zaštitni plin koristio se 100% dušik.

Parametri prvog prolaza laserskim zavarivačem prikazani na upravljačkoj ploči su prikazani na slici 20. i oni iznose:

Brzina skeniranja laserske zrake: 300 mm/s

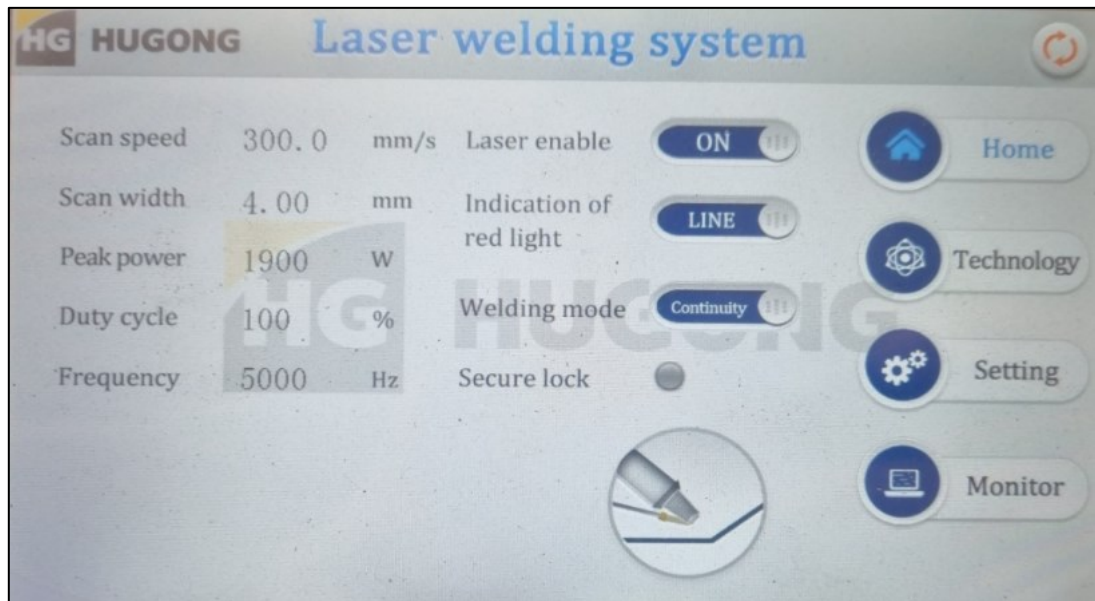
Širina laserske zrake: 4.00 mm

Maksimalna snaga: 1900 W

Radni ciklus: 100 %

Frekvencija: 5000 Hz

Slika 20. Parametri prvog prolaza na upravljačkoj ploči



Izvor: Autor

Također, na upravljačkoj ploči dodavača brzina za prvi prolaz (provar) namještena je na 50 cm/min kako bi se osiguralo sporije zavarivanje i samim time veći prolaz dodatnog materijala na drugu stranu sučeljenog spoja.

Rezultati nakon prvog prolaza i izrade korijena zavora prikazani su na sljedećim slikama. Na prvoj slici (slika 21) vidljiv je početak korijena zavora s gornje strane.

Slika 21. Korijen zavora (gornja strana)



Izvor: Autor

Na drugoj slici (slika 22) prikazan je isti početak korijena zavora, ali ovoga puta slikan s donje strane.

Slika 22. Korijen zavora(donja strana)



Izvor: Autor

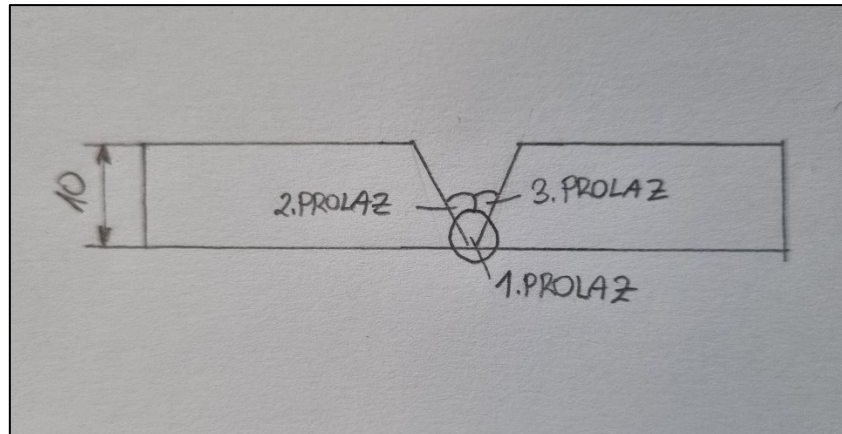
Nakon dovršenog provara (1. prolaz), parametri za 2. i 3. prolaz ostaju isti osim te brzina dodavača dodatnog materijala ostaje na 50 cm/min. Skica zavara i proces tijekom izrade drugog i trećeg zavara prikazane su na slikama 23 i 24.

Slika 23. Postupak varenja(2. i 3. prolaz)



Izvor: Autor

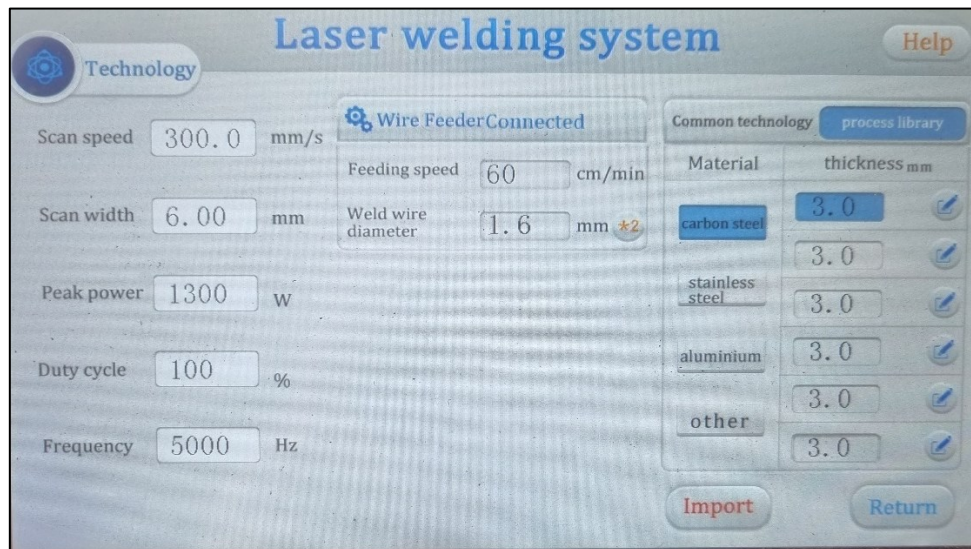
Slika 24. Skica zavarenog spoja - 2. i 3. prolaz



Izvor: Autor

Za 4. i 5. prolaz povećana je širina laserske zrake s 5,00 mm na 6,00 mm zbog veće površine koju je potrebno savladati tijekom postupka varenja. Također, povećana je snaga na 1300 W i brzina dodavača s 50 cm/min na 60 cm/min, što je vidljivo na sljedećoj slici upravljačke ploče.

Slika 25. Upravljačka ploča (4. i 5. prolaz)



Izvor: Autor

Nakon 4. i 5. prolaza izvršeno je kontrolno mjerenje temperature koja je iznosila 60° što je vidljivo na slici 26. Važno je napomenuti da se prije svakog prolaza, mjesto zavara očistilo kako ne bi došlo do smetnji prilikom nastavka zavarivanja.

Slika 26. Temperatura nakon 4. i 5. prolaza



Izvor: Autor

Za 6., 7. i 8. prolaz parametri ostaju isti kao i kod 4. i 5. prolaza. Temperatura na

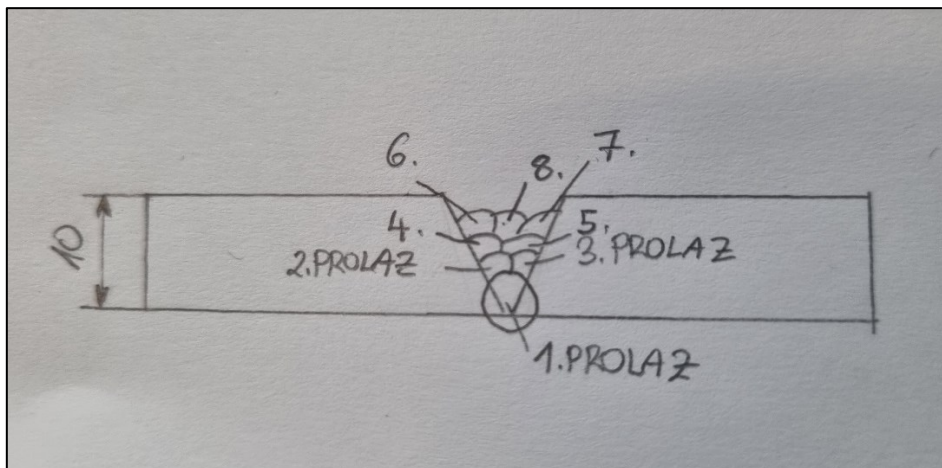
zavarenom spoju nakon 6. 7. i 8. prolaza iznosila je 95° (slika 27). Također, na slici 28 može se vidjeti skica trenutnog stanja zavarenog spoja nakon 6., 7. i 8. prolaza.

Slika 27. Temperatura nakon 6., 7. i 8. prolaza



Izvor: Autor

Slika 28. Skica zavarenog spoja - 6, 7. i 8. prolaz

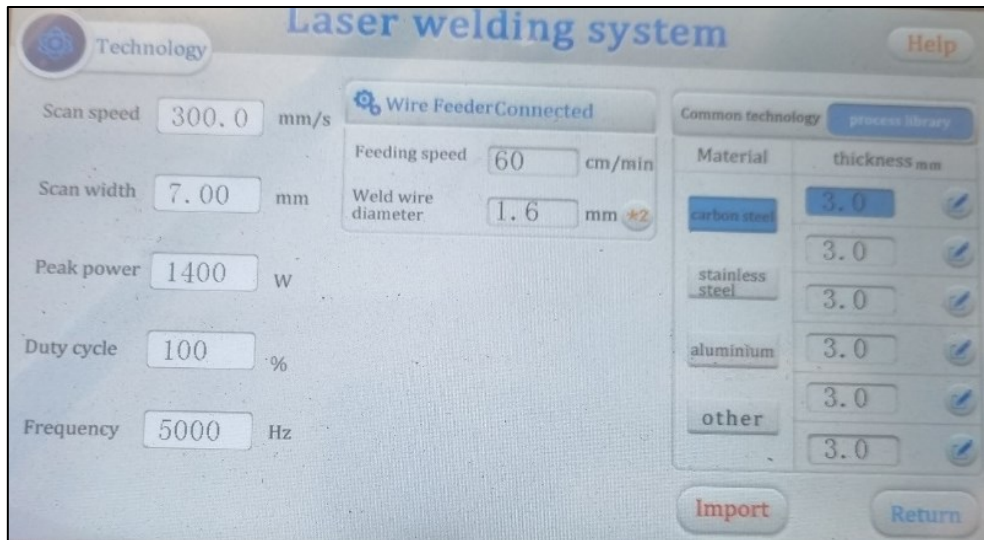


Izvor: Autor

Postupak prolaska nastavlja se s istima parametrima sve do 11. prolaska, nakon kojeg se za 12. prolaz snaga povećava s 1300 W na 1400 W te širina laserske zrake sa 6,00

mm na 7,00 mm. Brzina dodavača ostala je na 60 cm/min.

Slika 29. Upravljačka ploča (12. prolaz)



Izvor: Autor

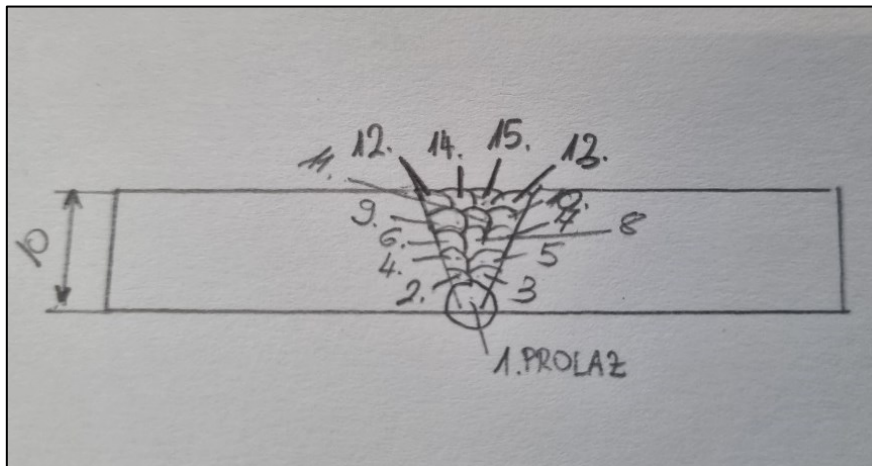
Nakon dovršenog 12. prolaska ustanovljeno je da je potrebno odraditi još 3 prolaza (13. 14. i 15.) kako bi se osigurala kompletna popuna spoja. Izgled zavarenog spoja nakon svih završenih prolaza prikazana je na slici 30 i skica na slici 31.

Slika 30. Zavareni spoj (sučeljeno)



Izvor: Autor

Slika 31. Skica zavarenog spoja - Svi prolazi



Izvor: Autor

Za izradu kutnog zavora, kao i kod sučeljenog, čelične ploče se bruse u svrhu uklanjanja nečistoća i hrđe. Za potrebe diplomskog rada, izradila su se dva primjera kutnog zavora konstrukcijskog čelika S355. Jedan primjerak sa samo jednim prolazom laserskog zavarivača i jedan primjerak s tri prolaza laserskim zavarivačem, u svrhu postizanja veće visine zavora te samim time i dobivanjem boljih svojstava. Na sljedećim slikama vidi se donji dio (slika 32) i gornji dio (slika 33) čeličnih ploča koje su se pripremile i spremne su za zavarivanje.

Slika 32. Donja ploča (kutni zavar)



Izvor: Autor

Slika 33. Gornja ploča (kutni zavar)



Izvor: Autor

Postavke zavarivača za 1. prolaz u kutnoj izvedbi prikazani su na slici 34 i one su iznosile:

Brzina skeniranja laserske zrake: 300 mm/s

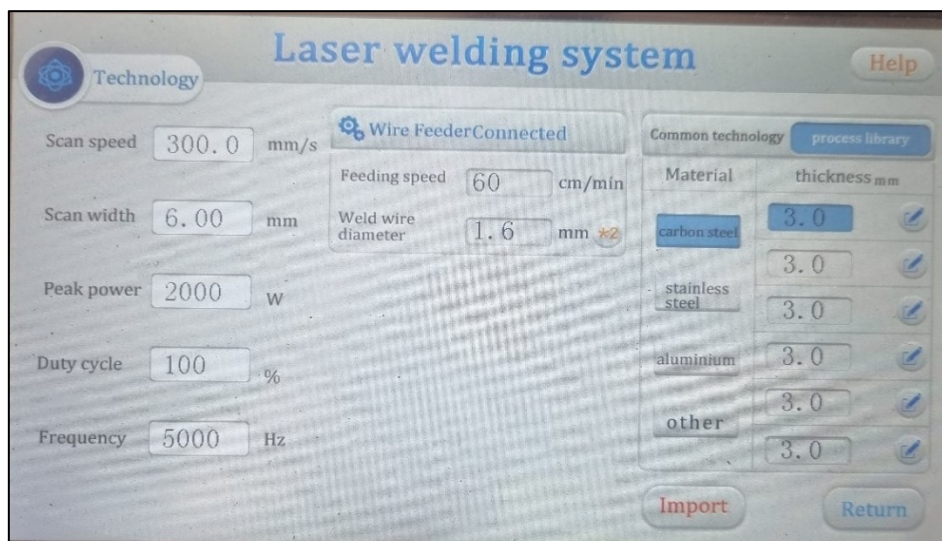
Širina laserske zrake: 6.00 mm

Maksimalna snaga: 2000 W

Radni ciklus: 100 %

Frekvencija: 5000 Hz

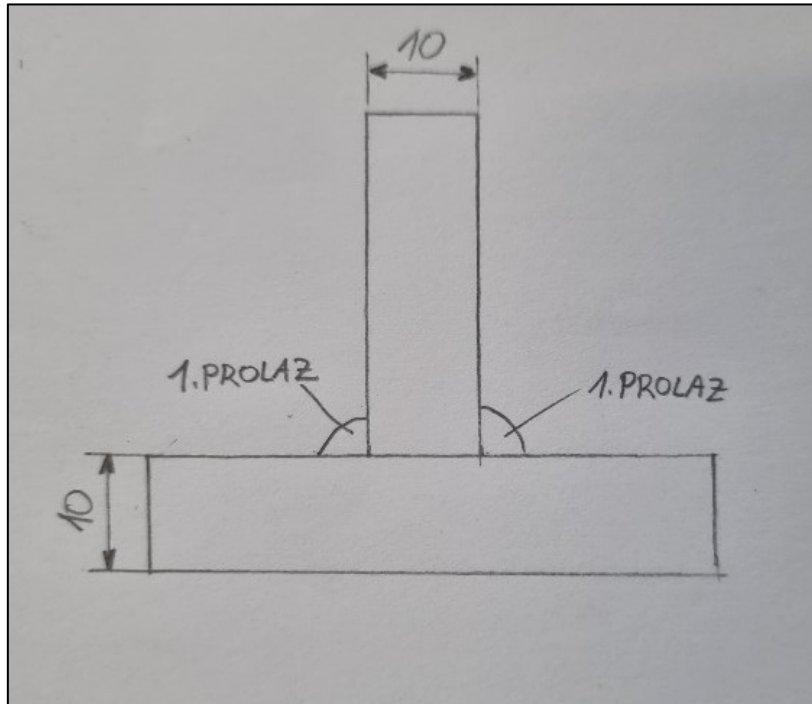
Slika 34. Upravljačka ploča (kutni zavar, 1 prolaz)



Izvor: Autor

Također, brzina dodavača dodatnog materijala iznosila je 60 cm/min. Na sljedećim slikama (slika 35 i 36) vidi se skica gotovog kutnog zavara u izvedbi s jednim prolazom i izgled samog zavara.

Slika 35. Skica zavarenog spoja - 1 prolaz



Izvor: Autor

Slika 36. Kutni zavar (1 prolaz)



Izvor: Autor

Postavke za kutni zavar s tri prolaza ostaju iste kao i kod kutnog zavara s jednim prolazom. Na slici je prikazan završeni kutni zavar nakon 3. prolaza.

Slika 37. Kutni zavar (3 prolaza)



Izvor: Autor

4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA KVALITETE ZAVARENOG SPOJA

Za laboratorijska ispitivanja zavarenog spoja mogu se koristiti razne metode, glavna podjela ispitivanja materijala je ispitivanje materijala NDT (eng. *Non – destructive testing*) metodom i DT (eng. *Destructive testing*) metodama. U diplomskom radu navest će se primjeri navedenih metoda testiranja, a поближе opisati korištene metode.

NDT metoda ispitivanja svrstava se u jednu od najvažnijih i pouzdanih metoda za utvrđivanje svojstva materijala. Glavni faktor ove metode je taj da metoda trajno ne oštećuje ispitivani materijal koji nakon ispitivanja zadržava svoja svojstva i strukturu. Pomoću NDT metoda moguće je utvrditi površinske i unutarnje greške u materijalu i dobiti uvid u makro i mikro strukturu materijala. Najčešće se ovakve metode koriste kod finaliziranih proizvoda, kojima se struktura ne smije narušiti, a svakako se moraju provjeriti svojstva materijala prije isporuke korisnicima. Usprkos brojnim prednostima ove metode koje pružaju uvid u strukturu materijala NDT metode imaju svoj nedostatak u obliku ekonomskog faktora i samih cijena opreme za ispitivanje. Neke od NDT metoda su sljedeće:

- Vizualno ispitivanje
- Radiografsko ispitivanje
- Ultrazvučno ispitivanje
- Ispitivanje penetrantima
- Ispitivanje magnetskim česticama

DT metode ispitivanja se provode na uzorcima materijala do same nepovratne deformacije kako bi se utvrdila maksimalna mehanička svojstva. Ova metoda pruža uvid u mehanička svojstva, otpornosti i performanse materijala. Neke od DT metoda su sljedeće:

- Statičko vlačno ispitivanje
- Statičko tlačno ispitivanje
- Ispitivanje udarnog rada loma
- Savojno ispitivanje

Glavni cilj ovih metoda je pronalazak i utvrđivanje nedostataka i grešaka u ispitivanim

materijalima kako bi se osigurala kvaliteta i pouzdanost krajnjeg materijala (proizvoda).

4.1. Priprema zavarenog spoja

Za potrebe diplomskog rada materijal koji se koristio je konstrukcijski čelik S355 koji spada u europsku normu „EN 10025-2004“. Ova vrsta čelika je manganski čelik srednje čvrstoće, također sadrži niski udio ugljika, lako se zavaruje i ima dobru otpornost na udarce. Može se podijeliti u 4 klase kvalitete:

- S355JR (1,0045)
- S355J0 (1,0553)
- S355J2 (1,0577)
- S355K2 (1,0596)

Objašnjena svih nabrojanih i navedenih oznaka pojašnjena su u tablici 4:

Tablica 4. Oznake materijala S355

| Oznaka | Značenje |
|--------|--|
| „S“ | Konstrukcijski čelik |
| „355“ | Minimalna vrijednost granice razvlačenja za ravni i dugi čelik debljine $\leq 16\text{mm}$ |
| „J0“ | Može izdržati energiju udarca najmanje 27 J na temperaturi od 0° |
| „JR“ | Vrijednost energije udarca najmanje 27 J na sobnoj temperaturi 20° |
| „J2“ | Minimalna vrijednost energije udarca 27 J na temperaturi od -20° |
| „K2“ | Minimalna vrijednost energije udarca od 40 J na -20° |

Izvor: Autor

Konstrukcijski čelik S355 najčešće se upotrebljava u gotovo svim dijelovima konstrukcija i konstrukcijske izrade i upotrebljava se u industrijama poput: [6]

- Izrada mostova i obalnih građevina
- Elektrana

- Rudarska oprema i strojevi

Kemijski sastav navedenog materijala S355 i njegovih klasa materijala prikazani su u tablici u nastavku:

Tablica 5. Kemijski sastav materijala S355

| | | | S355 Kemijski sastav %(\leq) | | | | | | |
|---------------|---------|--------|----------------------------------|------|------|-------|-------|------|-------|
| Standard | Željezo | Razred | C | Si | Mn | P | S | Cu | N |
| EN 10025-2 | S355 | S355JR | 0,24 | 0,55 | 1,60 | 0,035 | 0,035 | 0,55 | 0,012 |
| | | S355J0 | 0,20 | 0,55 | 1,60 | 0,030 | 0,030 | 0,55 | 0,012 |
| | | S355J2 | 0,20 | 0,55 | 1,60 | 0,025 | 0,025 | 0,55 | - |
| | | S355K2 | 0,20 | 0,55 | 1,60 | 0,025 | 0,025 | 0,55 | - |

Izvor: Autor

Također, važno je napomenuti dodatni materijal korišten prilikom izrade zavarenog spoja konstrukcijskog čelika S355 laserskim zavarivanjem, a to je elektroda „VAC 60“. Kemijski sastav ove vrste elektrode je prikazan u sljedećoj tablici:

Tablica 6. Kemijski sastav korištene elektrode "VAC 60"

| C | Si | Mn | P | S |
|------|------|------|--------|--------|
| 0,08 | 0,90 | 1,50 | <0,025 | <0,025 |

Izvor: Autor

Žica VAC 60 pogodna je za zavarivanje ne-legiranih čelika i niskolegiranih čelika čvrstoće do $530 \text{ N} / \text{mm}^2$.

4.2. Norme za ispitivanje kvalitete zavarenih spojeva

Norme korištene za potrebe diplomskog rada kako bi se osigurala kvalitetna i efikasna provedba ispitivanja su sljedeće:

1. Norma ISO 5178:2019 (Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Uzdužno vlačno ispitivanje metala zavara zavarenih spojeva nastalih taljenjem)

Prva norma (ISO 5178:2019) propisuje veličine testnih uzoraka i sam postupak ispitivanja na vlačnu čvrstoću kako bi se utvrdila mehanička svojstva zavara. Odnosi se na metalne materijale u svim oblicima čiji su spojevi nastali fuzijskim procesom u obliku taljenja. U ovoj normi nalaze se poglavlja poput principa ispitivanja, načina uzimanja uzoraka iz zavarenih spojeva, označavanje i dimenzije testnih uzoraka, propisana površinska kvaliteta uzorka i naputak o pregledavanju testnih uzoraka nakon izvršenog procesa ispitivanja ujedno s primjerom izvještaja ispitivanja.

2. Norma ISO 6892-1:2009 (Metalni materijali – Vlačno ispitivanje – 1.dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi)

Druga norma (ISO 6892-1:200) specificira metode vlačnog ispitivanja metalnih materijala i definira mehanička svojstva koja se mogu odrediti na sobnoj temperaturi. Također, sadrži daljnje preporuke za računalno upravljanje ispitne strojeve. U njoj se mogu pronaći propisane dužine testnih uzoraka, preporuke za pripremu i obavezne dimenzije testnih uzoraka, princip vlačnog testiranja (Kalibracija aparature za ispitivanje), primjeri rezultata testiranja i primjeri izvještaja ispitivanja.

3. Norma ISO 148-1:2016 (Metalni materijali – Ispitivanje udarnog loma Charpyjevim batom – 1.dio: Metoda ispitivanja)

U ovoj normi nalaze se informacije o Charpyjevoj metodi ispitivanja udarnog loma za utvrđivanje energije apsorbirane u ispitivanju udara metalnih materijala. Detaljnije, u normi se nalaze poglavlja koja ukazuju na pravilno izvođenje testa, uzimanje i pripremanje uzoraka, opremi potrebnoj za izvođenje ovog testa, proceduri testiranja i naposljetku pravilnom iznošenju testnih rezultata.

4. Norma ISO 17639:2022 (Razorna ispitivanja zavara na metalnim materijalima – Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavara)

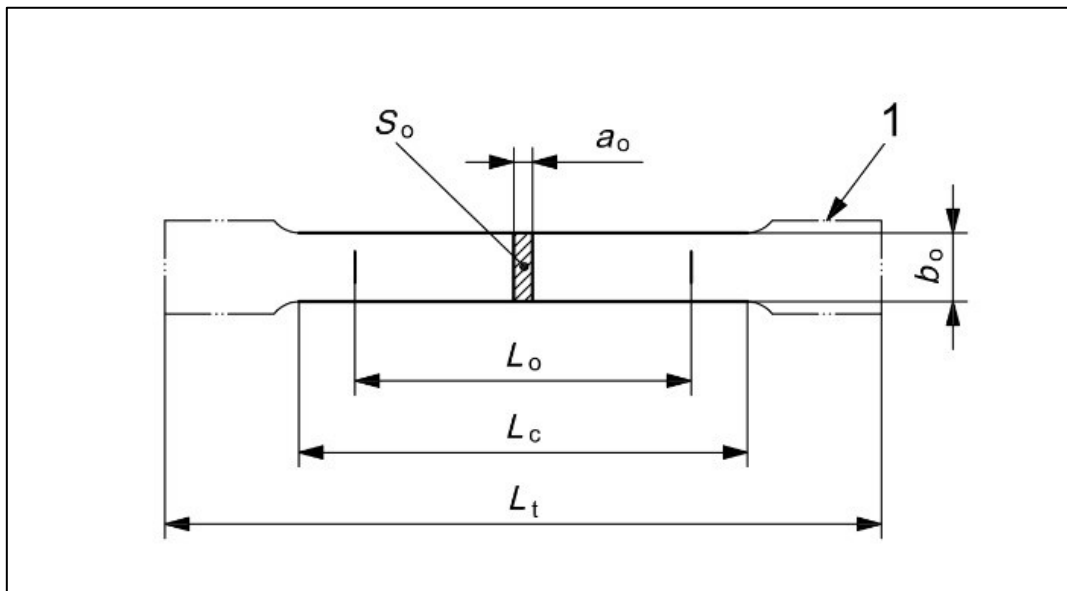
U ovoj normi daju se preporuke za pripremu testnih uzoraka, provođenje testiranja i glavni cilj mikroskopskih i makroskopskih ispitivanja. Također, kao i u prijašnje navedenim normama daje se primjer pravilnog izlaganja testnih rezultata.

4.3. Priprema uzoraka za laboratorijsko ispitivanje

Za potrebe laboratorijskog ispitivanja uzorak materijala za statičko vlačno ispitivanje priprema se prema normi HRN ISO 6892-1. Kod izrada epruveta za ispitivanje udarne žilavosti testni uzorci izradili su se prema istoj normi.

Uzorci za testiranje izrezani su pomoću laserskog rezača te je važno napomenuti da epruvete pripremljene na ovaj način imaju mogućnost promjene unutarnje strukture tijekom zagrijavanja materijala. Skica uzorka za vlačni test prikazana je na sljedećoj slici:

Slika 38. Skica uzorka - vlačni test



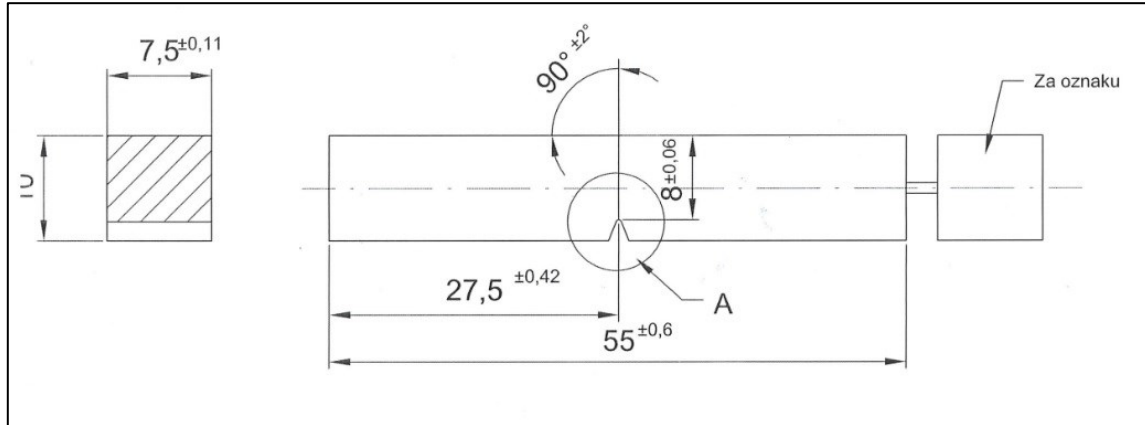
Izvor: Autor

Oznake(parametri) epruvete nabrojani su i objašnjeni u nastavku:

- S_0 – izvorna površina poprečnog presjeka paralelne duljine
- a_0 – izvorna prosječna debljina epruvete
- L_0 – glavna mjerna duljina deformacija
- L_c – proširena mjerna duljina deformacija
- L_t – duljina epruvete (testnog uzorka)
- b_0 – izvorna prosječna širina epruvete

Također, u nastavku može se vidjeti i skica uzorka za ispitivanje na udarnu žilavost prema normi HRN ISO 148-1 (slika 39). :

Slika 39. Skica uzorka - udarna žilavost



Izvor: Autor

Dimenzije epruvete su sljedeće:

- Duljina (l) – 55 mm
- Širina(a) – 10 mm
- Kut V zarez – 45°
- Dubina zarez – 2 mm

4.4. Statični vlačni test zavarenog spoja

Statični vlačni test metoda je ispitivanja pomoću koje se utvrđuje čvrstoća zavarenog spoja. Čvrstoća materijala je pojam kojim se opisuje sposobnost materijala da bez loma ili trajne deformacije izdrži trenutna naprezanja koja djeluju na njega. Opisuje kako će se materijal ponašati u različitim uvjetima pod različitim naprezanjima ili silama. Test statične vlačne čvrstoće jedan je u nizu važnih i korisnih testova kojim se osigurava kvaliteta materijala za daljnje korištenje u brojnim industrijama.

Za potrebe diplomskog rada poglavlje statičkog vlačnog testa pobliže će se opisati i razjasniti u sljedeće četiri točke koje govore o ispitnoj opremi i normama, opisu metode ispitivanja zavarenog spoja i rezultatima ispitivanja.

4.4.1. Ispitna oprema

Glavna ispitna oprema ovog diplomskog rada za statični vlačni test je univerzalna statička kidalica „Messphysik BETA 250“ opremljena laserskim ekstenziometrom. Navedena korištena statička vlačna kidalica prikazana je na sljedećoj slici. (slika 40)

Slika 40. MESSPHYSIK BETA 250 univerzalna statička kidalica



Izvor: Autor

4.4.2. Ispitne norme

Provedba vlačnog testa izvedena je prema već navedenoj i objašnjenjnoj normi HRN EN ISO 6892-1. (Metalni materijali – Vlačno ispitivanje 1.dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi) i prema normi ISO 5178:2019 (Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima – Uzdužno vlačno ispitivanje metala zavara zavarenih spojeva nastalih taljenjem).

4.4.3. Opis metode ispitivanja zavarenog spoja

Prije samog korištenja statičke vlačne kidalice, ispitni uzorci označili su se brojevima od 1 do 9. Za potrebe diplomskog rada korišteno je 5 epruveta (slika 41) najmanjih odstupanja u dimenzijama (2,3,4,5 i 6) radi ponovljivosti rezultata te su njihove mjere prikazane u tablici 7.

Tablica 7. Dimenzije epruveta sa parametrima vlačnog testa

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|-------|-------|------|-------|---|--------|----|----|----|-------|--------|----------|----------|
| 2 | 2024/Simetic-2 | 9,99 | 19,91 | 9,95 | 19,59 | / | 194,95 | 79 | 94 | LE | 7,755 | 33,840 | L0 80 | Lc 94 |
| | | 9,81 | 19,46 | | | | | | | | | | | |
| | | 10,05 | 19,41 | | | | | | | | | | | |
| 3 | 2024/Simetic-3 | 9,96 | 20,00 | 9,90 | 19,58 | / | 193,91 | 79 | 94 | LE | 7,755 | 33,840 | L0 80 | Lc 94 |
| | | 9,78 | 19,54 | | | | | | | | | | | |
| | | 9,97 | 19,20 | | | | | | | | | | | |
| 4 | 2024/Simetic-4 | 9,97 | 20,19 | 9,89 | 19,63 | / | 194,11 | 79 | 94 | LE | 7,755 | 33,840 | L0 80 | Lc 94 |
| | | 9,70 | 19,51 | | | | | | | | | | | |
| | | 10,00 | 19,18 | | | | | | | | | | | |
| 5 | 2024/Simetic-5 | 10,00 | 19,10 | 9,96 | 19,37 | / | 192,86 | 78 | 94 | LE | 7,755 | 33,840 | L0 80 | Lc 94 |
| | | 9,95 | 19,26 | | | | | | | | | | | |
| | | 9,92 | 19,75 | | | | | | | | | | | |
| 6 | 2024/Simetic-6 | 10,04 | 19,62 | 9,93 | 19,32 | / | 191,88 | 78 | 94 | LE | 7,755 | 33,840 | L0 80 | Lc 94 |
| | | 9,77 | 19,44 | | | | | | | | | | | |
| | | 9,98 | 18,91 | | | | | | | | | | | |

Izvor: Autor

Širina i duljina epruveta mjere se na tri različita dijela te se njihova srednja vrijednost računa i dobiva u nastavku. Uz navedenu duljinu i širinu u tablicu unosom istih, dobije se i mjerna duljina deformacije „Lo“ i „Lc“ koje se na epruvetama označuju. Parametar v_1 označava brzinu deformacije do dogovorene granice razvlačenja ($R_{p0,2}$), a parametar v_2 označava brzinu deformacije nakon $R_{p0,2}$.

Također, važno je obratiti pozornost na same nečistoće koje bi mogle prouzročiti smetnje kod očitavanja laserskog ekstenziometra. Iz tog razloga epruvete su se prije postupka vlačnog testa očistile pomoću 100 % etanola kako bi se mogući problem uklonio, slika epruveta prikazana je u nastavku.

Slika 41. Epruvete za statički vlačni test



Izvor: Autor

4.5. Ispitivanje udarne radnje loma zavarenog spoja

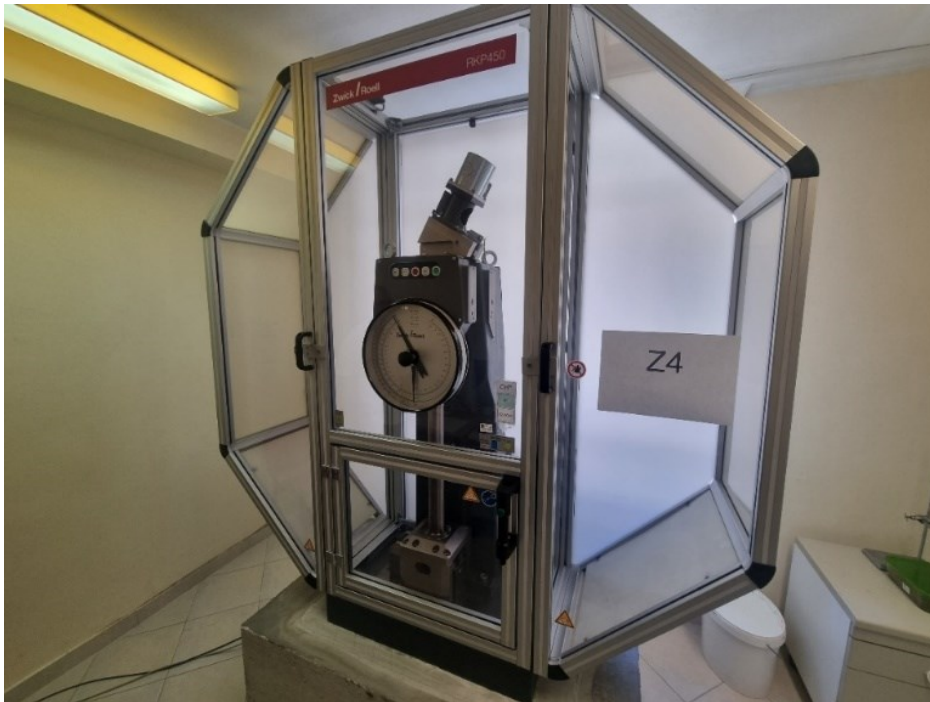
Svojstvo materijala da apsorbira energiju i plastično se deformira prije javljanja loma naziva se žilavost. Strukture koje su izložene konstantnim dinamičkim opterećenjima trebaju imati visoki stupanj žilavosti kako bi podnijele udarce i nagla opterećenja.

U sljedećem dijelu u dvije glavne točke поближе će se opisati ispitna oprema i norme te opis metode ispitivanja udarne radnje loma zavarenog spoja.

4.5.1. Ispitna oprema

Jedna od metoda ispitivanja udarne radnje loma kako bi se odredila žilavost materijala pri opterećenjima je Charpy-jev test koji se koristi u ovom diplomsko radu. Ispitivanje za potrebe diplomskog rada izvršilo se na „ZWICK ROELL RKP450“ Charpy-jevom batu (slika 42).

Slika 42. ZWICK ROELL RKP450 Charpy-jevo klatno



Izvor: Autor

Kalibracija uređaja prije ispitivanja materijala prema normi ISO 148-1 je objašnjena u nastavku. Prije svakog ispitivanja potrebno je provjeriti gubitke energije koja se apsorbira trenjem. Energija koju apsorbira trenje uključuje sljedeće elemente:

- Otpor zraka
- Trenje ležaja
- Trenje kazaljke analognog pokazivača

Zbog utjecaja na mjerenje apsorbirane energije, otpor batu u trenutku mjerenja mora pružiti samo i isključivo ispitni uzorak(sva druga trenja moraju biti zanemariva).

Utvrđivanje gubitaka nastalog zbog trenja kazaljke analognog pokazivača sastoji se od uobičajenog korištenja stroja, ali bez ispitnog uzora, kod kojeg se bilježi očitavanje energije K_1 . Drugo ispitivanje se onda izvodi bez poništavanja kazaljke indikatora pokazivača nakon kojeg se očitava energija K_2 .

Dakle, formula za gubitak zbog trenja u indikatoru za vrijeme porasta glasi:

$$p = K_1 - K_2$$

kada skala mjeri energiju. U slučaju da uređaj nema analogni pokazivač, mjerenje nije potrebno provoditi.

Za utvrđivanje gubitaka uzrokovanih trenjem ležaja i otporom zraka za pola otklona bata postupak je sljedeći. Nakon određivanja K_2 , bat se vraća u prvobitni položaj. Bez resetiranja pokazivača bat se pušta u slobodni pad, bez vibracija i dodatnih opterećenja. Omogućuje se 10 polovina otklona te nakon početka 11. polovine otklona očitava se i bilježi vrijednost K_3 i uvrštava u sljedeću formulu:

$$p' = \frac{1}{10}(K_3 - K_2)$$

Ukupni gubitak uzrokovan trenjem ($p + p'$) ne smije prijeći 0,5% nominalne potencijalne energije uređaja odnosno 2,25. U slučaju da prelazi i nije moguće smanjiti gubitke trenja smanjenjem trenja pokazivača, tada je ležajeve potrebno očistiti ili u potpunosti zamijeniti novima.

U slučaju ovog diplomskog rada, dobiveni su sljedeći rezultati:

$K_1 = 1,5$; $K_2 = 1,3$; $K_3 = 11$, dakle slijedi:

$$P = 1,5 - 1,3 = 0,2; p' = \frac{1}{10}(11 - 1,3) = 0,97 < 2,25$$

Iz rezultata može se zaključiti da su uvjeti zadovoljeni.

Potrebno je prije početka testiranja zamijeniti držače epruveta (slika 43) na samom uređaju jer su se za potrebe diplomskog rada koristile reducirane epruvete dodatno pojašnjene u drugoj točki ovog poglavlja.

Slika 43. Zamjena držača epruveta (Charpy)



Izvor: Autor

Također, sve reducirane epruvete za test udarne radnje loma potrebno je izmjeriti i provjeriti ako odgovaraju tolerancijama prepisanim u normi ISO 148-1. U tablici 8 prikazane su izmjerene vrijednosti dimenzija epruveta.

Tablica 8: Dimenzije epruveta za ispitivanje udarne radnje loma

| DIMENZIJE ISPITNOG UZORKA (dužina D, visina V, širina Š) | | | | | | |
|--|-------|-------|------|-----------|-----------|--------|
| | D | V | Š | D [mm] | V [mm] | Š [mm] |
| 1-1 | 54.89 | 9,99 | 7,48 | 54.95 | 9,94 | 7,43 |
| | 55.01 | 9,95 | 7,43 | | | |
| | 54.95 | 9,88 | 7,39 | | | |
| 1-2 | 55.03 | 10,01 | 7,53 | 54.95 | 9,98 | 7,51 |
| | 54.95 | 9,98 | 7,49 | | | |
| | 54.87 | 9,95 | 7,50 | | | |
| 1-3 | 55.11 | 10,05 | 7,48 | 55.02 | 10,06 | 7,47 |
| | 55.04 | 10,11 | 7,47 | | | |
| | 54.90 | 10,02 | 7,46 | | | |
| 2-1 | 54.94 | 10,02 | 7,45 | 54.93 | 10,04 | 7,48 |
| | 54.97 | 10,03 | 7,48 | | | |
| | 54.89 | 10,07 | 7,52 | | | |
| 2-2 | 54.95 | 10,06 | 7,50 | 55.00 | 10,06 | 7,48 |
| | 55.08 | 10,07 | 7,49 | | | |
| | 54.96 | 10,04 | 7,52 | | | |

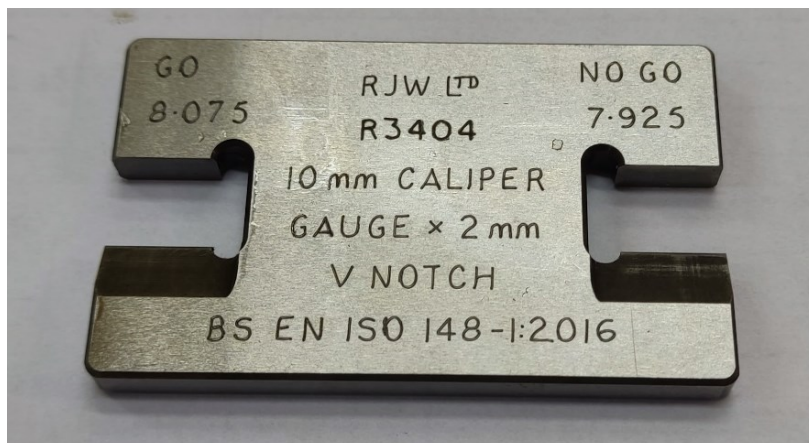
| | | | | | | |
|-----|-------|-------|------|-------|-------|------|
| 2-3 | 55.00 | 10,04 | 7,46 | 55.03 | 10,03 | 7,47 |
| | 55.07 | 10,04 | 7,46 | | | |
| | 55.02 | 10,02 | 7,50 | | | |
| 3-1 | 54.94 | 10,00 | 7,51 | 54.96 | 9,97 | 7,50 |
| | 54.97 | 9,95 | 7,52 | | | |
| | 54.97 | 9,95 | 7,46 | | | |
| 3-2 | 55.02 | 10,05 | 7,51 | 54.99 | 10,09 | 7,45 |
| | 55.00 | 10,07 | 7,52 | | | |
| | 54.95 | 10,14 | 7,46 | | | |
| 3-3 | 55.07 | 10,07 | 7,50 | 55.03 | 10,03 | 7,47 |
| | 55.05 | 10,04 | 7,47 | | | |
| | 54.97 | 9,98 | 7,45 | | | |

Izvor: Autor

Uzorci se mjere na tri različita međusobno jednako udaljena mjesta i uzimaju se srednje vrijednosti prikazane u tablici, a to su dužina(D), visina(V) i širina(Š).

Pomoću alata na slici 44 koji je izrađen prema standardima propisanim normom ISO 148-1, provjeravaju se V zarezni izrađeni reducirani epruveta koje moraju odgovarati predviđenim utorima na alatu. U slučaju da ne odgovaraju, odbacuju se jer u tom slučaju nisu izrađene u mjerama propisanim normom.

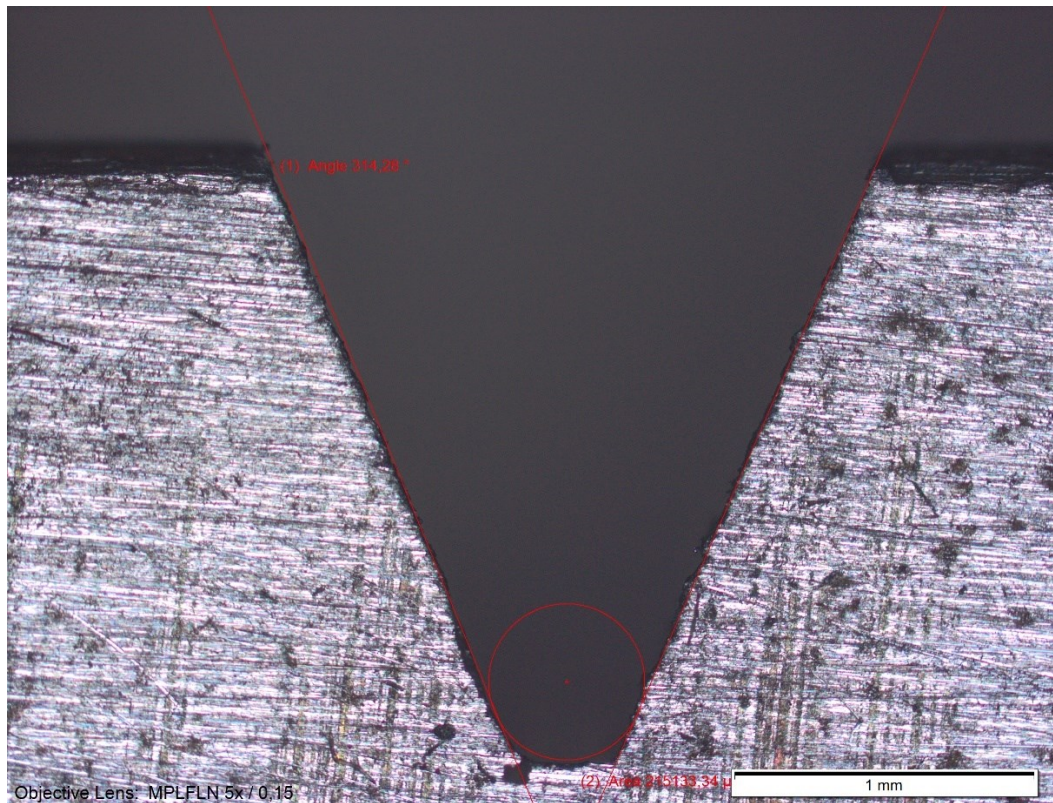
Slika 44. Alat za provjeru V zarezni ispitnih uzoraka



Izvor: Autor

Makro ispitivanje V zarezni ispitnih uzoraka pokazalo je da sve epruvete, korištene za potrebe ovog diplomskog rada, zadovoljavaju zadane mjere i tolerancije propisane normom. Primjer slike provjere V zarezni makro ispitivanjem prikazano je na sljedećoj slici(slika 45).

Slika 45. Makro kontrola V zarez (eproveta: 2-1)



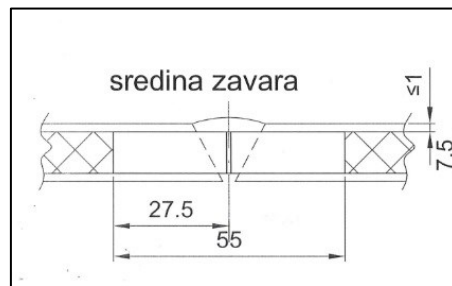
Izvor: Autor

Na prikazanoj slici vidi se kut od $314,28^\circ$ koji kad se oduzme od punog kuta od 360° daje vrijednost kuta od $45,7^\circ$ koji od 45° smije odstupati 2° prepisana normom ISO 148-1. Također, kružnicom je provjeren V zarez čija nominalna dimenzija mora iznositi $0,25\text{ mm}$ s dopuštenom tolerancijom od $\pm 0,025\text{ mm}$.

4.5.2. Ispitne norme i epruvete

Provedba ispitivanja udarne radnje loma izvedena je prema već navedenoj opisanoj normi ISO 148-1:2016. Za potrebe diplomskog rada izradile su se tri vrste po tri komada reduciranih epruveta za ispitivanje udarne radnje loma. Epruvete je prije obrade glodalicom bilo potrebno nagristi pomoću otopine „Nital“, koja će se kod makro i mikro ispitivanja detaljnije objasniti, kako bi do zavar došao do izražaja i kako bi ga bilo moguće označiti za obradu. Prva iteracija epruveta V zarez ima na sredini zavora i skica nacrtu epruvete prikazana je na slici 46.

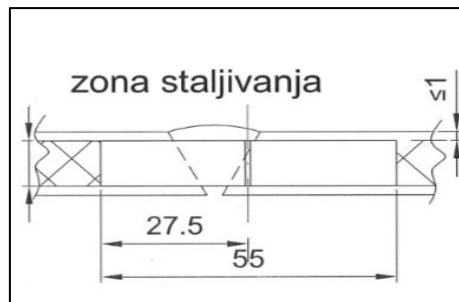
Slika 46. Charpy-jeva epruveta (V zarez - sredina zavara)



Izvor: Autor

Druga iteracija epruvete je Charpy-jeva epruveta na kojoj se V zarez nalazi u zonu staljivanja i ona je prikazana na slici 47.

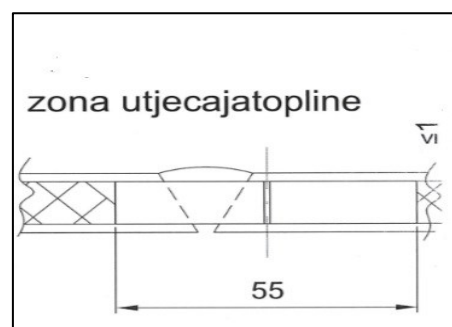
Slika 47. Charpy-jeva epruveta (V zarez - zona staljivanja)



Izvor: Autor

Treća iteracija Charpy-jeve epruvete je epruveta čiji je V zarez smješten u zoni utjecaja topline (slika 48)

Slika 48. Charpy-jeva epruveta (V zarez - zona utjecaja topline)



Izvor: Autor

Razlog drugačijih pozicija V zareza je dobivanje mehaničkih svojstava različitih zona zavara kako bi se utvrdile najslabije točke zavarenog spoja i samim time osiguralo

kvalitetno tumačenje rezultata i kvalitete zavara.

Postupak ispitivanja je jednostavan, epruveta s V zarezom (slika 49) postavlja se u horizontalan položaj na nosače uređaja, zatim ga klatno udara po sredini okomito na V zarez (slika 50). Mjera žilavosti materijala je energija koja se mjeri prema visini do koje se klatno podigne nakon udara.

Slika 49. Charpy-jeve epruvete sa V zarezom



Izvor: Autor

Slika 50. Charpy-jeva epruveta u horizontalnim držačima



Izvor: Autor

4.6. Mikro i makro ispitivanje zavarenog spoja

Makro i mikro ispitivanja pružaju uvid u strukturu zavarenog spoja na različitim uvećanjima. Pomoću makro ispitivanja jasno se vide različite zone poput osnovnog materijala, zone utjecaja topline i samog zavara.

Ovakva vrsta ispitivanja omogućuje vizualan pregled zavarenog spoja u kojem je moguće primijetiti nepravilnosti poput pukotina, rupica, poroznosti i slično. Pomoću njih uspostavlja se jasno stanje kvalitete zavarenog spoja.

Poput statičkog vlačnog testa poglavlje ovog diplomskog rada vezano za makro i mikro ispitivanja zavarenog spoja podijelit će se na tri glavne točke, a one su sljedeće:

4.6.1. Ispitna oprema

Za ispitnu opremu makro i mikro ispitivanja koriste se sljedeći mikroskopi:

- Makro – „SZX10 OLYMPUS“ optički stereo mikroskop (slika 51)
- Mikro – „OLYMPUS BX51“ metalografski svjetlosni mikroskop (slika 52)

Slika 51. „SZX10 OLYMPUS“ Stereo Mikroskop



Izvor: Autor

Slika 52. – „OLYMPUS BX51“ metalografski svjetlosni mikroskop



Izvor: Autor

4.6.2. Ispitne norme

Provedba makro i mikro ispitivanja zavarenog spoja izvedena je prema pravilima norme ISO 17639:2022 (Razorna ispitivanja zavara na metalnim materijalima – Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavara). U normi su preporuke za pripremu testnih uzoraka, provođenje testiranja i glavni cilj mikroskopskih i makroskopskih ispitivanja.

4.6.3. Opis metode makro i mikro ispitivanja zavarenog spoja

Makro i mikro ispitivanja provedena su na testnom uzorku uzetom iz epruvete. Kako bi se uzorak izdvojio iz same epruvete korištena je dijamanta pila „LECO“ (slika 53).

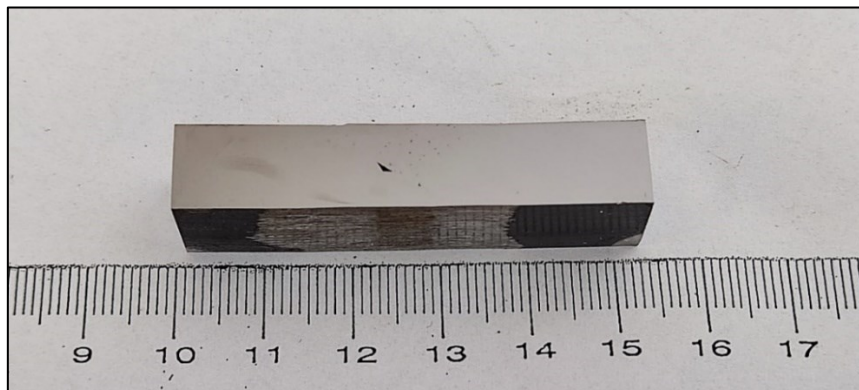
Slika 53. Dijamanta pila



Izvor: Autor

Postupak rezanja provodio se nakon zatvaranja poklopca stroja te je kao izvor hlađenja poslužila mješavina destilirane vode i tekućina koja služi kao lubrikant i ujedno ima svojstva hlađenja. Nakon postupka rezanja dobio se uzorak prikazan na slici 54 veličine otprilike oko 5 cm.

Slika 54. Uzorak nakon rezanja iz epruvete(*i nakon poliranja)



Izvor: Autor

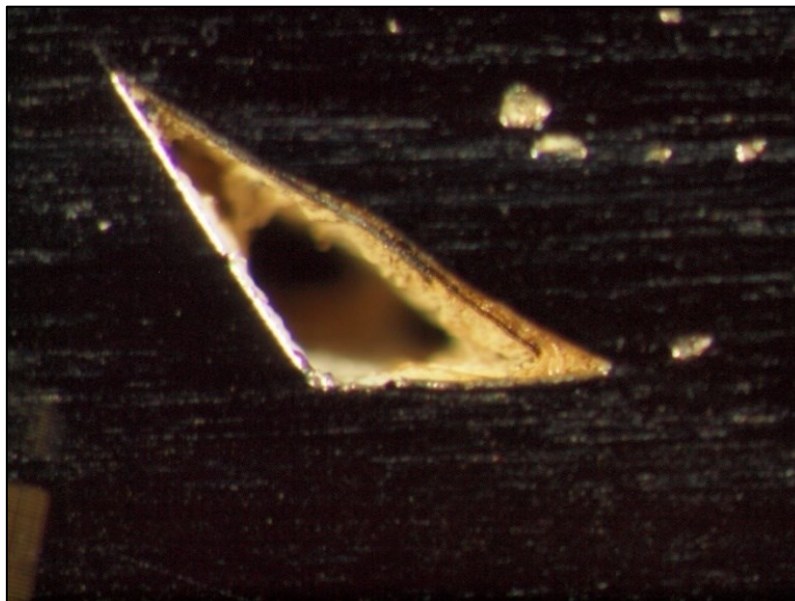
Dobiveni uzorak se prije nagrizanja pregledao makroskopski te se na uzorku već tada detaljno vide nepravilnosti poput mjehurića i pukotina kao posljedica prskanja taline tijekom procesa zavarivanja. Na slici 55 vidi se pukotina većih dimenzija i manje rupičaste greške pod uvećanjem od 8 puta te na slici 56 iste greške pod uvećanjem od 32 puta.

Slika 55. Makro testiranje - uvećanje 8X



Izvor: Autor

Slika 56. Makro testiranje - uvećanje 32X

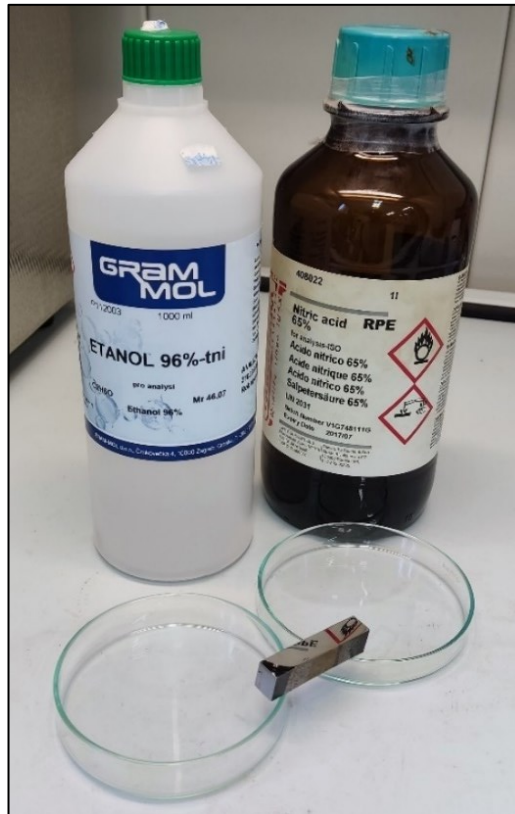


Izvor: Autor

Nagrizanje materijala izvodi se s pomoću otopine „Nital“, mješavine etanola i dušične kiseline prikazanih na slici 57 u sljedećem omjeru:

- 10 ml – Etanol
- 0,3 ml – Dušična kiselina

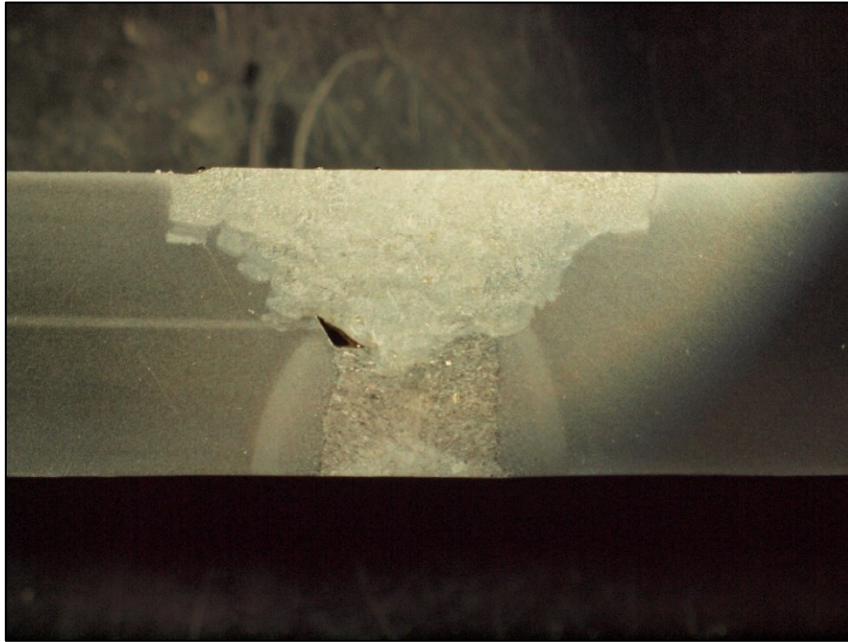
Slika 57. Etanol i dušična kiselina za nagrizanje



Izvor: Autor

To je proces ubrzanog kontroliranog korodiranja materijala i svaki materijal za potrebe nagrizanja ima svoju pripadajuću adekvatnu otopinu. Nagrizanje materijala S355 izvelo se u trajanju od 10 sekundi nakon kojeg su već mogle raspoznati različite zone u zavaru prikazane na slici 58 pod uvećanjem od 6 puta i slici 59 pod uvećanjem od 12,5 puta.

Slika 58. Makro testiranje - uvećanje 6X (nakon nagrizanja)



Izvor: Autor

Slika 59. Makro testiranje - uvećanje 12,5X (nakon nagrizanja)



Izvor: Autor

Također, radi dobivanja boljih makro i mikro testiranja prije samog nagrizanja ispitni uzorak bilo je potrebno ispolirati. Poliranje se izvodilo na uređaju „STRUERS LaboPol-5“ prikazanom na slici 60.

Slika 60. Uređaj za poliranje "STRUERS LaboPol-5"



Izvor: Autor

Papiri za brušenje i poliranje prikazani su u tablici, važno je napomenuti da se broj okretaja smanjuje s korištenjem što finijeg papira. Manja granulacija služi za brže uklanjanje materijala, dok veća granulacija označava finu obradu ili poliranje.

Tablica 9. Tablica korištenih granulacija za brušenje i poliranje

| Granulacija (brušenje) | Granulacija(poliranje) |
|------------------------|--------------------------|
| 120 | 4000 |
| 320 | 9 μ m (suspenzija) |
| 600 | 3 μ m(suspenzija) |
| 1000 | 0,03 μ m(suspenzija) |
| 2400 | |

Izvor: Autor

Slike testnog uzorka nakon brušenja s granulacijom 1000 i 4000 prikazane su u nastavku i jasno se može vidjeti pojava zona zavora.

Slika 61. Brušenje (nakon granulacije 1000)



Izvor: Autor

Slika 62. Brušenje (nakon granulacije 4000)



Izvor: Autor

5. RASPRAVA I REZULTATI

5.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

U nastavku na slici 63. prikazani su rezultati vlačnog statičkog ispitivanja koje je provedeno na 5 epruveta napravljenih od konstrukcijskog čelika S355.

Slika 63. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

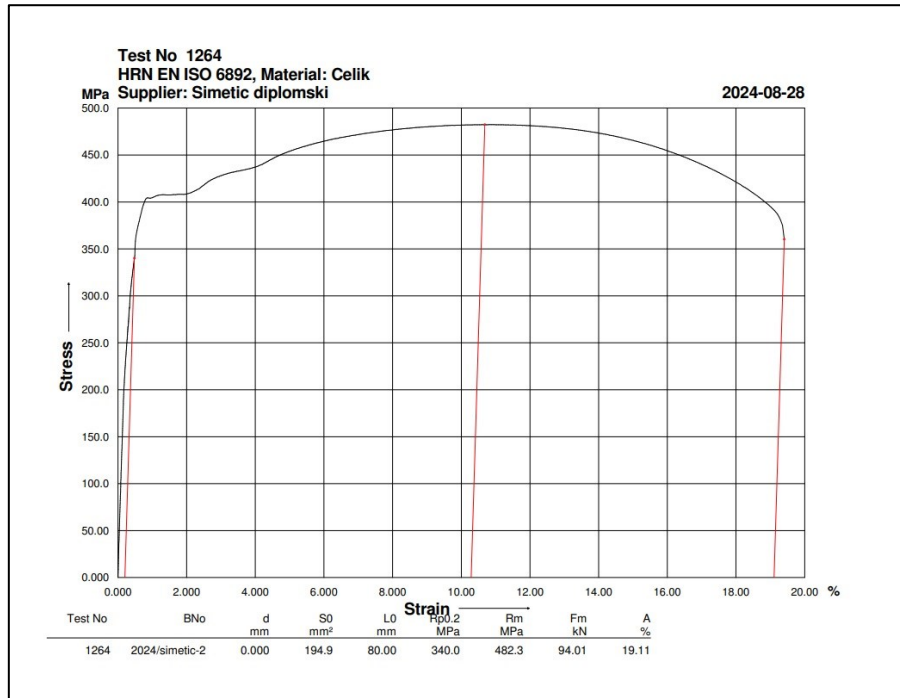
| MET.R.IS. | | Page 1 | | | | | | |
|-------------------------|------------------------|---------|-----------------------|----------|----------------|----------------------|----------|--------|
| Test Certificate | | | | | | | | |
| Metals Tensile Test | | | | | | | | |
| Test standard..... | HRN EN ISO 6892 | | | | Supplier..... | Simetic diplomski | | |
| Tester..... | Ener Spada | | | | Tested on..... | 2024-08-28 | | |
| Material..... | Čelik | | | | Rn. LAB..... | 2024/Simetic | | |
| Testing machine..... | Beta250 | | | | | | | |
| Axial extensometer..... | ME53 | | | | | | | |
| Pretension..... | 5 MPa | | | | | | | |
| Gripped length..... | 175 mm | | | | | | | |
| Test speed 1..... | 0 % -> 7.755 mm/min | | | | | | | |
| Test speed 2..... | Rp0.2 -> 33.840 mm/min | | | | | | | |
| Artikel / Projekt..... | čelik | | | | | | | |
| Parameter set..... | HRN EN ISO 6892 | | | | | | | |
| Legend | | | | | | | | |
| BNo..... | Batch number | | | | Rp0.2..... | Proof stress at 0.2% | | |
| d..... | Diameter | | | | Rm..... | Tensile strength | | |
| S0..... | Cross-sectional area | | | | Fm..... | Maximum load | | |
| L0..... | Gauge length | | | | A..... | Breaking elongation | | |
| Test No | BNo | d mm | S0 mm ² | L0 mm | Rp0.2 MPa | Rm MPa | Fm kN | A % |
| 1264 | 2024/simetic-2 | 0.000 | 194.9 | 80.00 | 340.0 | 482.3 | 94.01 | 19.11 |
| 1265 | 2024/simetic3 | 0.000 | 193.8 | 80.00 | 372.6 | 487.6 | 94.52 | 18.73 |
| 1266 | 2024/simetic4 | 0.000 | 194.1 | 80.00 | 340.2 | 480.4 | 93.26 | 19.30 |
| 1267 | 2024/simetic5 | 0.000 | 192.9 | 80.00 | 359.2 | 485.7 | 93.71 | 18.78 |
| 1268 | 2024/simetic6 | 0.000 | 191.8 | 80.00 | 375.4 | 495.2 | 95.00 | 20.47 |

Izvor: Autor

Nakon ručnog izračuna utvrđeno je da srednja vrijednost rezultata vlačne čvrstoće zavarenog spoja materijala S355 za silu iznosi $F_m = 94,1kN$ i $R_m = 486,24MPa$, dok srednja vrijednost produljenja epruveta iznosi $A = 19,28$ [%].

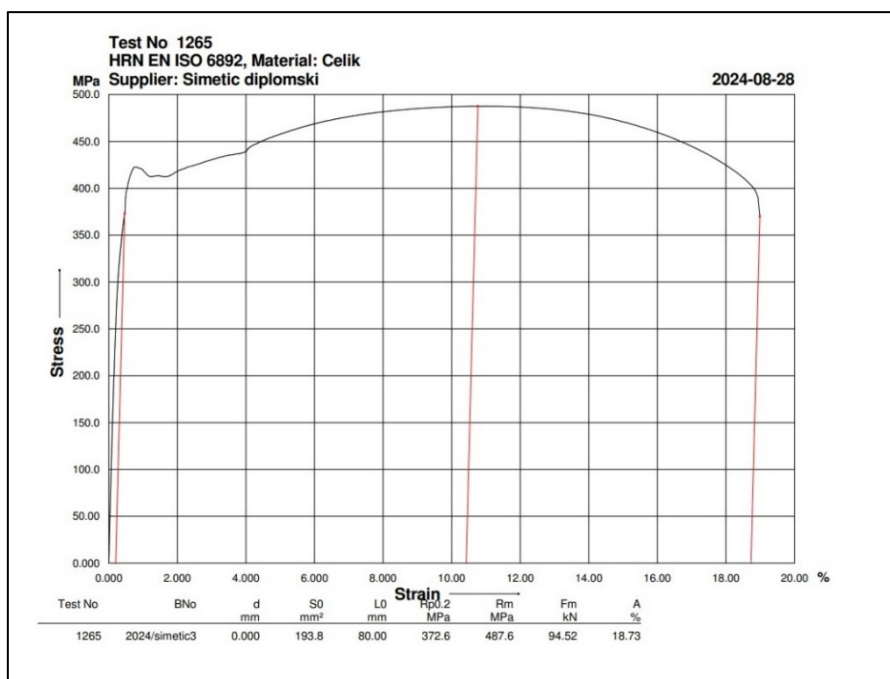
Na slikama 64, 65 i 66 prikazani su dijagrami sila-produljenja za epruvete 2, 3, 4 kao primjer izgleda dijagrama.

Slika 64. Dijagram sila - produljenje - Epruveta 2- S355



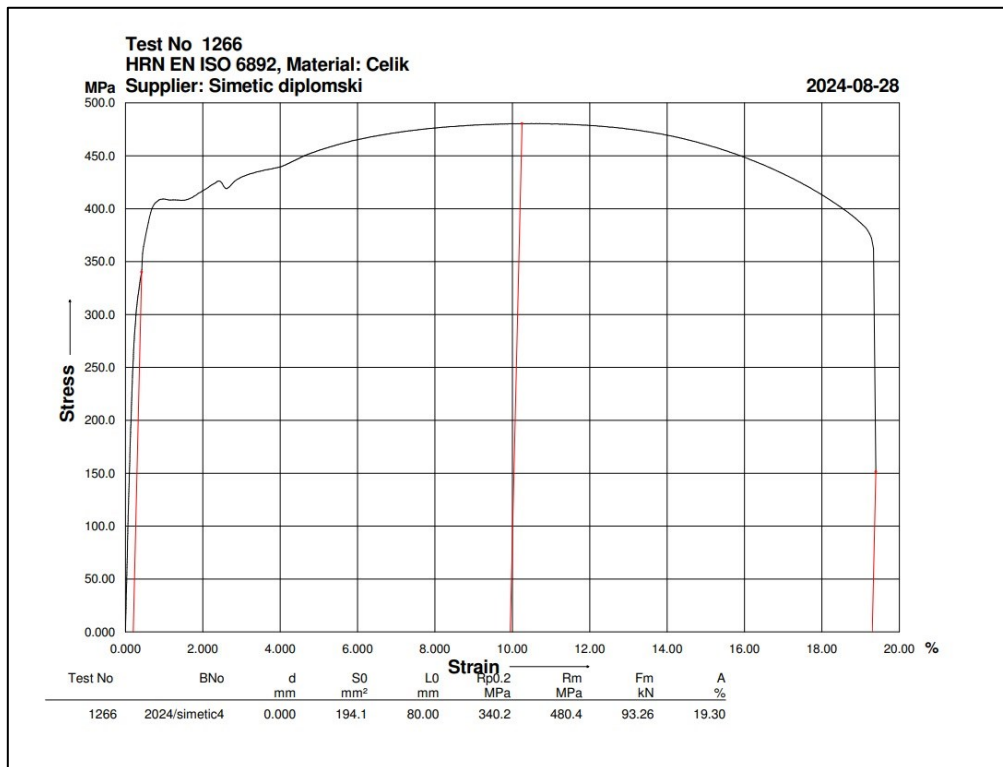
Izvor: Autor

Slika 65. Dijagram sila - produljenje - Epruveta 3 - S355



Izvor: Autor

Slika 66. Dijagram sila - produljenje - Epruveta 4 - S355



Izvor: Autor

Na sljedećoj slici mogu se vidjeti epruvete nakon vlačnog statičkog ispitivanja koje su evidentno dulje od svoje originalne verzije kao što je pokazano u rezultatima vlačnog ispitivanja. Zavareni spoj zadovoljio je na vlačnom statičkom ispitivanju, epruvete su pukle van zavarenog spoja.

Slika 67. Epruvete nakon vlačnog statičkog ispitivanja



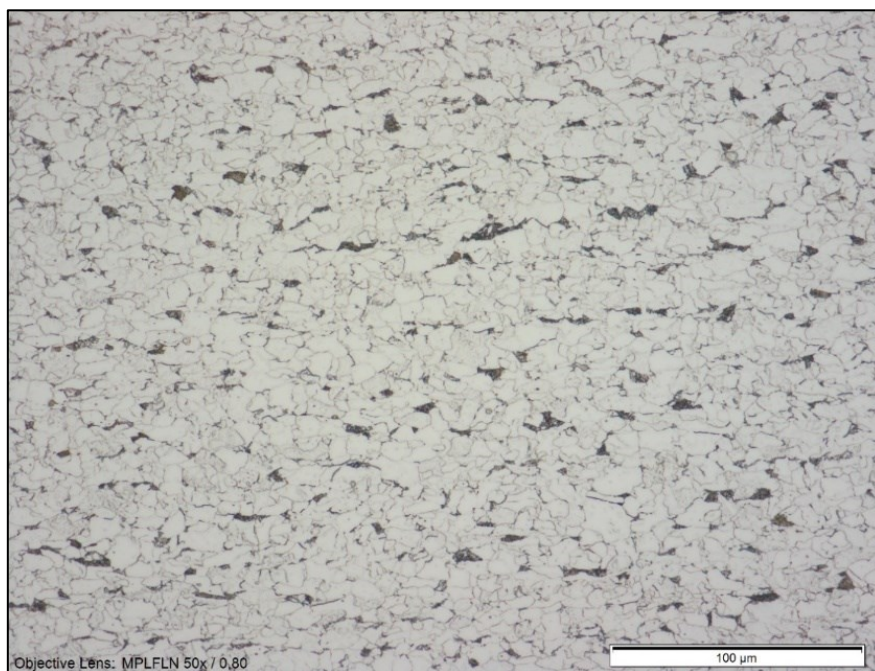
Izvor: Autor

5.2. Rezultati makro i mikro ispitivanja

Nakon obrade materijala S355 nagrivanjem, mogle su se dobiti slike mikro ispitivanja u kojemu se točno raspoznaju razne zone zvara i one su prikazane i pojašnjene sa slikama u nastavku.

Slika mikrostrukture osnovnog materijala prikazana je na slici 68 gdje je uvećanje 500 i na njoj se uočava tipična feritno perlitna mikrostruktura čelika S355.

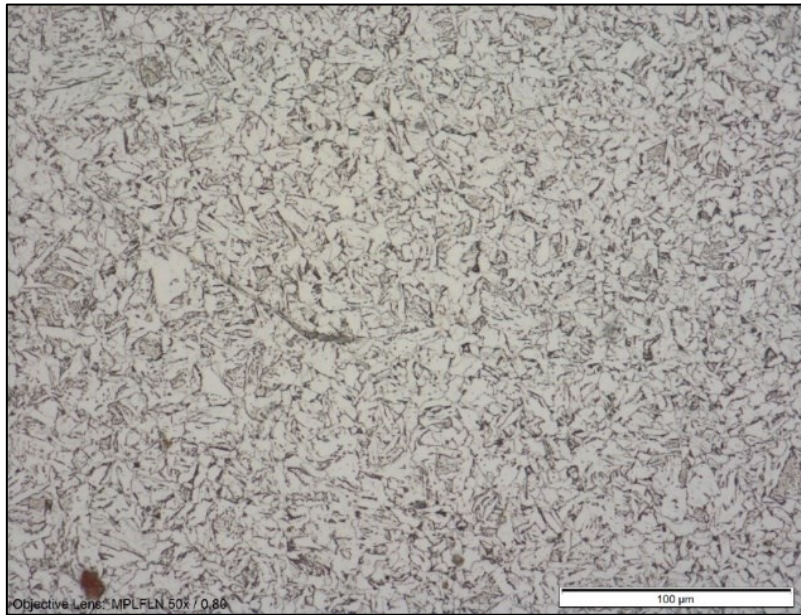
Slika 68. Mikro testiranje - uvećanje 500X (nakon nagrivanja) – Osnovni materijal



Izvor: Autor

Također, u nastavku na slici 69 prikazana je zona utjecaja topline na istom uvećanju od 500 puta.

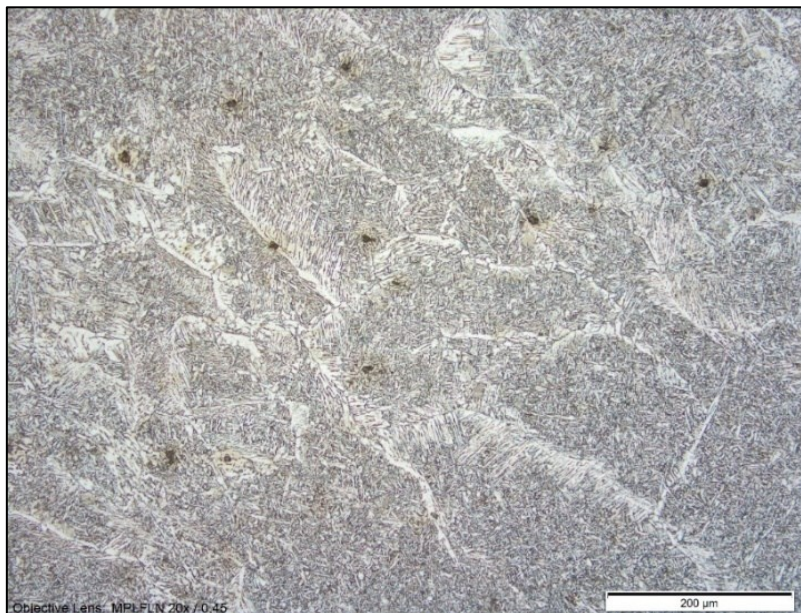
Slika 69. Mikro testiranje - uvećanje 500X (nakon nagrizanja) – ZUT



Izvor: Autor

Korijen zavara prikazan je na slici 70 na uvećanju od 200 puta.

Slika 70. Mikro testiranje - uvećanje 200X (nakon nagrizanja) – Korijen zavara

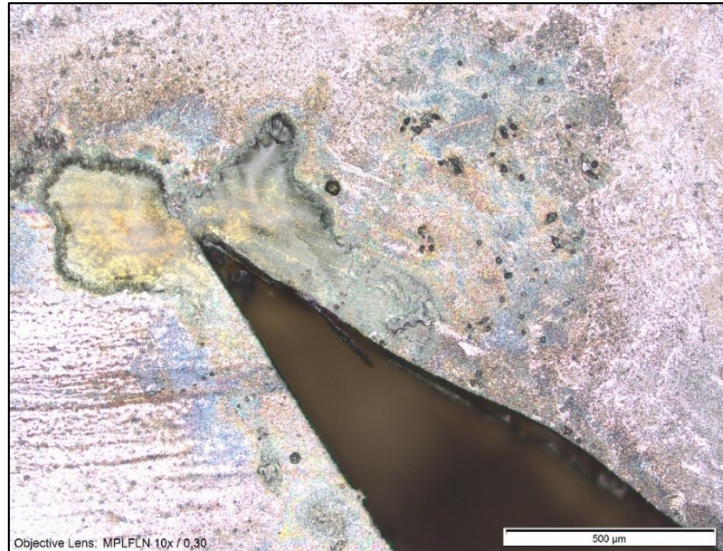


Izvor: Autor

Lice zavara s fokusom na greške nastale prilikom zavarivanja prikazano je na slikama 71 i 72. Na slici 71 vidi se greška koja zbog svojeg pravilnog oblika najvjerojatnije naslućuje na zonu koja nije dovoljno protaljena, te na slici 72 uočavaju se greške u

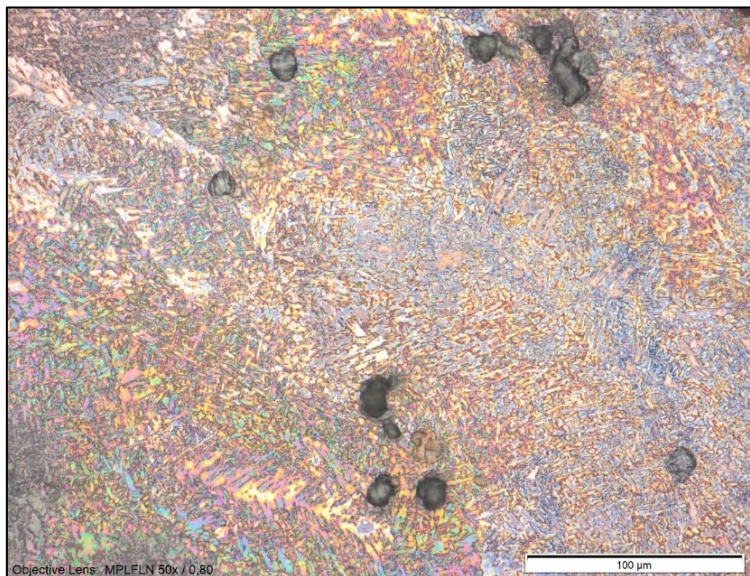
obliku mjehurića i drugih nepravilnih oblika nastali prilikom prskanja taline tijekom procesa zavarivanja.

Slika 71. Mikro testiranje - uvećanje 100X (nakon nagrizanja) – Lice zavara



Izvor: Autor

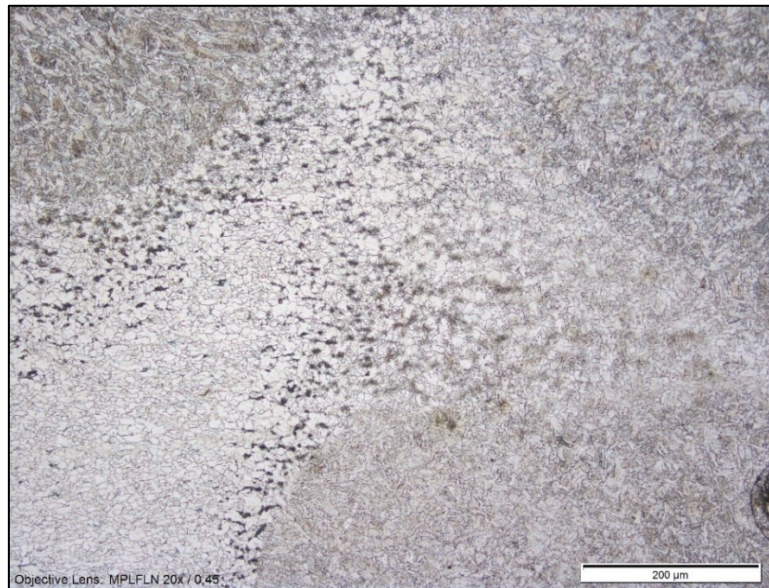
Slika 72. Mikro testiranje - uvećanje 500X (nakon nagrizanja) – Lice zavara



Izvor: Autor

U globalu može se reći da je promjena mikrostrukture zavarenog spoja ne loše kvalitete, izuzev pojave rupičastih grešaka nastalih uslijed prskanja taline, može se vidjeti na slici 73. promjena mikrostrukture tj. kako se perlit koncentrira i penetrira u osnovni materijal (zona ZUT-a). Dobiveni materijal je čvršći od osnovnog.

Slika 73. Mikro testiranje - uvećanje 200X (osnovni materijal; ZUT i lice zavara)



Izvor: Autor

4.3 Rezultati ispitivanje udarne radnje na lom

Rezultati Charpy-jeva ispitivanja žilavosti materijala S355 prikazani su u tablici 10. Važno je napomenuti kako su se rezultati dobiveni testiranjem morali preračunati zato što su se za ispitivanje za potrebe ovog diplomskog rada koristile reducirane epruvete širine 7,5 mm za razliku od standardnih epruveta širine 10 mm pa slijedi formula:

$$K(10) = K(7,5) \cdot \frac{10 \times 10}{10 \times 7,5}$$

$$K(10) = K(7,5) \cdot 1,333$$

Tablica 10. Rezultati Charpy-jeva ispitivanja

| Zona(epruvete) | KV [J] |
|--------------------------------|--------|
| Sredina zavara (1-1;1-2;1-3) | 89,05 |
| Zona staljivanja (2-1;2-2;2-3) | 99,88 |
| ZUT (3-1;3-2;3-3) | 106,68 |

Izvor: Autor

Rezultati Charpy-jeva ispitivanja u prosjeku su tri puta veći od onog koji se može pronaći u tablicama karakteristika materijala S355, no svakako u obzir treba uzeti lasersko rezanje prilikom izrade ispitnih uzoraka i utjecaj topline na same epruvete koji je promijenio njihovu mikrostrukturu. Slike Charpy-jevih epruveta nakon testiranja prikazane su u nastavku na slici 74.

Slika 74. Charpy-jeve epruvete nakon testiranja



Izvor: Autor

6. ZAKLJUČAK

U ovome diplomskom radu pokazala se tehnologija laserskog zavarivanja i laboratorijska ispitivanja materijala koja uključuju ispitivanje čvrstoće materijala, ispitivanje na udarnu radnju loma i mikro i makro ispitivanja. Dobiveni rezultati pokazuju kako je lasersko zavarivanje pogodna tehnika za spajanje konstrukcijskog čelika S355, no potrebno je uzeti u obzir i mikro i makro ispitivanja koja su ukazala na neke greške u zavaru koje su nastale kao posljedica prskanja taline tokom procesa zavarivanja i nedovoljnog protaljivanja spoja.

Sve zavarene spojeve potrebno je i važno testirati i ispitati jer većinu grešaka jednostavno nije lako uočiti golim okom i ne smije se nikad osloniti na iskustvo. Kod ispitivanja gotovih proizvoda češće se koriste ne razorne metode ispitivanja kojima se na jednostavan i lagan način može uočiti pogreška koja se nalazi i dublje od površine materijala bez uništavanja samog materijala. U slučaju mogućnosti dobivanja ispitnih epruveta razorne metode ispitivanja odličan su način za provjeru mehaničkih svojstava materijala poput čvrstoće i žilavosti.

Za postizanje bolje kvalitete zavarenog spoja kako bi se nastale greške uklonile predlaže se prilagodba parametara zavarivanja, osiguranje i dodatna kontrola čistoće zavarenog spoja prije zavarivanja, eventualno smanjenje brzine zavarivanja i sveukupne dodatne pripreme prije početka zavarivanja.

Lasersko zavarivanje relativno je nova tehnologija u području zavarivanja i veoma je svestrana. Koristi se u raznim industrijama i sami aparati poput onog prikazanog u ovome radu imaju dodatne funkcije čišćenja i rezanja što ih čini poželjnijim. Tehnologija laserskog zavarivanja pogodna je za automatizaciju procesa pomoću robotskih ruku i jedina stvarna mana ove tehnologije je cijena samih uređaja. Uz napredak tehnologije, moguće je očekivati u bližoj budućnosti još isplativije i naprednije uređaje za lasersko zavarivanje koji će s lakoćom spajati razne materijale prema potrebi.

LITERATURA

Literatura iz knjiga

[1] Katayama S.: „Handbook of Laser Welding Technologies“, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2013.

[2] Messler, R.W., "Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy", John Wiley & Sons, 2004.

[7] Herbert, C., "Laser Welding: A Practical Guide", Woodhead Publishing, 2001.

[8] Davies, A.C., "The Science and Practice of Welding: Volume 1 and Volume 2", Cambridge University Press, 1993.

Literatura s interneta

[3] <https://www.pit.ba/elektrolucno-zavarivanje-osnove-procesi-zavarivanja-i-trendovi/>, pristupljeno: 06.08.2024

[4] <https://www.hzn.hr/hr/katalog-hrvatskih-norma-165/165>, pristupljeno: 29.08.2024

[5] <http://www.hugongcutting.com/>, pristupljeno 15.08.2024

Članci

[6] Sokolov M., Kuznetsov M., Salminen A., Laser welding and weld hardness analysis of thick section S355 structural steel, Materials & Design, 2011.

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Vijak din 933 M12X40 | 5 |
| Slika 2. Lemilica za bakrene cijevi " REMS" | 6 |
| Slika 3. Područja zavarenog spoja | 8 |
| Slika 4. Sučeljeni zavar | 9 |
| Slika 5. Kutni zavar (primjer)..... | 9 |
| Slika 6. Elektrolučno zavarivanje | 10 |
| Slika 7. " CO ₂ " Zavarivanje | 11 |
| Slika 8. MIG Zavarivanje | 14 |
| Slika 9. Volframova elektroda | 14 |
| Slika 10. Aparat za zavarivanje "HGLW 3000EW LASER WELDING" | 17 |
| Slika 11. Upravljačka ploča laserskog zavarivača | 18 |
| Slika 12. Upravljačka ploča - sučelje "Technology" | 18 |
| Slika 13. Glava za zavarivanje..... | 19 |
| Slika 14. Glava za zavarivanje (dijelovi) | 19 |
| Slika 15. Dodavač..... | 21 |
| Slika 16. Laserski izvor i vodeno hlađenje..... | 21 |
| Slika 17. Čišćenje materijala..... | 22 |
| Slika 18. Montiranje pomoćnih ploča | 23 |
| Slika 19. Zavarivanje pomoćnih ploča | 23 |
| Slika 20. Parametri prvog prolaza na upravljačkoj ploči | 24 |
| Slika 21. Korijen zavara (gornja strana)..... | 25 |
| Slika 22. Korijen zavara(donja strana)..... | 25 |
| Slika 23. Postupak varenja(2. i 3. prolaz) | 26 |
| Slika 24. Skica zavarenog spoja - 2. i 3. prolaz | 26 |
| Slika 25. Upravljačka ploča (4. i 5. prolaz)..... | 27 |
| Slika 26. Temperatura nakon 4. i 5. prolaza | 27 |
| Slika 27. Temperatura nakon 6., 7. i 8. prolaza | 28 |
| Slika 28. Skica zavarenog spoja - 6, 7. i 8. prolaz | 28 |
| Slika 29. Upravljačka ploča (12. prolaz) | 29 |
| Slika 30. Zavareni spoj (sučeljeno)..... | 29 |
| Slika 31. Skica zavarenog spoja - Svi prolazi | 30 |
| Slika 32. Donja ploča (kutni zavar) | 30 |

| | |
|--|----|
| Slika 33. Gornja ploča (kutni zavar)..... | 31 |
| Slika 34. Upravljačka ploča (kutni zavar, 1 prolaz) | 31 |
| Slika 35. Skica zavarenog spoja - 1 prolaz..... | 32 |
| Slika 36. Kutni zavar (1 prolaz)..... | 32 |
| Slika 37. Kutni zavar (3 prolaza)..... | 33 |
| Slika 38. Skica uzorka - vlačni test | 38 |
| Slika 39. Skica uzorka - udarna žilavost | 39 |
| Slika 40. MESSPHYSIK BETA 250 univerzalna statička kidalica | 40 |
| Slika 41. Epruvete za statički vlačni test..... | 42 |
| Slika 42. ZWICK ROELL RKP450 Charpy-jevo klatno | 43 |
| Slika 43. Zamjena držača epruveta (Charpy) | 45 |
| Slika 44. Alat za provjeru V zarez ispitnih uzoraka | 46 |
| Slika 45. Makro kontrola V zarez (epruveta: 2-1)..... | 47 |
| Slika 46. Charpy-jeva epruveta (V zarez - sredina zavara)..... | 48 |
| Slika 47. Charpy-jeva epruveta (V zarez - zona staljivanja)..... | 48 |
| Slika 48. Charpy-jeva epruveta (V zarez - zona utjecaja topline) | 48 |
| Slika 49. Charpy-jeve epruvete sa V zarezom..... | 49 |
| Slika 50. Charpy-jeva epruveta u horizontalnim držačima | 49 |
| Slika 51. „SZX10 OLYMPUS“ Stereo Mikroskop | 50 |
| Slika 52. – „OLYMPUS BX51“ metalografski svjetlosni mikroskop..... | 51 |
| Slika 53. Dijamanta pila | 52 |
| Slika 54. Uzorak nakon rezanja iz epruvete(*i nakon poliranja)..... | 52 |
| Slika 55. Makro testiranje -uvećanje 8X | 53 |
| Slika 56. Makro testiranje - uvećanje 32X..... | 53 |
| Slika 57. Etanol i dušična kiselina za nagrizanje | 54 |
| Slika 58. Makro testiranje - uvećanje 6X (nakon nagrizanja)..... | 55 |
| Slika 59. Makro testiranje - uvećanje 12,5X (nakon nagrizanja)..... | 55 |
| Slika 60. Uređaj za poliranje "STRUES LaboPol-5" | 56 |
| Slika 61. Brušenje (nakon granulacije 1000) | 57 |
| Slika 62. Brušenje (nakon granulacije 4000) | 57 |
| Slika 63. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja..... | 58 |
| Slika 64. Dijagram sila - produljenje - Epruveta 2- S355 | 59 |
| Slika 65. Dijagram sila - produljenje - Epruveta 3 - S355 | 59 |
| Slika 66. Dijagram sila - produljenje - Epruveta 4 - S355 | 60 |

| | |
|--|----|
| Slika 67. Epruvete nakon vlačnog statičkog ispitivanja..... | 60 |
| Slika 68. Mikro testiranje - uvećanje 500X (nakon nagrivanja) – Osnovni materijal.. | 61 |
| Slika 69. Mikro testiranje - uvećanje 500X (nakon nagrivanja) – ZUT | 62 |
| Slika 70. Mikro testiranje - uvećanje 200X (nakon nagrivanja) – Korijen zavora | 62 |
| Slika 71. Mikro testiranje - uvećanje 100X (nakon nagrivanja) – Lice zavora..... | 63 |
| Slika 72. Mikro testiranje - uvećanje 500X (nakon nagrivanja) – Lice zavora..... | 63 |
| Slika 73. Mikro testiranje - uvećanje 200X (osnovni materijal; ZUT i lice zavora)..... | 64 |
| Slika 74. Charpy-jeve epruvete nakon testiranja | 65 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Postupci zavarivanja pritiskom i zavarivanja taljenjem..... | 7 |
| Tablica 2. Plin - čelik..... | 12 |
| Tablica 3. Tehničke specifikacije aparata "HGLW/HGLC - 3000E" | 17 |
| Tablica 4. Oznake materijala S355..... | 35 |
| Tablica 5. Kemijski sastav materijala S355..... | 36 |
| Tablica 6. Kemijski sastav korištene elektrode "VAC 60" | 36 |
| Tablica 7. Dimenzije epruveta sa parametrima vlačnog testa..... | 41 |
| Tablica 8: Dimenzije epruveta za ispitivanje udarne radnje loma | 45 |
| Tablica 9. Tablica korištenih granulacija za brušenje i poliranje | 56 |
| Tablica 10. Rezultati Charpy-jeva ispitivanja | 64 |

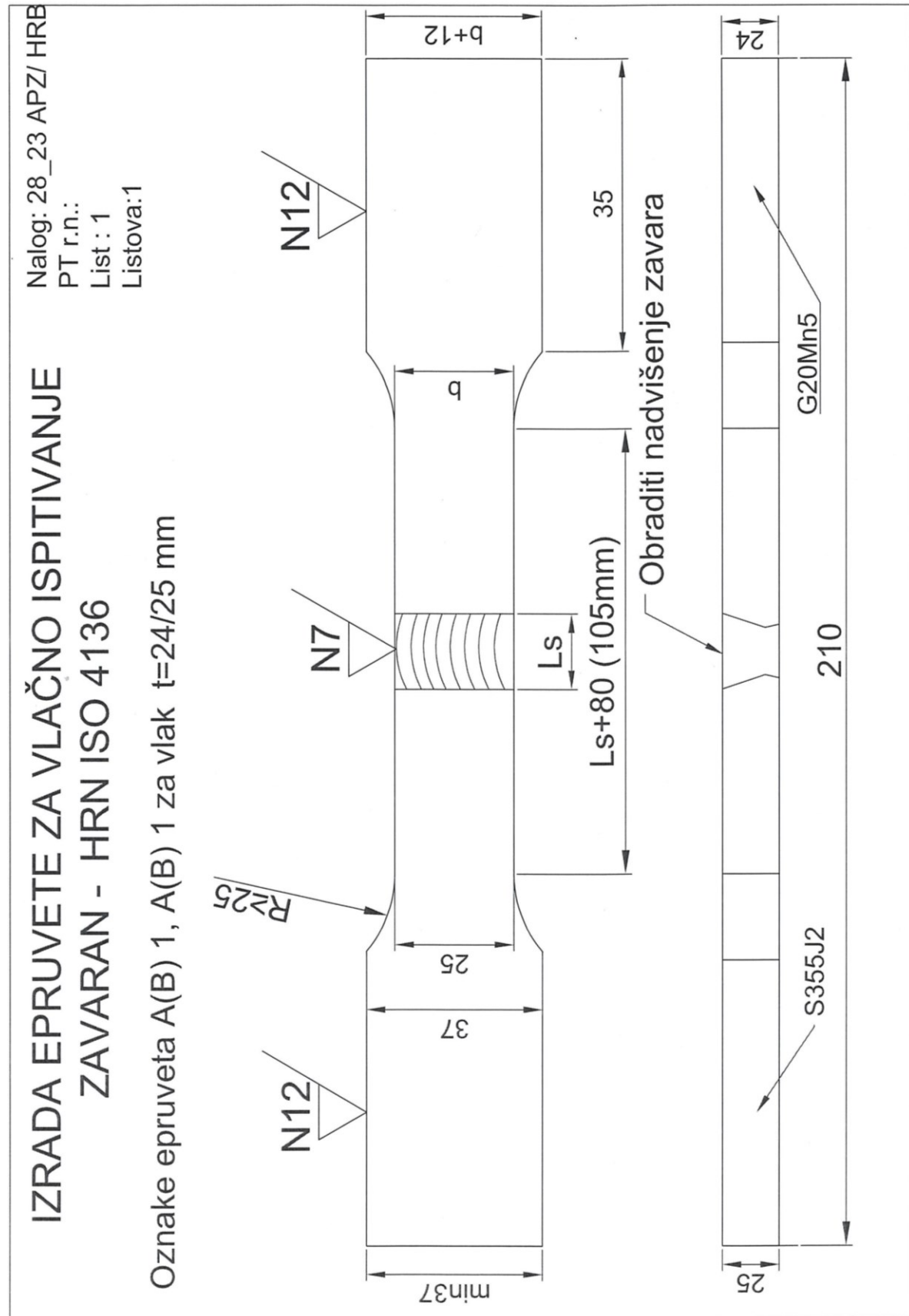
POPIS OZNAKA, KRATICA I MJERNIH JEDINICA

| Kratika, oznaka | Mjerna jedinica/izvorni naziv | Opis |
|-----------------|----------------------------------|---|
| DT | <i>Destructive testing</i> | Razorne metode ispitivanja |
| NDT | <i>Non – destructive testing</i> | Ne Razorne metode ispitivanja |
| TIG | <i>Tungsten Inert Gas</i> | - |
| MIG | <i>Metal Inert Gas</i> | - |
| MAG | <i>Metal Active Gas</i> | - |
| QBH | <i>Quick Beam Handling</i> | - |
| S_0 | mm^2 | Izvorna površina poprečnog presjeka paralelne duljine |
| a_0 | mm | Izvorna prosječna duljina epruvete |
| L_0 | mm | Glavna mjerna duljina deformacije |
| L_C | mm | Proširena mjerna duljina deformacije |
| L_t | mm | Duljina epruvete(testnog uzorka) |
| b_0 | mm | Izvorna prosječna širina epruvete |
| v_1 | m/s | Brzina deformacije prije $R_{p_{0,2}}$ |
| v_2 | m/s | Brzina deformacije nakon $R_{p_{0,2}}$ |
| F_m | kN | Najveća vlačna sila |
| R_m | MPa | Vlačna čvrstoća |
| A | % | Produljenje |
| p | - | Gubitak zbog trenja pokazivača |
| p' | - | Gubitak zbog trenja ležajeva i otpora zraka za jedno polunjihanje |
| l | mm | Duljina Charpy uzorka |
| a | mm | Širina/visina Charpy uzorka |
| r | mm | Polumjer V zarez kod Charpy uzorka |
| KV | J | Žilavost |

POPIS PRILOGA

Prilog 1. Nacrt epruvete za vlačno ispitivanje

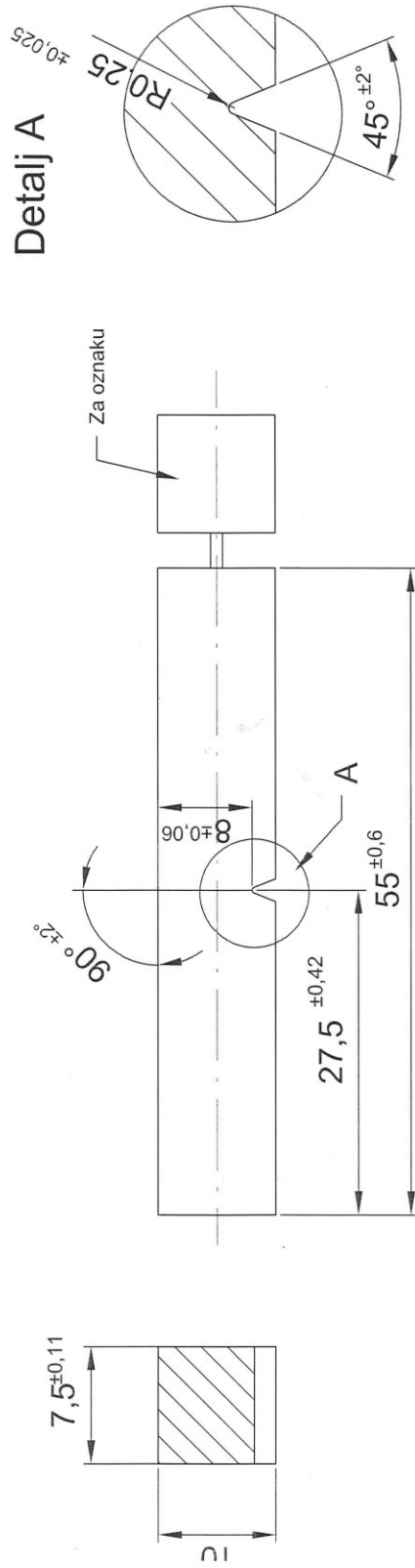
Prilog 2. Nacrt epruvete za ispitivanje udarne žilavosti



IZRADA REDUCIRANE EPRUV. ZA ISPITIVANJE UDARNE
 ŽILAVOSTI (7,5x10x55) materijal S 355J2

Nalog: 28_23 APZ/HR
 PT r.n.:
 List : 1
 Listova:1

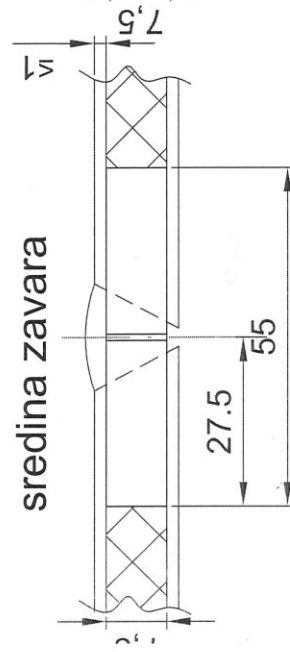
Oznaka epruveta s ploče D za t= 10 mm: D-4-A-1 do D-4-B-3



Detalj A

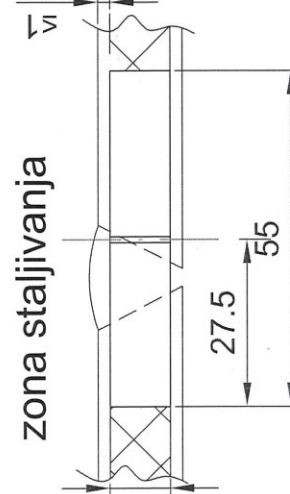
A(B)- 4A-1,4A-2 i 4A-3

sredina zavara



A(B)- 4B-1,4B-2 i 4B-3

zona stajivanja



A(B)- 4C-1,4C-2 i 4C-3

zona utjecajtopline HAZ

