

Analiza utjecaja različitih vrsta zavara nehrđajućeg čelika na vlačno opterećenje i agresivnu atmosferu kiselina

Mandić, Leopold

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:542501>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-22**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



uniri DIGITALNA
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

Leopold Mandić

**ANALIZA UTJECAJA RAZLIČITIH VRSTA ZAVARA NEHRĐAJUĆEG
ČELIKA NA VLAČNO OPTEREĆENJE I AGRESIVNU ATMOSFERU
KISELINA**

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2022 godina.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET**

**ANALIZA UTJECAJA RAZLIČITIH VRSTA ZAVARA NEHRĐAJUĆEG
ČELIKA NA VLAČNO OPTEREĆENJE I AGRESIVNU ATMOSFERU
KISELINA**

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT TYPES OF
STAINLESS STEEL WELDS ON TENSILE STRESS AND AGGRESSIVE
ACID ATMOSPHERE**

DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Zavarivanje i ispitivanje materijala

Mentor: izv.prof.dr.sc Dean Bernečić

Komentor: dr.sc Goran Vizentin

Student: Leopold Mandić

Studijski smjer: Brodostrojarstvo i tehnologija prometa

JMBAG: 0112064958

Rijeka, rujan 2022.

Student: Leopold Mandić

Studijski program: Brodostrojarstvo i tehnologija prometa

JMBAG:0112064958

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom

„Analiza utjecaja različitih vrsta zavara nehrđajućeg čelika na vlačno opterećenje i agresivnu atmosferu kiselina“

izradio samostalno pod mentorstvom izv.prof.dr.sc Deana Bernečića

te komentorstvom dr.sc Gorana Vizentina.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student:

Leopold Mandić



Student: Leopold Mandić

Studijski program: Brodostrojarstvo i tehnologija prometa

JMBAG: 0112064958

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Leopold Mandić - autor



Sažetak

Ovaj rad daje pregled odabira tehnika zavarivanja ovisno o potrebama elemenata koji se zavaruju. Navesti će se važnost odabira odgovarajućih dodatnih materijala prilikom zavara te korištenje ispravne zaštitne atmosfere prilikom izrade zavara. Ukratko će se opisati pojedine tehnike i svojstva nehrđajućih čelika. U praktičnom dijelu izraditi će se 7 epruveta koje će se podvrgnuti vlačnom testu te izlagati utjecaju kiselina. Jedna epruveta će biti izrađena iz komada dok su ostale polovice epruveta zavarivane elektrolučnim tehnikama. Praktični dio rada bazirati će se na prikazivanju razlika između tehnika u strukturi zavara te čvrstoći zavara.

Ključne riječi: TIG, Ručno elektrolučno zavarivanje, MAG, Nehrđajući čelik, elektrolučno zavarivanje, vlačno testiranje, agresivna atmosfera

SUMMARY

This thesis will provide an overview of the selection of welding techniques depending on the needs of the elements to be welded. The importance of selecting appropriate additional materials during welding and the use of the correct protective atmosphere during welding will be stated. Techniques and properties of stainless steels will be briefly described. In the practical part, 7 test samples will be made, which will be subjected to a tensile test and exposed to the influence of acids. One test sample will be made from one piece, while the other halves of the test samples are welded using electric arc techniques. The practical part of the work will be based on showing the differences between the welding techniques in the structure of the weld and the strength of the weld.

Key words: TIG welding technique, Manual metal arc welding, MAG welding technique, Stainless steel, electric arc welding, tensile test, aggressive atmosphere

Sadržaj

1. UVOD	1
2. SVOJSTVA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	3
2.1. Feritni čelici.....	3
2.2. Austenitni čelici	4
2.3. Austenitno-feritni (dupleks) čelici	6
2.4. Martenzitni čelici.....	7
2.5. Nehrđajući čelici AISI 316 i AISI 304.....	8
3. TEHNIKE ZAVARIVANJA TALJENJEM	10
3.1. REL tehnika zavarivanja.....	10
3.2. TIG zavarivanje	12
3.3. MAG/MIG tehnika zavarivanja	14
4. IZRADA EPRUVETE I ZAVARIVANJE UZORAKA	16
4.1. Dimenzioniranje epruvete	16
4.2. Zavarivanje epruvete	17
4.2.1. Pasiviziranje.....	19
5. VLAČNO ISPITIVANJE	20
5.1. Računalna simulacija vlačnog testa uzorka	21
5.2. Vlačno ispitivanje referentne epruvete.....	23
5.3. Vlačno ispitivanje MIG zavarene epruvete s 316 žicom.....	24
5.4. Vlačno ispitivanje uzorka zavarenog REL tehnikom.....	26
5.5. Vlačno ispitivanje epruvete zavarene TIG tehnikom i AISI 304 žicom.....	28
5.6. Vlačno ispitivanje epruvete zavarene TIG tehnikom s AISI 316 L žicom	29
6. IZLAGANJE UZORAKA AGRESIVNOJ ATMOSFERI KISELINA	33
7. ZAKLJUČAK	38
Literatura:.....	41
Popis slika	42
Popis tablica.....	44
Popis kratica	45

1. UVOD

Cilj ovog rada pokazati je razlike u čvrstoći te korozivnoj postojanosti određenih vrsta elektrolučnih zavara. Kao materijal za zavarivanje odabran je nehrđajući čelik AISI 316 L, iz razloga jer je njegova primjena u pomorskoj industriji velika zbog korozivne postojanosti prema morskoj vodi.

U radu će se prikazati postupak odabira metode zavara u odnosu na potrebe konstrukcije koja se zavaruje te razlike između pojedinih tehnika zavarivanja. Fokus će se staviti na načine zaštite zavara, odnosno metalne kupke koja nastaje prilikom zavarivanja od prodiranja vanjskih utjecaja, atmosferilija i stvaranja poroznosti u zavaru. Osim izlaganja karakteristika zavara, u praktičnom dijelu rada izraditi će se i ispitne epruvete koje će biti zavarivane različitim tehnikama te ispitane na vlačnom testu. Cilj vlačnog testa je pokazati razlike u čvrstoći pojedinih tehnika zavarivanja ukoliko budu postojale. Nakon vlačnog ispitivanja uzorci će biti izloženi djelovanju kiselina kako bi se provjerila kvaliteta zaštite zavara kod različitih tehnika, npr. zaštita plinskom atmosferom kod TIG postupka. Po završetku izlaganja uzoraka kiselinama uzorci će se podvrgnuti mikroskopskom snimanju pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) zona od interesa. Na mikroskopskim snimkama će se nastojati pronaći oštećenja nastala djelovanjem kiseline ili vlačnog testa te prikazati površinska struktura materijala.

Rad je koncipiran u 7 cjelina od čega se u uvodu nastoji dati kratki prikaz rada, te postavlja hipoteza koju će rad dokazati ili opovrgnuti. Osim hipoteze u uvodu je opisan i postupak ispitivanja materijala u praktičnom dijelu rada. Druga cjelina rada obrađuje temu materijala. Ukratko su opisani nehrđajući čelici, njihova fizikalna i kemijska svojstva te mogućnost primjene u industriji i svakodnevnom životu. Navodi se osnovna podjela nehrđajućih čelika prema mikrostrukтури te prikazuje navedene mikrostrukture i njihove odrednice. Treća cjelina govori o elektrolučnim zavarima. Opisuje se oprema, navode načine zavarivanja, opisati sama tehnika zavarivanja, odnosno postupak taljenja materijala te zaštite istog od poroznosti i vanjskih utjecaja. Navedena je prikladnost korištenja određenih vrsta zavara za pojedine materijale, te debljina materijala koje mogu biti zavarivane pojedinih tehnikama što je pri izradi određenih konstrukcijskih dijelova izrazito važno. Četvrta cjelina prati dimenzioniranje i izradu epruvete za

praktični dio rada, te zavarivanje epruveti različitim tehnikama. Zavarivanje epruveti povjereno je stručnjacima iz tog područja kako bi se minimizirala odstupanja zbog pogreški u postupku zavarivanja. Peto poglavlje bavi se vlačnim ispitivanjima samih uzoraka. Uzorci će biti ispitivani na kidalici u edukativnoj radionici Pomorskog fakulteta u Rijeci.

Osim samog ispitivanja opisani su i rezultati vlačnih testova te objašnjene razlike između rezultata ispitivanja pojedinih uzoraka. U šestom poglavlju ispitivan je utjecaj kiselina i općenito agresivne atmosfere na zavar, ali i područje oko zavara, odnosno zonu utjecaja topline. Ukazuje se koja je vrsta zavara prikladnija za izradu elemenata koji imaju doticaj s kiselinama te važnost pasivizacije zavara kako bi korozijska postojanost zavara bila što sličnija osnovnom materijalu. Iz mikroskopskih snimki nastoje se potkrijepiti tvrdnje vezane uz postojanost korozije na izloženim uzorcima. Zaključak sintetizira spoznaje iz cijelog rada te daje određeni pregled praktičnog pokusa, ukazuje na manjkavost određenih tehnika po pitanju zaštite zavara i primjene neodgovarajućih dodatnih materijala u zavaru.

2. SVOJSTVA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Korozijski postojani čelici, odnosno nehrđajući čelici dijele se prema mikrostrukturi na martenzitne, feritne, austenitne, austenitno-feritne (dupleks) i precipitacijski očvrsnute čelike visoke čvrstoće. Svaki čelik ukoliko želi biti korozijski postojan mora ispunjavati dva zahtjeva, a to su legiranje s minimalno 12%, ili više kroma te postojana monofazna mikrostruktura, kako bi se izbjegla mogućnost nastanka različitog elektropotencijala u odnosu na potencijal osnovne mase. Osim kromom, otpornost na koroziju dodatno se povećava legiranjem s nekim drugim metalima kao npr. niklom za povećanje otpornosti na kiseline, molibdenom koji povećava pasivizaciju na koroziju te sprječava jamičastu koroziju te karbidotvorcima poput titanija i niobija koji sprječavaju interkristalne korozije. Nehrđajući čelici nisu apsolutno otporni na oksidaciju već se na površini materijala spontano stvara pasivni oksidni film kroma koji čvrsto prijanja uz materijal i kemijski je stabilan. Prilikom obrade metala i uklanjanja oksidnog filma isti se ubrzo obnavlja prirodnim procesom koristeći dostupan kisik iz zraka [5]. Stvaranje oksidnog sloja nakon uklanjanja istog prikazano je na slici 1.

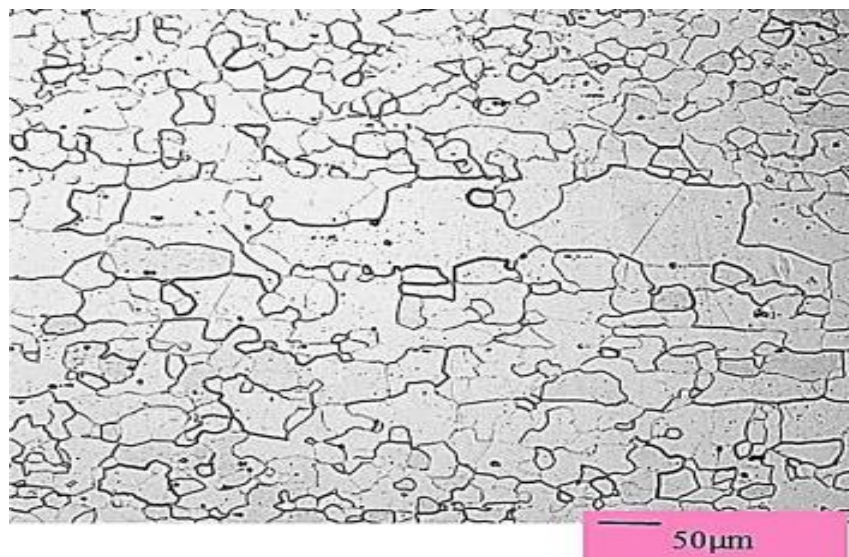


Slika 1. Prikaz spontanog stvaranja oksidnog filma na nehrđajućim čelicima [5]

2.1. Feritni čelici

Feritni čelici legirani su s 12-18% kroma te sadrže manje od 0,1% ugljika. Takvi čelici otporni su na djelovanje dušične kiseline, amonijeve salitre te mješavina dušične, fosforne te klorovodične kiseline. Nisku otpornost pokazuju na djelovanje rastaljenih metala poput aluminija i olova, nagrizajućih kemikalija poput amonijeva biflorida, barijevog klorida te broma i octene kiseline. Svojstva feritnih čelika postojanih na koroziju su sljedeća: relativno su mekani, magnetični su, relativno su slabo zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna u mikrostrukturi na temperaturama iznad 900°C, skloni

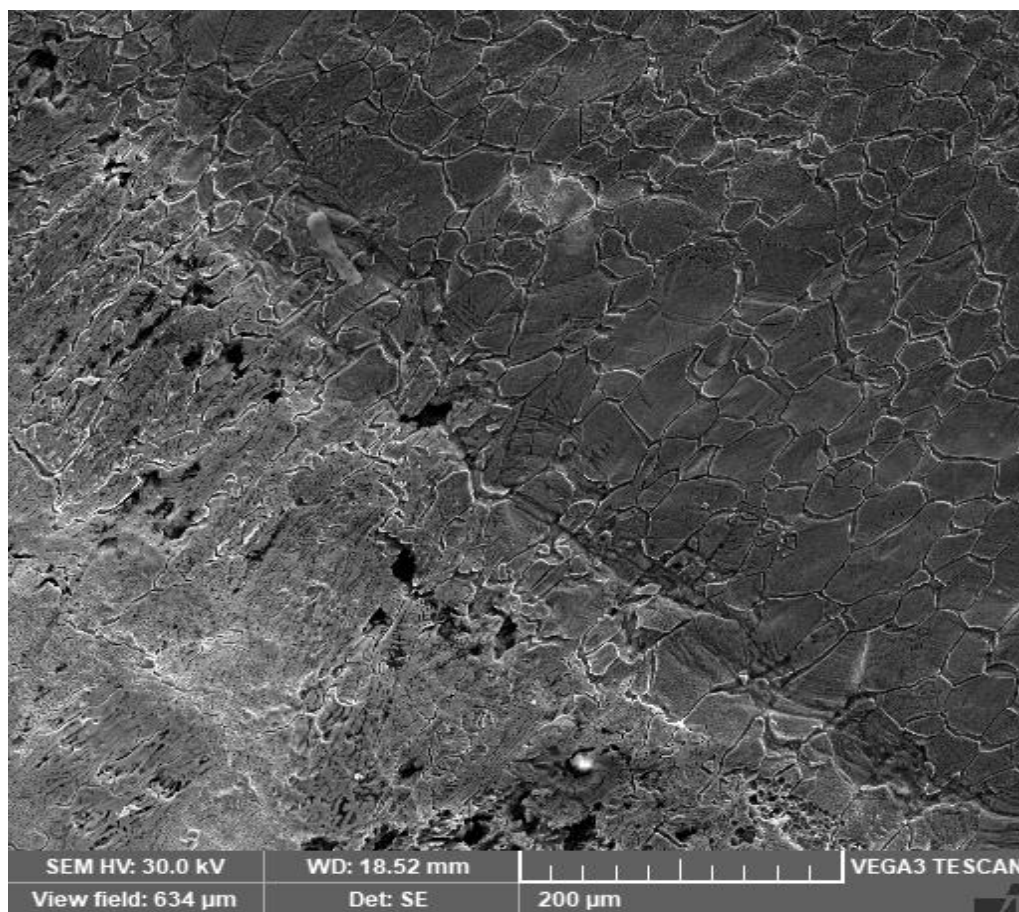
krhkosti pri određenim temperaturama, slabe su postojanosti na kloridne otopine kao što je npr. morska voda, skloni su lomu na niskim temperaturama, no dobre strane su im da se lako obrađuju, ekonomski su prihvatljivi i otporni na pojavu napetosne korozije. Poboljšanja su moguća povećavanjem udjela kroma ili legiranjem s molibdenom, niklom ili titanijem te porastom čistoće samih feritnih nehrđajućih čelika korištenjem modernih tehnologija obrade koji smanjuju udio nečistoća u materijalu poput indukcijsko vakuumske peći. Primjenjuju se u kozmetičkoj i petrokemijskoj industriji, u domaćinstvima kao dijelovi kućanskih uređaja i pribora za jelo te za auto dijelove [2].



Slika 2. Feritna mikrostruktura nehrđajućeg čelika [4]

2.2. Austenitni čelici

Austenitni nehrđajući čelici sadrže niski maseni udio ugljika, 0,2% do 0,5%, zbog manje pojave karbida Cr_{23}C_6 , uzročnika interkristalne korozije, udio kroma u postotku 15-20% te 7-20% nikla. Postoji mogućnost dodavanja molibdena, titana, niobija, tantala i dušika, i dok svi ovi metali doprinose stvaranju ferita, dušik služi povećanju čvrstoće materijala i sprječavanju jamičaste korozije. Prijelaz iz austenitnog u martenzitno stanje vrši se dubokim hlađenjem ili hladnom deformacijom. Mikrostruktura austenitnih čelika može biti austenitna ili austenitno feritna s 5-10% delta ferita u strukturi. Delta ferit smanjuje mogućnost pojave toplih pukotina no ima i negativan učinak prilikom tople prerade poput valjanja i kovanja. Na slici 3. prikazana je austenitna struktura koja graniči sa zavarom materijala te se na uzorku jasno vidi kako je u lijevoj polovici uzorka povećan broj delta ferita koji se manifestiraju kao crne mrlje na mikroskopskom snimku.

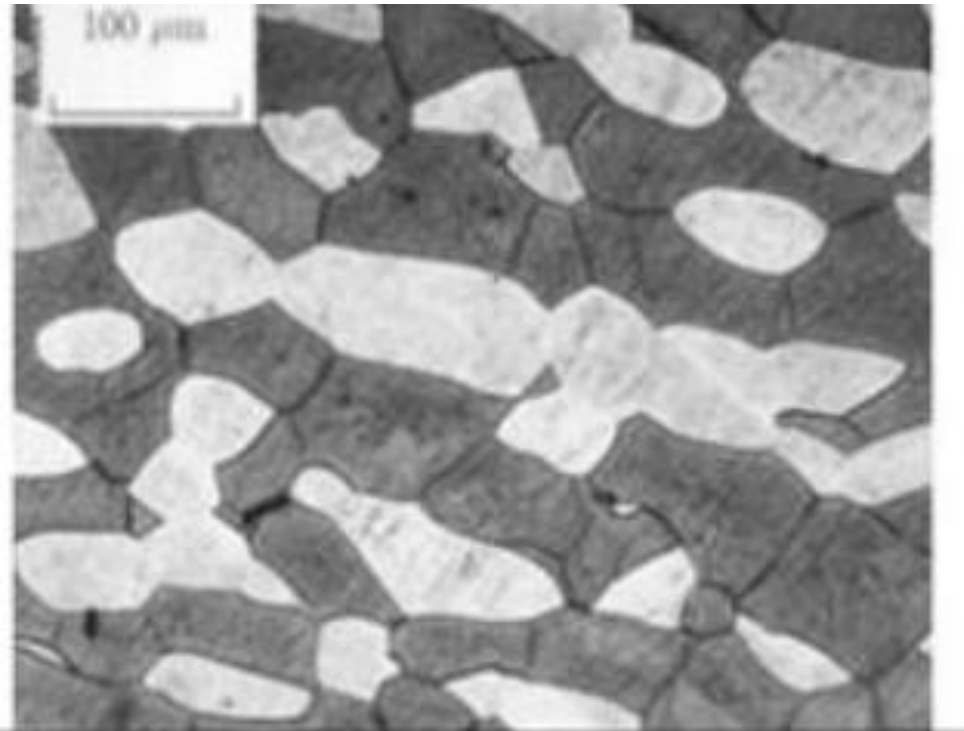


Slika 3. Prikaz austenitne mikrostrukture s većim utjecajem delta ferita (dolje lijevo)

Austenitni čelici nemaju mogućnost poboljšanja kaljenjem zbog nemogućnosti fazne transformacije [1]. Svojstva austenitnih čelika su da nemaju mogućnost usitnjavanja zrna, nisu magnetični, kod zavarivanja veće su deformacije i napetosti u odnosu na feritne čelike, dobra im je plastičnost i žilavost te otpornost na oksidiranje i koroziju. Legira li se s vanadijem, molibdenom i vanadijem, moguće je postići dobru otpornost puzanju na visokim temperaturama dok je sama struktura postojana od temperature skrućivanja pa do temperatura nižih od standardne sobne. Prilikom zavarivanja austenitnih materijala ne postoji sklonost povećanju zrna u zoni zavarivanja. Uklanjanje karbida iz strukture moguće je zagrijavanjem do viših temperatura na kojima se karbidi raspadaju te gašenjem, odnosno naglim hlađenjem kako bi se izbjeglo ponovno izlučivanje karbida. Legure s niskom razinom ugljika, ispod 0,3%, čime se smanjuje mogućnost interkristalne korozije označuju se slovom L, LC ili ELC od izraza *engl.* „Low carbon“. Glavni nedostatak niskog sadržaja ugljika jest smanjenje mogućnosti razvlačenja materijala. Primjenjuju se za izradu predmeta u kućanstvu, aparate i uređaje koji su u direktnom kontaktu s konzumnim namirnicama ili otvorenim ranama.

2.3. Austenitno-feritni (dupleks) čelici

Austenitno-feritni odnosno dupleks čelici su čelici s dvofaznom austenitno-feritnom mikrostrukturom sa sadržajem 40-60% ferita. Legiran je s 22-24% kroma te 6-8% nikla. Dodatnim legiranjem molibdenom, silicijem, titanijem i niobijem materijal se ponaša kao da je povećan sadržaj kroma, dok u slučaju legiranja manganom, bakrom, dušikom i ugljikom materijal poprima svojstva kao u slučaju povećanja sadržaja nikla. Na temperaturama do 1000°C struktura je stabilna dvofazna no u slučaju povećanja temperature iznad navedene povećava se udio ferita te je na temperaturama iznad 1300°C struktura gotovo monofazna feritna. Dupleks čelike legira se kako bi se zadržao visok udio austenita u zoni zavarivanja potrebnog za održavanje korozijske postojanosti te smanjenje krhkosti. Ferit ima višu granicu razvlačenja no i nižu vlačnu čvrstoću i nižu plastičnost od austenita. U dupleksu, ferit se ponaša kao anoda austenitu stoga su ovakvi materijali pogodni za upotrebu u agresivnim atmosferama klorida i sumporovodika. Izrazito su postojani prema napetosnoj koroziji te su manje osjetljivi prema pojavi vodikove krhkosti. Viši sadržaj ferita smanjuje mogućnost pojave interkristalne korozije zato što se krom otapa u feritu dok se ugljik otapa u austenitu i većim sadržajem austenita riskira se pojava karbida $Cr_{23}C_6$ te interkristalne korozije, no ta mogućnost je uvelike manja nego kod austenitnih čelika. Dupleks se najčešće koristi u naftnoj i petrokemijskoj industriji za izradu dijelova crpki, cjevovoda, separatora, ventila, izmjenjivača topline, desalinizatora i sl. te u kemijskoj industriji prilikom proizvodnje kiselina i u radu s agresivnim otopinama kiselina. U brodogradnji su ovi materijali bitni za izradu osovina brodskog vijka, crpki, spremnika, grijača te raznih vrsta brodskih ležajeva.



Slika 4. Prikaz mikrostrukture dupleks nehrđajućeg čelika [1]

2.4. Martenzitni čelici

Martenzitni čelici sadrže 0,2-1% ugljika i 13-18% kroma te mogu sadržavati do 1,3% molibdena i 2,5% nikla. Dobra mehanička svojstva i otpornost na koroziju postiže se kaljenjem na zraku ili ulju. Martenzitni čelici dijele se na konstrukcijske čelike koji sadrže do 0,25% ugljika te se posebna pažnja stavlja na otpornost prema koroziji te na alatne čelike kod kojih se pažnja posvećuje otpornosti na abrazijsko trošenje. Alatni čelici imaju dvofaznu strukturu koja se sastoji od martenzita i karbida što daje dovoljno veliku čvrstoću materijalu uz nižu otpornost na koroziju. Ako sadržaj ugljika padne ispod 0,1% nastaju mekomartenzitni čelici otporni na koroziju koji spadaju u visokočvrste čelike u kojima se lošija mehanička svojstva poput čvrstoće nadomještaju legiranjem s kromom, niklom i molibdenom. Mekomartenzitni nehrđajući čelici u industriji se koriste u preradi hrane zato što su otporni na organske kiseline, kao kirurški instrumenti te pribor za jelo posebno otporan na abrazive [13].

Dodatno legiranje martenzitnih čelika bakrom, niobijem, aluminijem, titanijem i cirkonijem stvaraju se intermetalni spojevi. Intermetalni spojevi nastaju u prethodno stvorenom martenzitu stoga se očvršnuće takvih čelika pripisuje precipitacijskom djelovanju. Ova skupina čelika spada u ultračvrste čelike te se koristi pri izradi lopatica turbina, osovina i rotora pumpi i komponenti uređaja koji rade u atmosferi nečistog zraka.

2.5. Nehrđajući čelici AISI 316 i AISI 304

Najpoznatiji i najrašireniji čelik upotrebljavan u industriji je čelik oznake AISI 304 ili A2. Pripada austenitnoj skupini i sadrži 18% kroma te oko 8% nikla, što tvori oznaku 18/8 kojom se ovaj materijal također može označavati. Osim kroma i nikla može biti legiran i s manganom, dušikom, silicijem i ugljikom. Koristeći čelik 18/8 kao osnovu i dodatno je legirajući kako bi se postigla bolja mehanička svojstva i veća otpornost, razvijena je velika većina austenitnih nehrđajućih čelika.

Čelik oznake 316 također je nastao od čelika 304 no on u svom sastavu ima 17% kroma, 13% nikla te 3% molibdena što mu daje izrazito veliku otpornost na koroziju. Glavni čimbenik bolje otpornosti SS 316 prema utjecaju mora jest sadržaj molibdena koji je izrazito otporan na kloride, stoga se prilikom doticaja sa soli ne javljaju površinske korozijske mrlje kao kod SS 304. Otporan je na toplinu te se koristi do temperatura od 300°C, podržava sve vrste elektrolučnog zavarivanja no plinskim postupcima se ne bi smio zavarivati.

Čelik 316L smanjenog sadržaja ugljika, što označava oznaka L (*engl. „Low“*), pokazuje bolja svojstva prilikom zavarivanja zato što manja razna ugljika znači i manju mogućnost pojave interkristalne korozije. Takvi nehrđajući čelici podnose temperature do 400°C te su u narodu poznatiji kao „morski prokrom“ ili A4 nehrđajući čelik.

Prilikom zavarivanja i ostalih vrsta toplinske obrade potrebno je voditi računa o mogućnosti deformacije materijala, naime austenitni materijali imaju visoki koeficijent toplinske deformacije, a podosta nizak koeficijent toplinske vodljivosti pa je u području zavara moguća pojava pregrijavanja i deformiranja materijala. Moguća je pojava pukotina u zavaru kao posljedica zaostalih nečistoća ili naprezanja materijala no

odabirom pravilnog dodatnog materijala i dobrom tehnikom i postavkama zavarivanja jednostavno je izbjeći navedene probleme. Prilikom obrade i rezanja ovih materijala potrebno je koristiti rezne ploče koje sadrže aluminijske okside, dok su rezne ploče koje sadrže ugljik neprihvatljive[9].

Tablica 1. Odnos masenih udjela elemenata u 304 i 316 nehrđajućim čelicima [3]

Oznaka čelika		Maseni udio elemenata u postotku								
AISI	EN	C	Cr	Ni	Mo	P	S	Si	M n	N
304	X5CrNi18-10	< 0,07	17,5– 19,5	8,0– 10,5	-	0,045	0,015	≤ 1	≤ 2	≤ 0,11
316	X5CrNiMo17- 12-2	< 0,07	16,5– 18,5	10–13	2–2,5	0,045	0,015	≤ 1	≤ 2	≤ 0,11
316 L	X2CrNiMo17- 12-2	< 0,03	16,5– 18,5	10–13	2–2,5	0,045	0,015	≤ 1	≤ 2	≤ 0,11

3. TEHNIKE ZAVARIVANJA TALJENJEM

Tehnike zavarivanja koje na mjestu spoja tale metal visokom temperaturom te ga tako spajaju dijele se prema načinu postizanja temperature za taljenje na plinske i elektrolučne. Kako je ranije spomenuto da nehrđajuće čelike nije preporučljivo zavarivati plinskim tehnikama u fokus dolaze elektrolučne tehnike zavarivanja. Kod elektrolučnih postupaka zavarivanja najčešće se koristi istosmjerna struja te su ovisno o tehnici materijal i elektroda različito nabijeni što dovodi do stvaranja električnog luka u području koje se zavaruje. Također postupci elektrolučnog zavarivanja mogu biti s dodavanjem materijala ili bez dodavanja materijala. Kod dodavanja materijala na mjesto zavarivanja dodaje se kompatibilni materijal te se tako u var unosi dodatni materijal, dok kod zavarivanja bez dodatnog materijala toplina iz luka topi postojeći materijal uzorka koji se zavaruje te u području zavara stvara kupku koja se spaja i prilikom hlađenja stvara čvrsti spoj. Najrašireniji predstavnici elektrolučnog zavarivanja su ručna elektrolučna metoda (REL, engl. Manual metal arc welding), metoda zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (TIG, engl. „Tungsten inert gas“) i metoda elektrolučnog zavarivanja taljivom žicom u zaštiti inertnog plina (MIG, engl. „Metal inert gas“). Svaka od ovih metoda specifična je prema načinu postizanja električnog luka, načinu dodavanja materijala te načinu zaštite zavara od vanjskih utjecaja. Zavar je prilikom postupka zavarivanja potrebno štititi od kisika i dušika iz okoline kako bi se eliminirala mogućnost reakcije taline s navedenim elementima te stvaranje oksida i poroznosti unutar samog zavara te slabljenja čvrstoće zavara.

3.1. REL tehnika zavarivanja

Ručno elektrolučno zavarivanje koristi električni luk istosmjerne ili izmjenične struje kao izvor energije. Luk se uspostavlja između štapičaste elektrode i materijala koji se zavaruje. Elektroda se sastoji od jezgre, odnosno žice najčešće istovjetne materijalu zavarivanja te obloge koja prilikom zavarivanja istiskuje zrak iz okoline zavara te legiranjem sprječava mogućnost pojave oksida u zavaru. Elektroda je i dodani materijal zavaru stoga se elektroda u toku zavarivanja troši. Oprema za samo zavarivanje je relativno jeftina i dostupna te kompaktna izvedbom, a postupak zavarivanja moguće je usavršiti bez kompliciranije obuke. Manjkavost ove tehnike jest u tomu što je potreban

zavarivač, te je zbog zamjene potrošenih elektroda i uklanjanja troske relativno spora u odnosu na ostale tehnike. Osim toga prilikom zamjene elektrode nerijetko su prisutne poteškoće do ponovnog uspostavljanja električnog luka. Prostori u kojima se vrši zavarivanje moraju biti ventilirani zbog dimova i plinova koji su nusprodukti zavarivanja elektrodama.

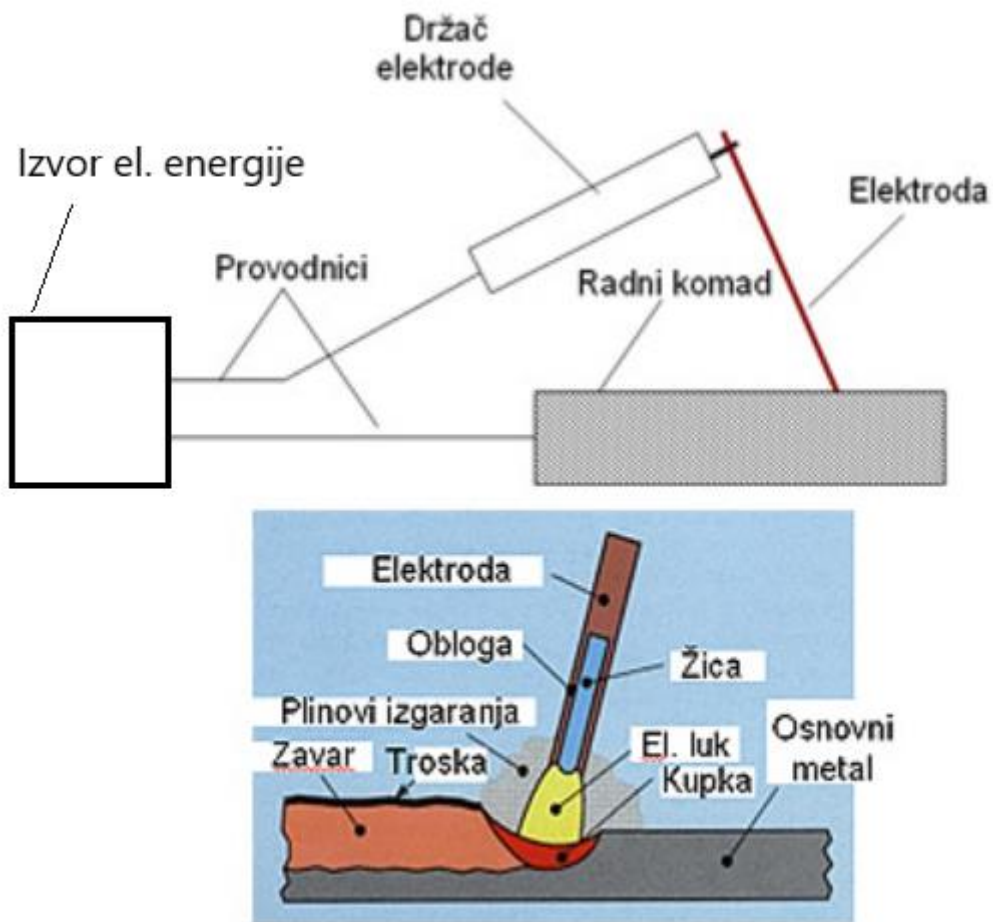
Razlikuju se četiri vrste elektroda dostupne na tržištu i koriste se ovisno o zahtijevanim svojstvima zavara.

Bazična elektroda tako daje dobru žilavost zavaru te veže na sebe vodik, fosfor, kisik i sumpor i time štiti zavareni spoj od poroznosti i nemetalnih primjesa. Sama bazična elektroda uvijek mora biti priključena na + pol uređaja za stvaranje električnog luka dok zavarivač mora posjedovati više iskustva nego pri rukovanju s ostalim elektrodama.

Rutilna elektroda omogućuje nešto stabilniji luk, sam zavar estetski lijepo izgleda, može se spajati na pozitivni i negativni pol izvora struje. Mehanička svojstva poput čvrstoće i žilavosti nešto su lošija nego kod bazičnih elektroda stoga se rutilne elektrode koriste za zavarivanje jednostavnijih spojeva poput npr. dvorišnih ograda i slično, dok su bazične primjerene za zavarivanje spojeva na nosivim konstrukcijama i slično.

Elektrode s kiselom oblogom imaju izraženu tekuću trosku pa nisu preporučljive za nestandardne položaje zavarivanja, zavar estetski lijepo izgleda no slab je na udarnu čvrstoću stoga ova vrsta elektroda nije primjerena za konstrukcijske zavare.

Celulozne elektrode sastoje se od debele obloge koja sadrži oko 15% celuloze i zbog svoje dobre penetracije i brzine taljenja koriste se kod varenja debljih limova za zavarivanje korijenih spojeva. Estetski var ne izgleda lijepo kao kod rutilnih već je površina zavara neravna te je prskanje materijala prilikom zavarivanja izraženije nego kod ostalih tipova elektroda. Slika 5 shematski prikazuje izgled i konfiguraciju uređaja za REL zavarivanje te pojednostavljeni proces i dijelove procesa zavarivanja.



Slika 5. Prikaz REL tehnike zavarivanja i shematski prikaz uređaja za zavarivanje [5]

3.2. TIG zavarivanje

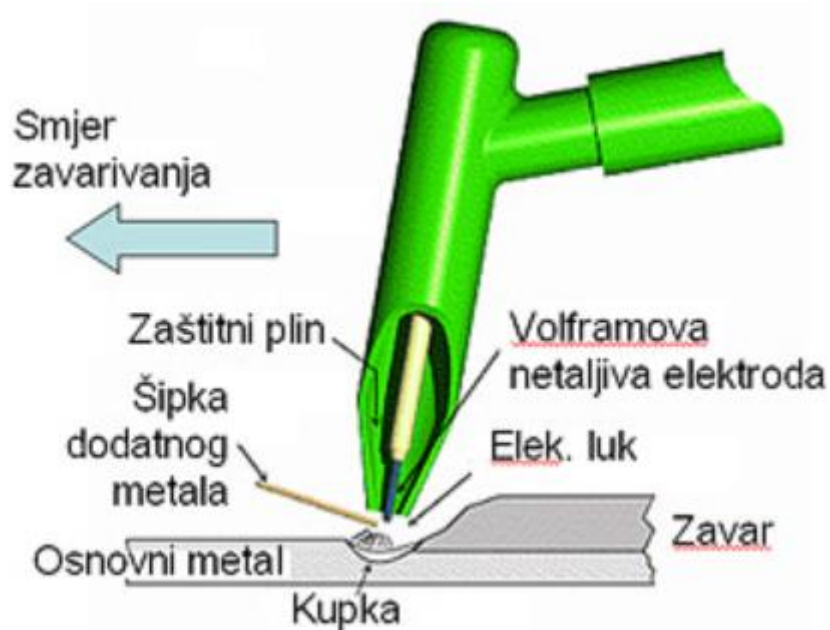
Kratice TIG dolazi od engleskog naziva *tungsten* za volfram od kojeg je izrađena elektroda uređaja kojom se postiže električni luk. Elektroda je netaljiva, odnosno ne troši se kao dodatni materijal već je potrošnja minimalna uslijed dugotrajnog rada. Elektroda obavezno mora imati svoj plinski omotač, sačinjen od inertnih plinova argona ili helija, a ovisno o uvjetima zavarivanja moguće je korištenje mješavina dvaju ili više inertnih plinova. Električni luk kod ovog načina zavarivanja izuzetno je stabilan i moguće je zavarivanje limova debljine od 6-7mm do ispod 1mm. Volframova elektroda prilikom rada s istosmjernom strujom spojena je na negativan polaritet izvora struje dok je materijal spojen na pozitivan pol.

Kod zavarivanja čelika i korozijski otpornih čelika vrh elektrode potrebno je naoštiti kako bi luk bio što intenzivniji i usmjereniji. Usmjereni luk daje uredan i precizan zavar taljenjem materijala i spajanjem rubnih dijelova uzoraka. Kod zavarivanja aluminija i magnezija koristi se izmjenična struja i sam vrh elektrode se uslijed dosta visokih temperatura¹ otopi te postane nalik lopti, stvarajući tako rašireniji luk. Sam luk može se regulirati parametrima struje, a o jačini luka ovisi i dubina penetracije. U prošlosti se luk postizao dodirivanjem elektrode o materijal, tzv. kresanjem, dok je druga opcija postizanje luka visokofrekventnim generatorima koji gotovo trenutno stvaraju luk nakon približavanja elektrode materijalu. Prilikom postizanja luka dodirivanjem materijala elektrodom postoji mogućnost kontaminacije materijala ili spoja volframom stoga u današnje vrijeme svi kvalitetniji aparati za zavarivanje postižu luk visokofrekventnim generatorima. TIG zavarivanje zahtjeva visoku razinu iskustva kod operatera i u odnosu na ostale tehnike zavarivanja relativno je spora i ovisi o brzini i iskustvu operatera no može se izvoditi u svim položajima. Iako daje estetski najbolji i najkvalitetniji zavar nije toliko rasprostranjena zbog skupe opreme i potrebne vještine operatera. Osim toga u brodograđevnoj industriji dosta je ograničavajuća činjenica da je s TIG tehnikom moguće zavarivati limove manje debljine, ispod 6mm [6].

Zavarivanje je moguće, kako je prethodno opisano, taljenjem dviju strana uzoraka za zavarivanje i njihovim međusobnim spajanjem prilikom kojeg se javlja zavar u obliku udubine nastao uslijed spajanja bez promjene volumena, te zavarivanjem dodanim materijalom gdje se u kupku taline neposredno ispred elektrode dodaje materijal istovjetan materijalu zavara ili materijal odgovarajućih svojstava. Osim ručne tehnike trenutno su dostupni i poluautomatski te automatski uređaji. Kod poluautomatskih uređaja također je potreban operater te se od ručnog načina razlikuje isključivo po načinu dodavanja dodatnog materijala gdje to vrši automat pričvršćen na pištolj za zavarivanje. Osim toga postoje i samostalne izvedbe gdje je moguće pravocrtno zavarivanje pomoću uređaja koji se kreće uzdužno po šini te zavaruje uzorak ili rotacijski

¹ Naime, zbog djelovanja izmjenične struje toplina se osim na uzorak zavarivanja širi i na elektrodu, dok je kod istosmjernje struje većina topline predana uzorku zavarivanja.

uređaj za zavarivanje cijevi i cilindričnih uzoraka. Dostupne verzije uređaja razlikuju se prema tome pokreće li se pištolj za zavarivanje ili uzorak zavarivanja, npr. mogućnost zavarivanja cijevi s rotiranjem pištolja oko cijevi i s rotiranjem cijevi oko osi na valjcima dok fiksno postavljen pištolj zavaruje. Automatski uređaji zahtijevaju samo nadzor operatera i od standardnog ručnog načina razlikuju se po tome što njima upravlja prethodno isprogramirana robotska ruka. Opremljeni su kamerama i laserskim mjerачima koji provode kontrolu kvalitete napravljenog zavara te prema tim rezultatima korigiraju parametre [10].

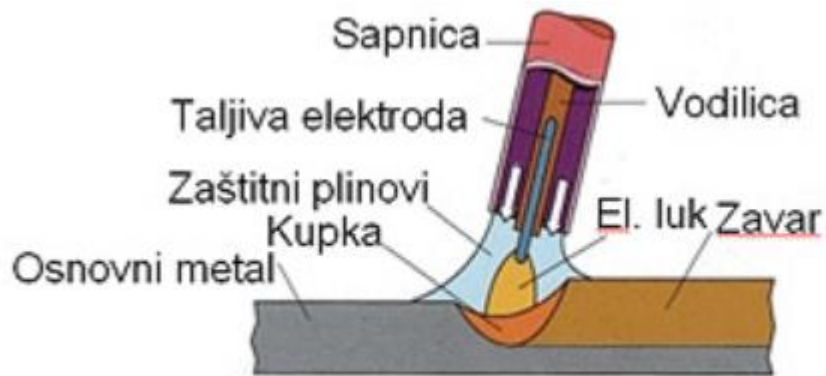


Slika 6. Prikaz procesa TIG zavarivanja [5]

3.3. MAG/MIG tehnika zavarivanja

Ova tehnika dobila je ime po engleskoj kratici „*metal active gas*“ odnosno „*metal inert gas*“. U slučaju kad je zaštitni plin neki od inertnih plinova poput helija, argona ili mješavine, tada se postupak naziva MIG. Kad je zaštitna atmosfera aktivni plin poput CO₂ u tom slučaju postupak se naziva MAG. Kod ove tehnike električni luk stvara se između elektrode, odnosno žice koja je ujedno i dodatni materijal i materijala zavarivanja. Luk otapa rubove spoja i žicu odnosno elektrodu koja ispunjava brazdu spoja, dok okolna plinska atmosfera potiskuje štetne plinove iz zavara te tako štiti zavar od

poroznosti. Elektroda, odnosno žica, namotana je na bubanj i smještena je u samom uređaju te se pomoću potisnog mehanizma potiskuje kroz kabel do pištolja za zavarivanje. Zavarivanje se vrši ručno, dakle potreban je operater, dok u velikim postrojenjima poput brodogradilišta postoje uređaji za automatsko zavarivanje. Ovisno o debljini materijala i položaju zavarivanja odabire se debljina žice i jačina struje. Ovim postupkom moguće je zavarivati veliki spektar materijala, od visokolegiranih čelika, do korozivno otpornih čelika i obojenih metala. Pogodno je za sve položaje zavarivanja i sve debljine materijala, od debelih do izuzetno tankih limova. Ova tehnika zavarivanja najbrža je od dostupnih. Ukoliko se parametri dobro podese nema gubitaka materijala ni prskanja, zavar izgleda estetski lijepo i bez troske.



Slika 7. Prikaz MAG/MIG tehnike [5]

4. IZRADA EPRUVETE I ZAVARIVANJE UZORAKA

Za izradu epruvete korišten je nehrđajući čelik AISI 316 L budući da je na sastavu materijala prikazanom na slici 8 navedeno manje od 0,3%. Prikazani sastav materijala dostupan je u atestu dobivenom od proizvođača. Epruveta je dimenzionirana prema ograničenjima kidalice na maksimalnu vlačnu silu od 20 kN, a ne prema ISO 6892-1-2016 annex B normi za vlačno ispitivanje limova.

Schmelze / Cast-No / Coulée N°	Chemische Zusammensetzung / Chemical composition / Composition chimique								
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% N
324352	0,017	0,49	0,95	0,035	0,0010	17,20	2,03	10,00	0,040

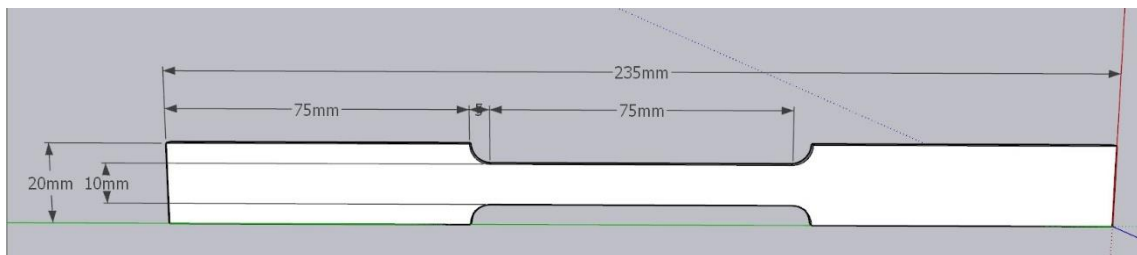
Slika 8. Kemijski sastav materijala prema atestu

4.1. Dimenzioniranje epruvete

Dimenzije epruvete odabrane su prema navedenom izrazu za maksimalno vlačno naprezanje materijala.

$$\sigma = \frac{F_{kidalice}}{A} \left(\frac{N}{m} \right)$$

Debljina ispitnog dijela epruvete je 3 mm, širina 10 mm, a duljina 75 mm. Duljina cijele epruvete iznosi 235 mm. Budući da je riječ o četvrtastoj epruveti poprečna površina ispitnog presjeka iznosi 30 mm² te bi prema maksimalnoj vlačnoj čvrstoći od 610 MPa, navedenoj u atestu materijala, prilikom testiranja trebala izdržati vlačnu silu od 18,3 kN.



Slika 9. Dimenzije epruvete za vlačno testiranje

Epruveta s dimenzijama prikazana je na slici 9, izrezana je laserskom tehnikom rezanja iz poliranog lima debljine 3 mm. Zbog tolerancije stroja za rezanje, te odstupanja prilikom serijske proizvodnje limova potrebno je mikrometrom za mjerenje izmjeriti širinu i debljinu svakog uzorka zasebno kako bi se moglo izračunati naprezanje i prekidna čvrstoća. Izrađena je epruveta iz komada za određivanje referentnih rezultata te 12 polovica epruveta koje su zavarene u 6 epruveta MIG, TIG i REL tehnikom zavarivanja.

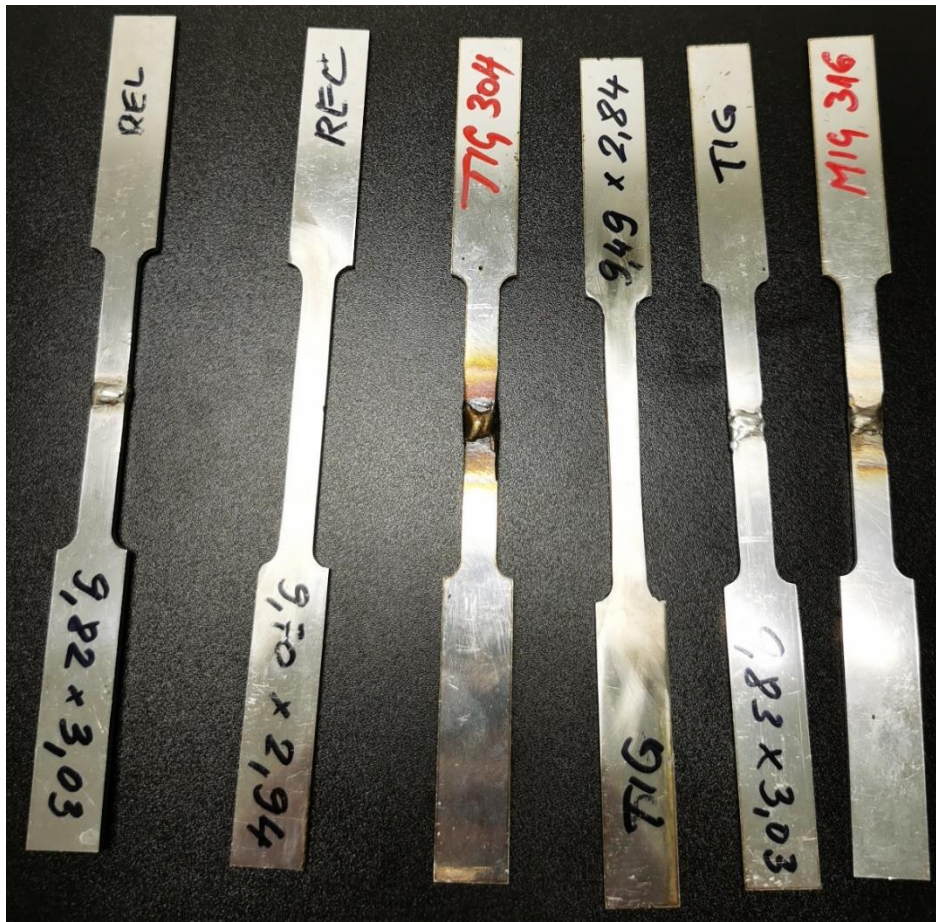


Slika 10. Rezanje epruveta laserom

4.2. Zavarivanje epruvete

Izrezane polovice epruveta zavarivane su različitim postupcima elektrolučnog zavarivanja. Uzorci su zavarivani čeonim I zavarom bez zračnosti između dvaju polovica epruvete. Prilikom zavarivanja epruveti pazilo se na provarenost korijena zavara te se zavarivanje izvršilo s obje strane zavara. Četiri zavara nisu prolazila obradu uklanjanja

viška navarenog materijala brušenjem dok su dva uzorka brušena do debljine izvornog uzorka prije zavarivanja.



Slika 11. Zavarene epruvete

Dva uzorka zavarivana su REL tehnikom, jedan je obrađen brušenjem dok je drugi ostavljen u izvornom stanju. Uzorci su zavarivani elektrodama kakve su dostupne na brodovima za zavarivanje 316 L čelika. Tri uzorka zavarena su TIG postupkom sa zaštitnom plinskom atmosferom od 99,9% argona s različitim dodatnim materijalima, puna žica za 316 L čelike te puna žica za 304 čelike, kako bi se pokazao utjecaj odabira neprimjerenog dodatnog materijala na čvrstoću zavara. Od 3 zavara zavarena TIG tehnikom jedan zavar 316 L žicom je obrađen brušenjem dok druga 2 različitih dodatnih materijala nisu. Jedna epruveta zavarena je MIG tehnikom s punom žicom 316 L u zaštitnoj plinskoj atmosferi argona.

Tablica 2. Dimenzije uzoraka

Epruveta	Širina ispitnog presjeka (mm)	Debljina ispitnog presjeka (mm)	Površina ispitnog presjeka (mm ²)
Referentna	9,94	3,03	30,1182
MIG zavar 316	9,86	3,05	30,073
TIG zavar 316	9,83	3,03	29,7849
TIG zavar 304	9,93	3,02	29,9886
TIG zavar 316 brušen	9,49	2,84	26,9516
REL zavar brušen	9,7	2,94	28,518
REL zavar	9,82	3,03	29,7546

4.2.1. Pasiviziranje

Pasiviziranje površine zavara vršeno je na 4 uzorka i to sredstvom za pasivizaciju AVESTA. Postupak pasivizacije vrši se kako bi se s površine tretirane toplinom uklonile čestice metala koje su nusprodukt zavarivanja, slojevi oksida metala, te obojenost metala u zoni utjecaja topline zavara. Osim kemijske pasivizacije materijal se može i mehanički pasivizirati odnosno ukloniti zaostale čestice i okside brušenjem područja zavara i viška materijala nastalog uslijed zavarivanja. Kod mehaničke obrade treba paziti na to da su alati namijenjeni obradi nehrđajućih čelika te da pritisak alatima na površinu kako bi se spriječilo razvijanje visokih temperatura. Na slici 11. vidljiva je razlika između REL zavarene epruvete premazane sredstvom za pasivizaciju te MIG 316 epruvete na kojoj zona zavara nije pasivizirana. Slika 12 prikazuje zavar koji nije bio pasiviziran a bio je izložen agresivnoj atmosferi.



Slika 12. Korozija zavara koji nije pasiviziran

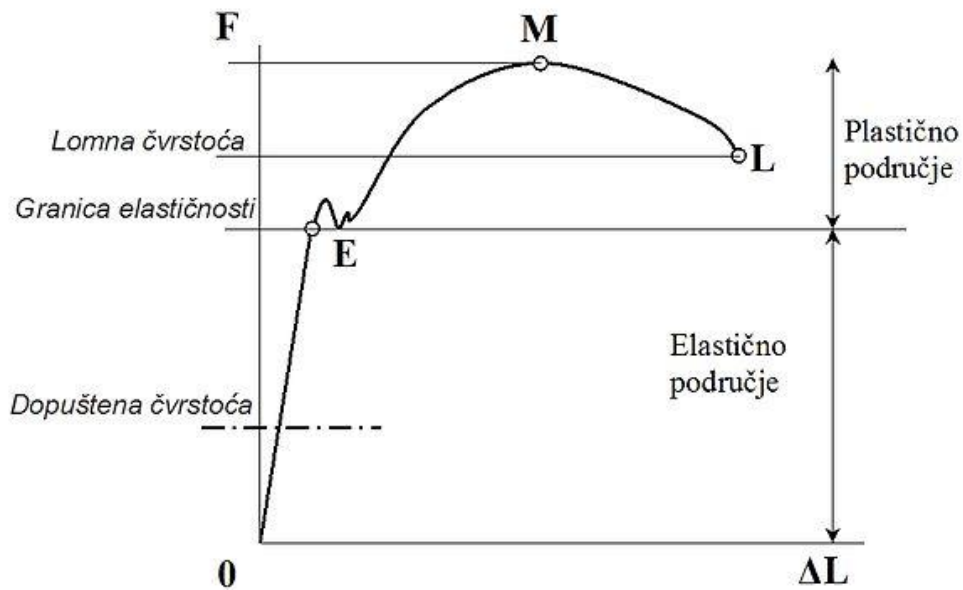
Kako kemijski sastav oksidnog sloja u zoni zavarivanja nije isti kao i kod ostatka površine, ta zona zbog smanjenog udjela kroma u oksidu ima veći afinitet prema koroziji.

Sredstvo za pasivizaciju najčešće se sastoji od kombinacije fluorovodične te dušične kiseline. Prilikom pasivizacije, kiseline iz sredstva nagrizažu površinu koju je potrebno pasivizirati te stvaraju anorganski film koji sprječava daljnju koroziju metala, odnosno vraća mu otpornost na koroziju koju je imao prije zavarivanja.

5. VLAČNO ISPITIVANJE

Vlačnim ispitivanjem se ispituju mehanička svojstva materijala. Vlačno ispitivanje provodi se na kidalici u čije se čeljusti umetne ispitni uzorak te se čeljusti udaljuju odnosno djeluju vlačnom silom na uzorak. Iz vlačnog testa može se odrediti Poissonov omjer, Youngov modul te granična čvrstoća i rad plastične deformacije. Youngov modul opisuje elastično područje materijala u vlačnom testu odnosno prikazuje omjer vlačnog naprezanja i produljenja uzorka u elastičnom području ispitivanog materijala. Poissonov omjer prikazuje smanjenje širine presjeka ispitnog uzorka usred produljenja uzrokovano vlačnim naprezanjem [14]. Vrijednosti dobivene vlačnim ispitivanjem koriste se prilikom dimenzioniranja konstrukcija, vratila, lanaca, čeličnih užadi i sl. Kao rezultat vlačnog ispitivanja dobije se sila kojom kidalica djeluje na uzorak materijala te produljenje materijala uslijed djelovanja sile. Iz dobivenih podataka se može dobiti vlačno naprezanje iz omjera sile kroz površinu ispitnog presjeka te relativnog produljenja odnosno produljenje uzorka u odnosu na početnu duljinu. Pomoću tih dostupnih informacija formira se dijagram naprezanja iz kojeg se može odrediti elastično područje materijala, plastično područje materijala, točka loma te granica razvlačenja. U elastičnom području primjenjiv je Hooke-ov² zakon, odnosno materijal se nakon djelovanja sile vraća u prvotni oblik, što je izrazito primjenjivo prilikom dimenzioniranja konstrukcija. Područje plastičnosti prikazuje područje „curenja“ materijala, odnosno produljenja uzorka bez mogućnosti povratka u prvotno stanje, u plastičnom području nalazi se i točka M koja predstavlja maksimalnu vlačnu čvrstoću. Na slici 13 prikazan je izgled dijagrama naprezanja s iscrtanim dijelovima dijagrama.

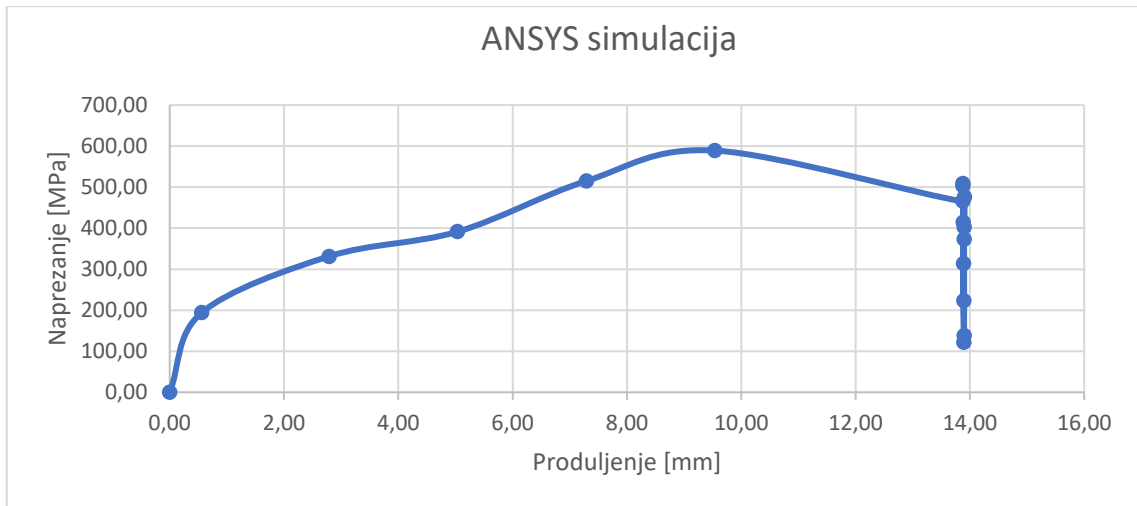
² Zakon opisuje ovisnost promjene oblika materijala i sile koja je primijenjena na njega, govori o ponašanju materijala u obliku šipke kao opruge u elastičnom području, odnosno da se materijal izdužen prilikom djelovanja sile može povratiti u prvotni položaj prestankom djelovanja sile na uzorak.



Slika 13. Prikaz dijagrama naprezanja materijala na vlačnom testu

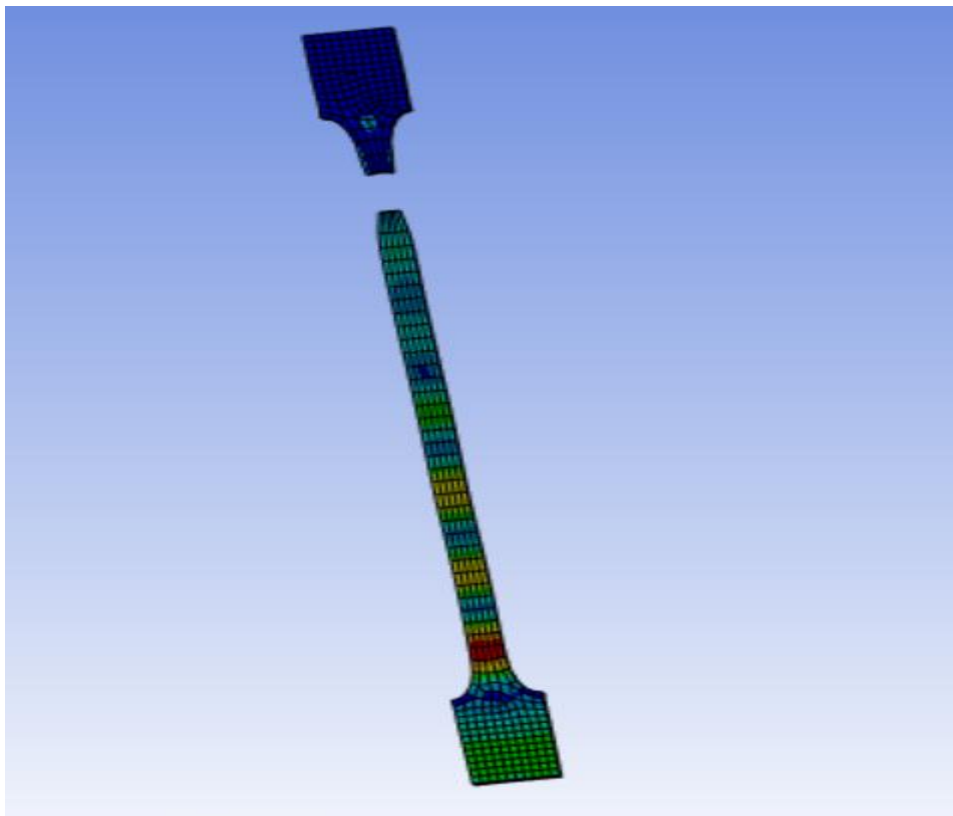
5.1. Računalna simulacija vlačnog testa uzorka

Simulacija vlačnog testa napravljena je metodom analize konačnih elemenata pomoću softverskog paketa „ANSYS“ 2022. Model epruvete je nacrtan i prenesen u softveru „ANSYS Space Claim“, a epruveta podijeljena u 3 zone, dvije zone koje ulaze u čeljusti kidalice te ispitna zona uzorka. Kao materijal epruvete označen je ponuđeni „Stainless Steel 316“ s popisa materijala unutar izbornika „Engineering“, dana u „ANSYS Workbenchu“, stoga je moguće da se dobiveni materijali iz simulacije blago razlikuju u odnosu na stvarni ispitni materijal. Na uzorku je jedna strana postavljena kao fiksna dok je na drugu djelovalo istezanje. Maksimalna vlačna čvrstoća prema testu ispala je 589 MPa što je gotovo identično vrijednostima deklariranim u atestu materijala. Kao rezultat testa nastao je i dijagram 1 te se na njemu vidi odnos vlačnog naprezanja i produljenja uzorka.



Dijagram 1. Naprezanje simulirano u softveru ANSYS

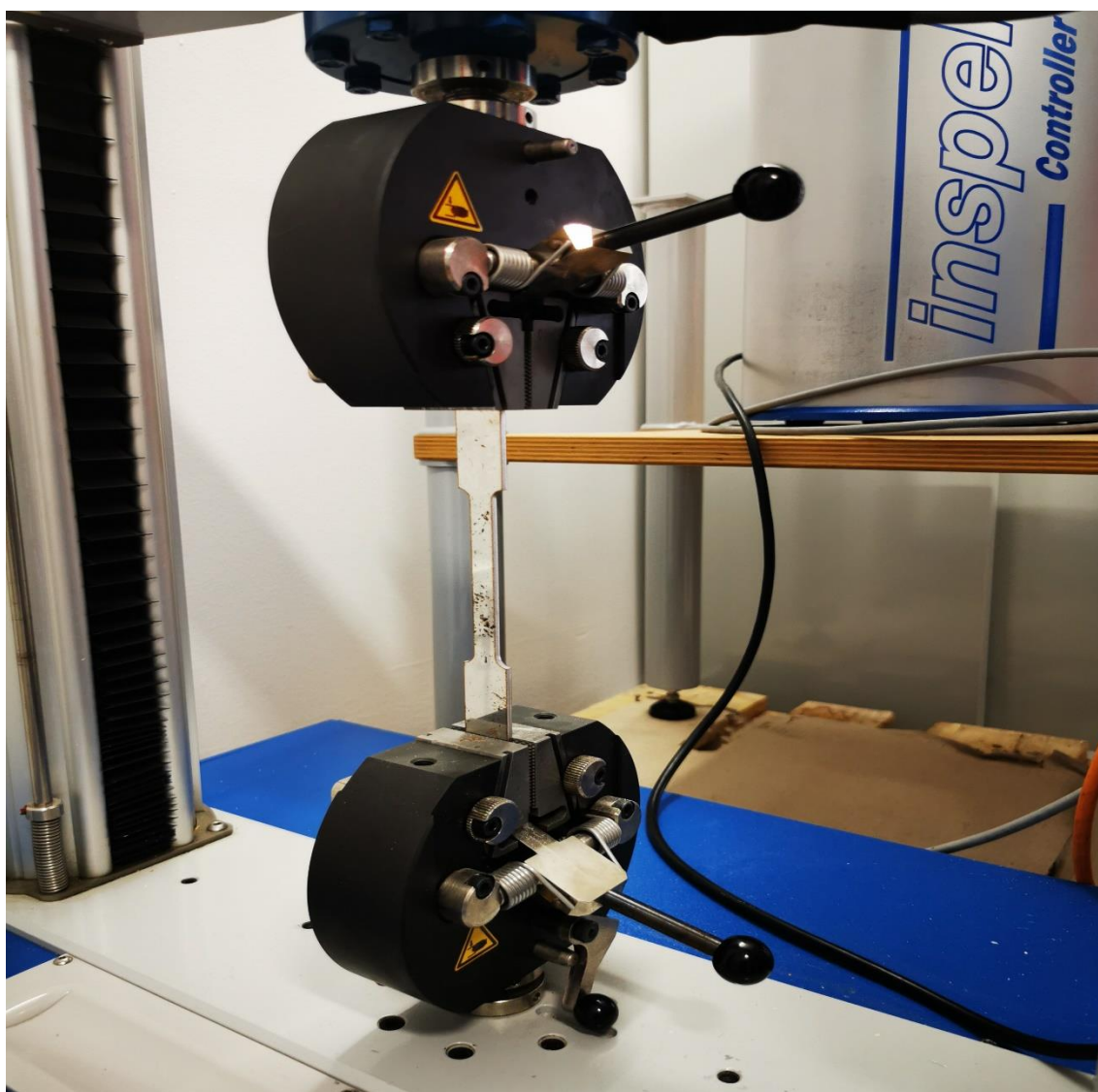
Osim zadovoljavajuće točnosti dijagrama sama grafička simulacija prikazala je približno mjesto loma kao i na kasnije izvedenom testu na kidalici. Na slici 14 vidljivo je puknuće ispitnog uzorka u zoni ispitnog dijela prema polovici na koju je bilo postavljeno istezanje. Simulirani uzorak imao je nešto veće produljenje u odnosu na stvarni test zbog prethodno navedenih zadanih svojstava materijala.



Slika 14. Grafički prikaz puknuća epruvete simuliran softverom ANSYS

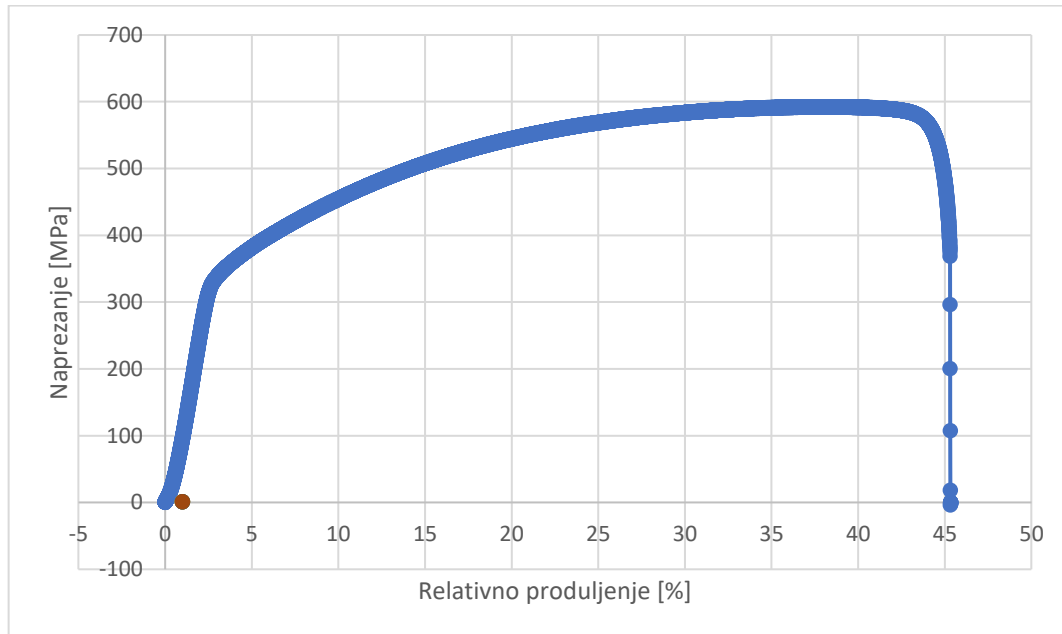
5.2. Vlačno ispitivanje referentne epruvete

Referentna epruveta izrezana je iz jednog komada te je podvrgnuta vlačnom testiranju kako bi se zavareni uzorci imali s čim usporediti, odnosno da bi se dokazalo da je mjesto zavara slabije od ostatka materijala koji nije toplinski tretiran. Epruveta je u čeljusti stavljena vodoravno kako bi sila djelovala isključivo po okomitoj osi. Čeljusti kidalice zahvaćaju epruvetu otprilike 40 mm na svakoj strani. Na slici 15. prikazana je referentna epruveta na kidalici neposredno prije testa.



Slika 15. Epruveta u kidalici

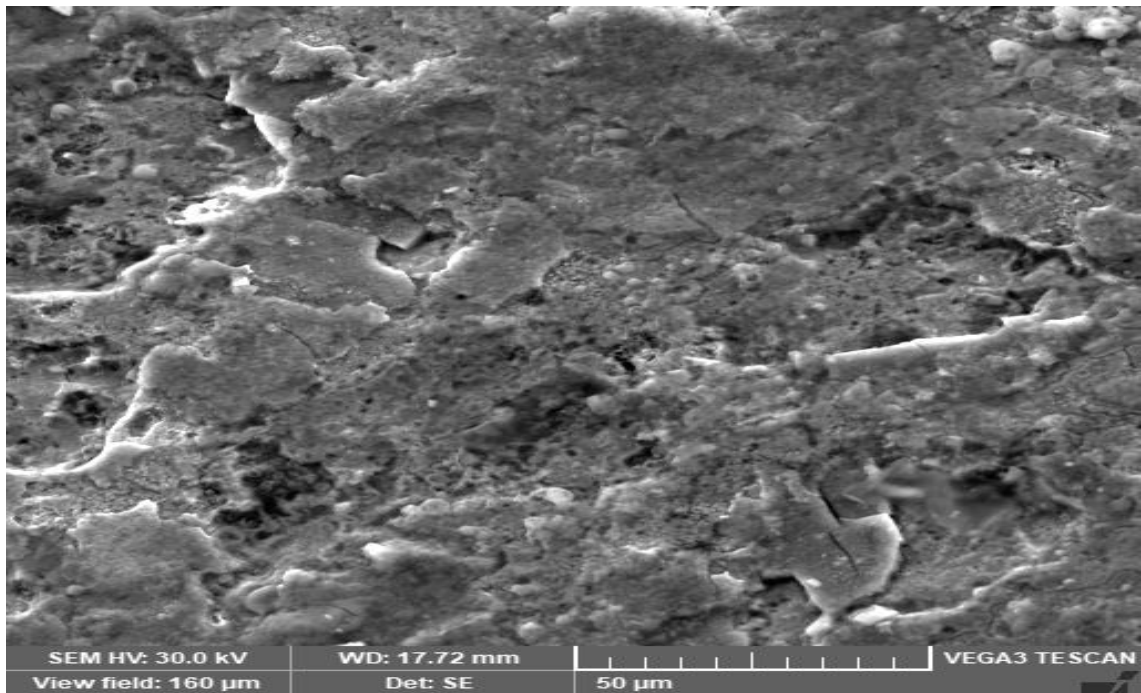
Prema podacima o sili, očitanim iz podataka koje je upravljački softver prikupio tijekom vlačnog testa, kreiran je dijagram naprezanja, maksimalna sila u testu iznosi 17847,6N dok je ukupno produljenje cca 35 mm. Uvrsti li se sila u prethodno navedenu formulu dobije se maksimalno vlačno naprezanje od 592,6 MPa što je blizu 610 MPa koji su navedeni u atestu.



Dijagram 2. Dijagram naprezanja referentne epruvete

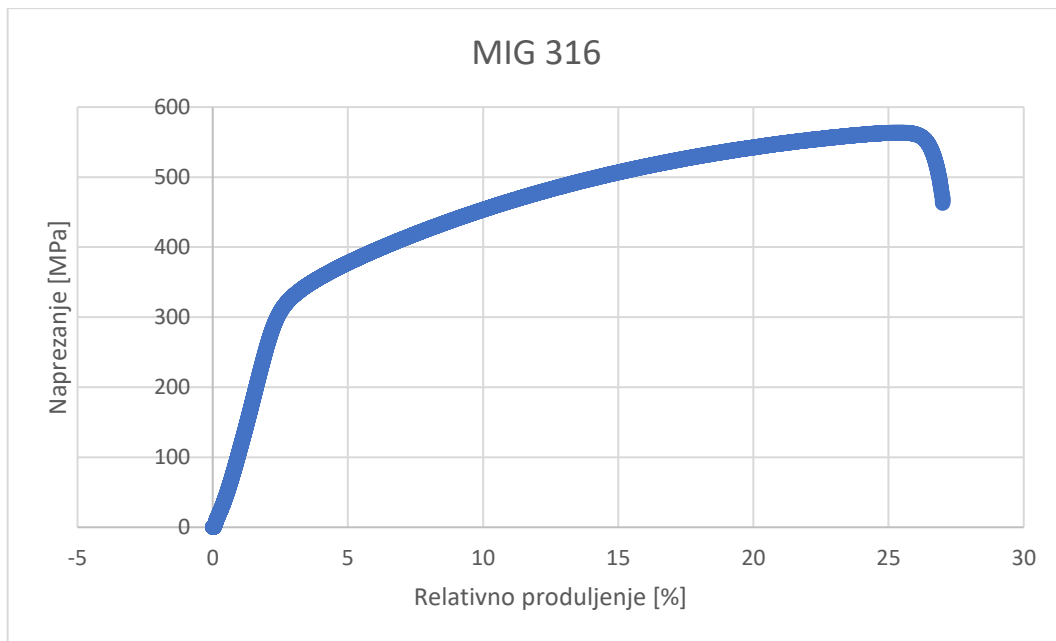
5.3. Vlačno ispitivanje MIG zavarene epruvete s 316 žicom

Mig zavarena epruveta izdržala je naprezanje od 563,6 MPa što bi značilo da je maksimalna vlačna čvrstoća oko 7% manje vrijednosti od referentnog uzorka. Na mikroskopski snimljenom uzorku po rubovima austenitnih površina vidljive su bijele tvorevine kromovog karbida. Interkristalna korozija nije prisutna u zavaru no velika je prisutnost delta ferita koji smanjuju mogućnost pojave toplih pukotina te su vidljivi kao tamne crne točkice.



Slika 16. Mikroskopski prikaz MIG zavora

Prilikom testiranja na kidalici epruveta je pukla neposredno uz zavar u zoni utjecaja topline. Kako je operater koji je zavarivao epruvetu naveo da je epruveta varena sa svake strane dvaput kako bi se eliminirala mogućnost neprovarenosti korijena ista je dvaput izlagana utjecaju topline sa svake strane. Može se zaključiti da su promjene nastale zbog utjecaja topline od zavora, zona je izlagana temperaturi iznad 800 °C te se očito pojavila krhka sigma faza u mikrostrukтури koja je dovela do loma. Na dijagramu je vidljivo kako je krivulja plastičnog područja kraća što upravo ukazuje na to da je uzorak manje curio i ranije pukao zbog krtosti zone utjecaja topline (ZUT).



Dijagram 3. Dijagram naprezanja za uzorak zavaren MIG tehnikom 316 punom žicom

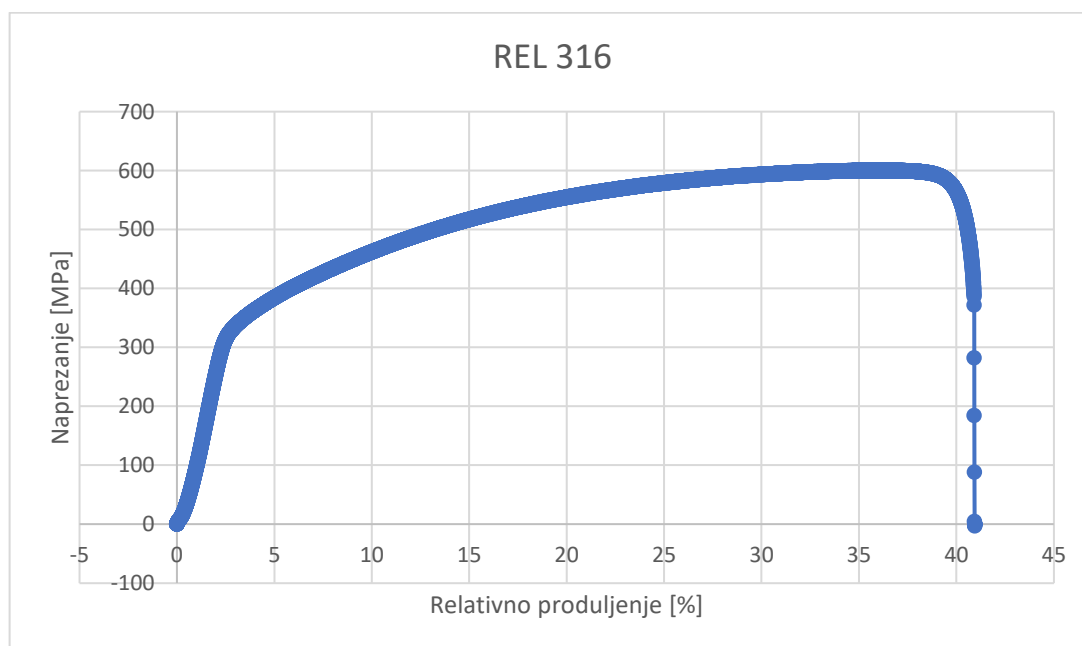
5.4. Vlačno ispitivanje uzorka zavarenog REL tehnikom

Uzorak zavaren REL tehnikom prilikom vlačnog naprezanja postigao je vrijednost vlačne čvrstoće od gotovo 600,5 MPa što je naprezanje veće i od referentnog uzorka no i dalje manje od vrijednosti deklarirane u atestu. Lom na epruveti nastao je u zoni identičnoj kao kod referentne epruvete. Zavar na mikroskopskom snimku sa slike izgleda kompaktnije od okolnog izvornog materijala uzorka, vjerojatno zbog dobrih postavki uređaja za zavarivanje te odabira odgovarajućih elektroda.



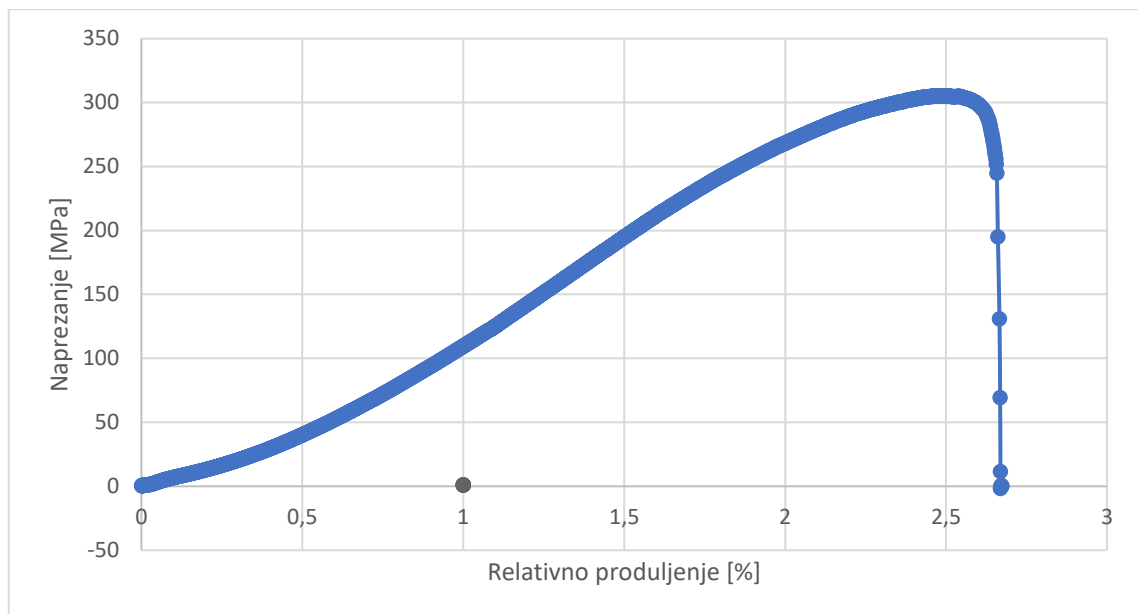
Slika 17. Mikroskopski snimak rubnog područja REL zavora epruvete

Prema podacima iz dijagrama napetosti produljenje epruvete prije loma samo je za 3 milimetra manje od produljenja referentne epruvete što govori da je zavar izdržao testiranje te je zavareni uzorak gotovo identične čvrstoće kao i referentni.



Dijagram 4. Vlačno naprezanje epruvete zavarene REL postupkom

Kod epruvete koja je zavarivana REL tehnikom te je naknadnom mehaničkom obradom brušena do debljine presjeka izvornog uzorka testiranje se nije moglo provesti ispravno iz razloga što je prilikom zavarivanja došlo do greške u zavaru. Epruveta nije bila dovoljno provarena odnosno metalna kupka nije prodrla kroz cijeli materijal te je spoj bio slabe kvalitete. Zavar je ostao plitak, oko pola milimetra svake strane bilo je zavareno dok je u sredini uzorka materijal ostao gotovo u izvornom stanju. Ovakva pogreška mogla se spriječiti da su uzorci prije testiranja bili podvrgnuti metodama ispitivanja zavara bez razaranja što je inače praksa prilikom zavarivanja brodskih konstrukcija u brodogradilištima. Dijagram prikazuje da je i takav zavar izdržao silu od gotovo 8220 N odnosno 305 MPa što je gotovo pola od napreznja koju je referentna epruveta izdržala.

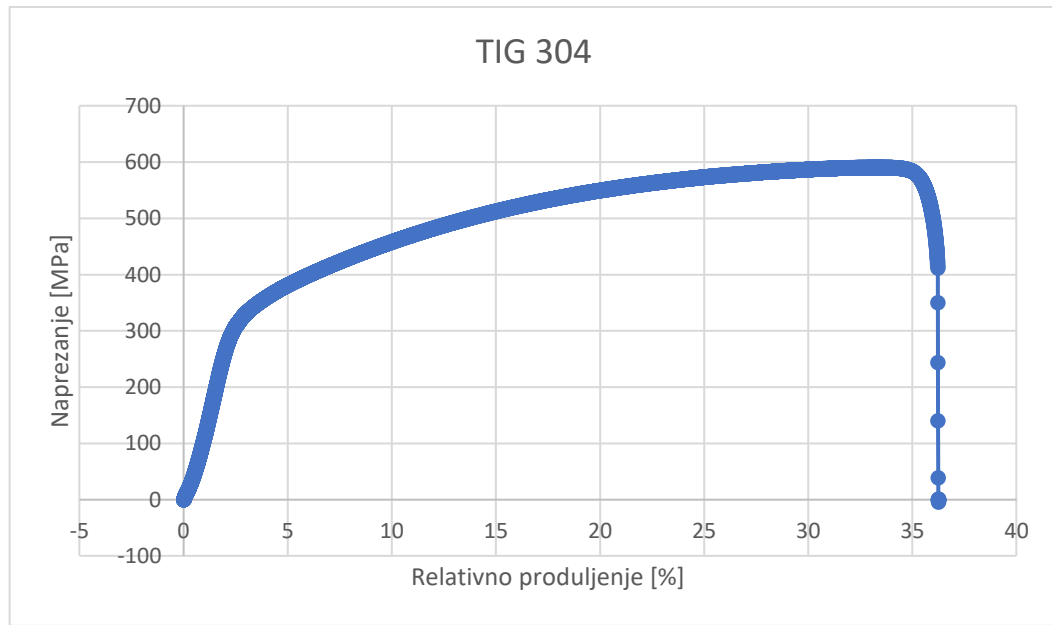


Dijagram 5. Vlačno napreznje REL zavarene epruvete obrađene brušenjem

5.5. Vlačno ispitivanje epruvete zavarene TIG tehnikom i AISI 304 žicom

Pretpostavka prilikom testiranja ovog uzorka bila je da će do loma doći na samom zavaru kako je riječ o zavaru s dodatnim materijalom koji nije odgovarajućih karakteristika materijalu koji se zavaruje. Rezultati ispitivanja govore da to nužno nije točno zato što je vlačna čvrstoća 590,9 MPa što je odstupanje oko 4% od referentnog te je gotovo zanemarivo. Međutim kao i kod MIG zavara lom se nalazi neposredno uz zavar,

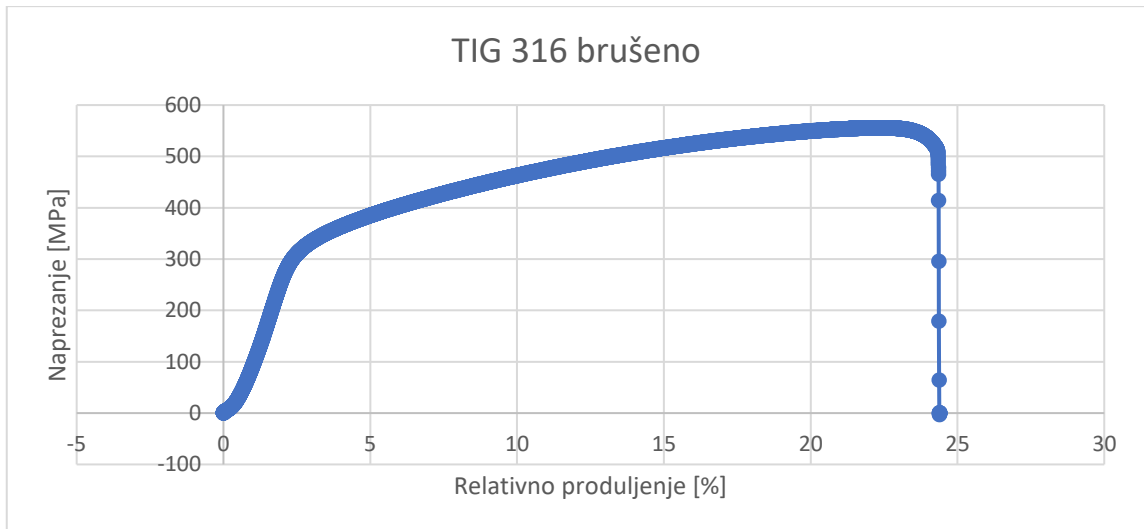
u zoni utjecaja topline. Isti operater zavarivao je MIG i TIG 304 tehnikom što može ukazivati na to da se zbog prekomjernog izlaganja toplini dogodila određena promjena u strukturi materijala. Prema rezultatima s kidalice ukupno produljenje epruvete prije loma iznosilo je gotovo 29 mm.



Dijagram 6. Vlačno naprezanje epruvete zavarene TIG postupkom s AISI 304 žicom

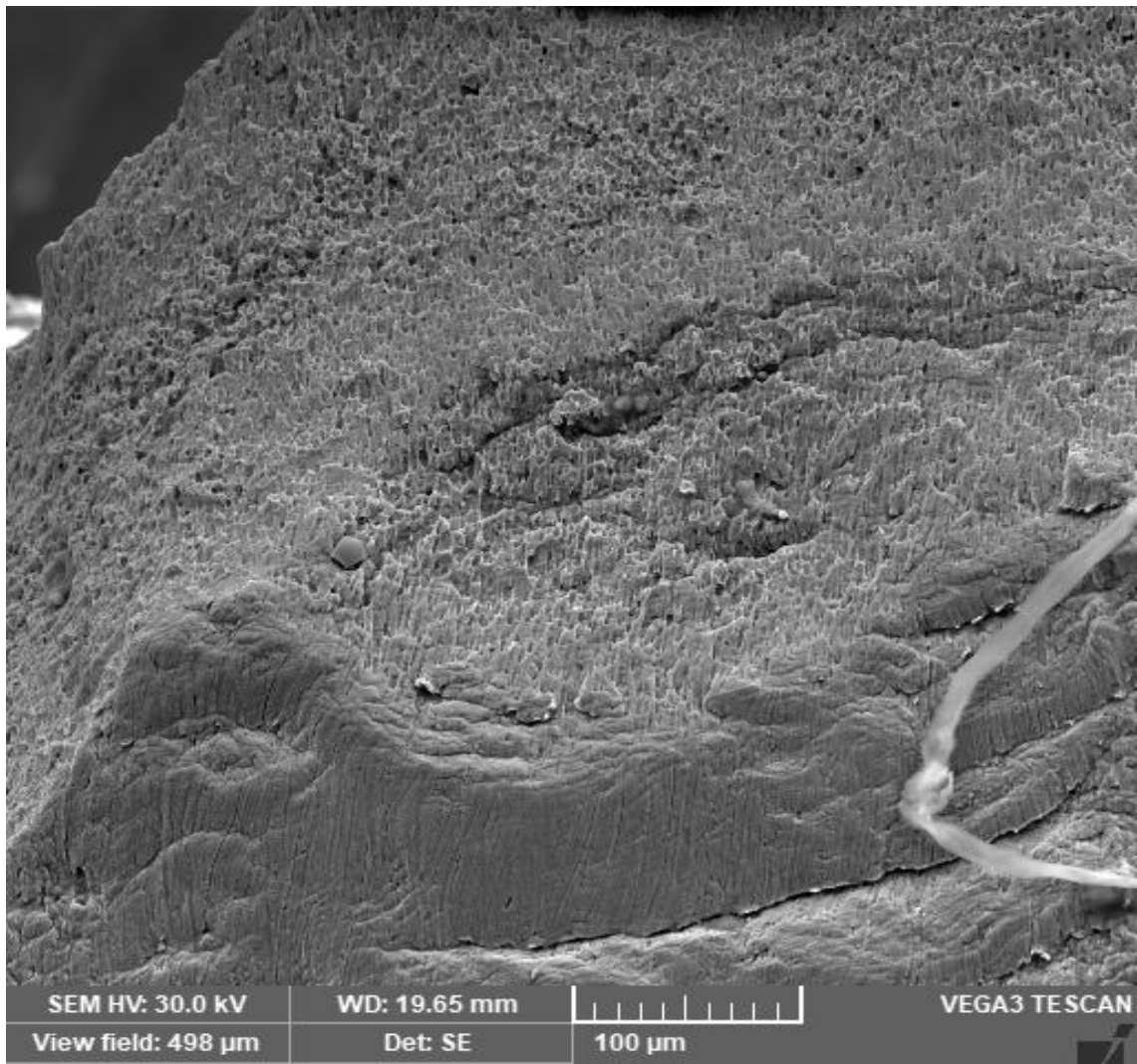
5.6. Vlačno ispitivanje epruvete zavarene TIG tehnikom s AISI 316 L žicom

Dvije su epruvete zavarivane TIG tehnologijom s dodavanjem žice odgovarajuće karakteristike 316 L. Jedna epruveta dodatno je obrađena brušenjem dok je druga epruveta ostavljena u izvornom stanju. Kod epruvete koja je obrađena brušenjem lom je nastao u području zavara no i dalje je izdržao naprezanje od 555,9 MPa što je za 9% manje od deklariranog odnosno 7% manje od referentnog.



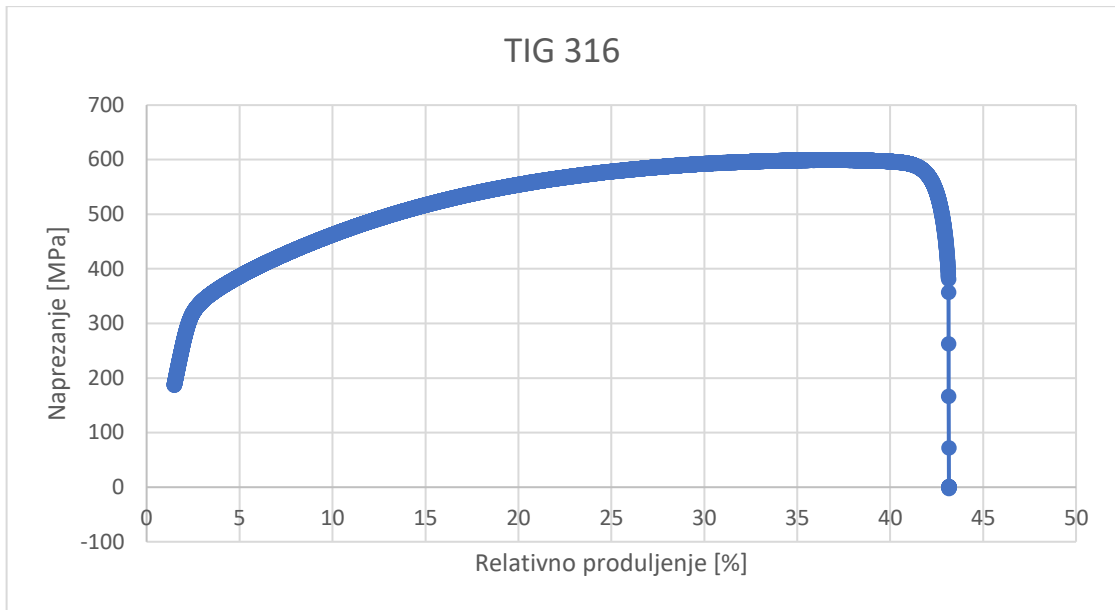
Dijagram 7. Vlačno naprezanje epruvete zavarene TIG tehnikom sa žicom AISI 316 L kao dodatnim materijalom.

Uzme li se u obzir da je presjek zavarenog područja istovjetan presjeku osnovnog uzorka može se zaključiti da je čvrstoća zadovoljavajuća. Na slici 18. vidi se površina zavara u području loma. Tamna polja na slici predstavljaju delta ferite dok su šiljaste površine prikazi austenitne strukture čije su međusobne veze dovele do istežanja površine i deformacije oblika izvornih austenitnih struktura nakon pucanja međusobnih veza u materijalu.



Slika 18. Mikroskopski snimak područja loma epruvete zavarene TIG tehnikom i dodatnim materijalom AISI 316 L

Epruveta koja nije obrađena brušenjem izdržala je naprezanje od 599,5 MPa što je veće naprezanje nego kod referentne epruvete i drugo po redu od svih testiranih. Epruveta se prilikom vlačnog testa ukupno produljila za 32 mm prije loma.



Dijagram 8. Vlačno naprezanje epruvete zavarene TIG tehnikom s AISI 316 L žicom kao dodatnim materijalom

6. IZLAGANJE UZORAKA AGRESIVNOJ ATMOSFERI KISELINA

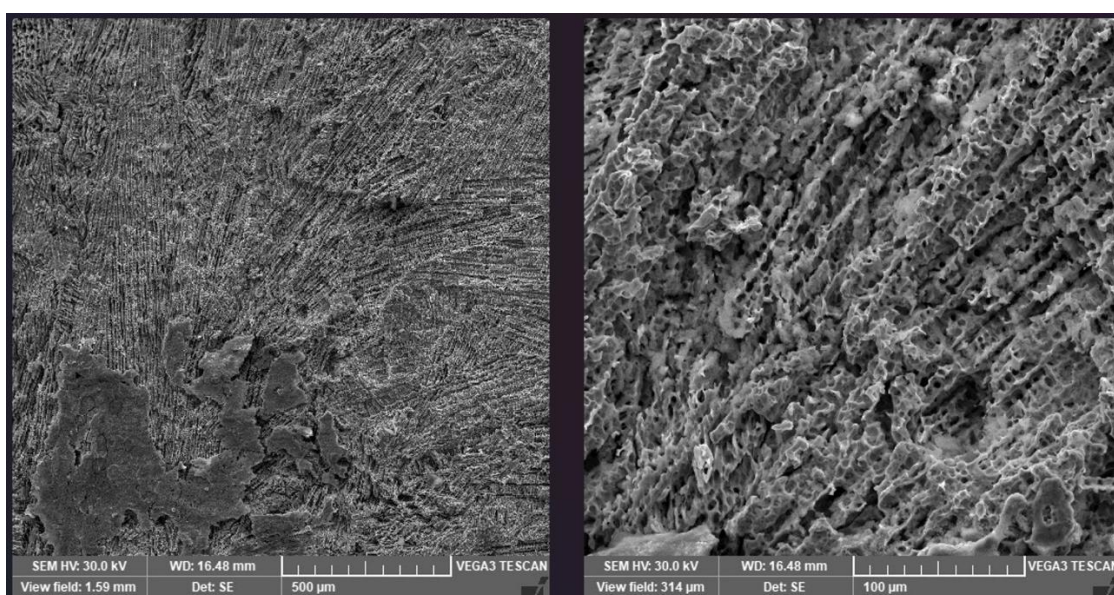
Nakon što su podvrgnuti vlačnom ispitivanju epruvete su ostavljene uronjene u 3 različite kiseline na period od 5 dana. Odabrane su kiseline s kojima se materijal može naći u doticaju na brodu, a to su fosforna kiselina (H_3PO_4) koncentracije 85%, sumporna kiselina (H_2SO_4) nepoznate koncentracije, te klorovodična kiselina (HCl) koncentracije 35%.

Klorovodičnoj kiselini su bila izlagana 3 uzorka i to referentni, uzorak zavaren MIG tehnikom te uzorak zavaren TIG tehnikom s dodatnim materijalom AISI 304. Potrebno je napomenuti kako zavari nisu bili pasivizirani pastom, te je kod ovih uzoraka već na prvi vizualni pregled bilo očito djelovanje kiseline. Bez oksidnog filma u zoni zavara i zoni utjecaja topline postojanost na koroziju materijala bitno je ugrožena.



Slika 19. Izgled uzoraka neposredno nakon vađenja iz kiseline

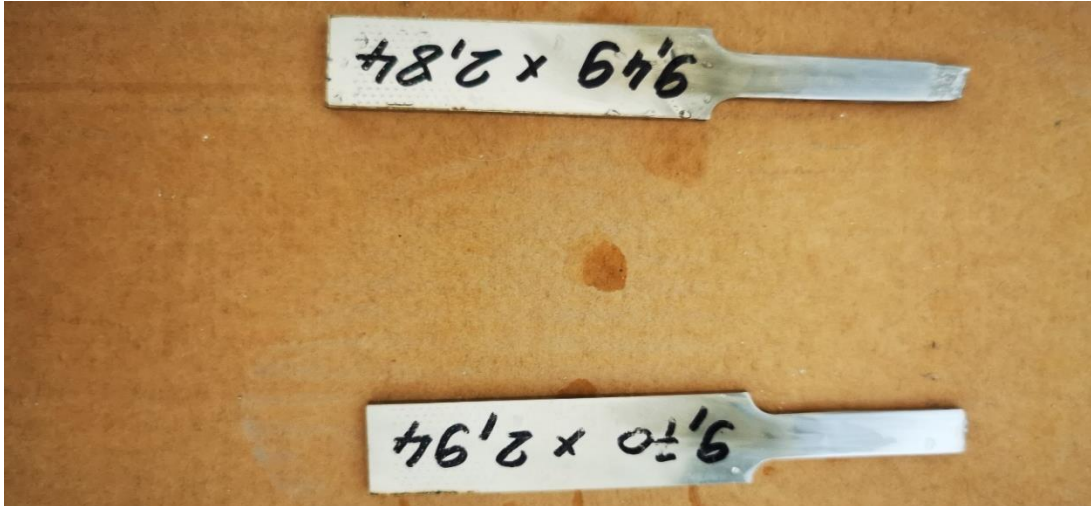
Na slici 19 vidljivo je stanje uzoraka neposredno nakon vađenja iz kiseline te prije ispiranja vodom. Vizualnim pregledom može se utvrditi da je zona zavara i oko zavara nagrižena kiselinskom korozijom. Osim korozije, koja je i bojom tamnija, prisutna je promjena boje te kapljice duž cijelog uzorka. Kiselina je uklonila okside s površine duž gotovo cijelog uzorka te bi vjerojatno prilikom izrazito dugotrajnog izlaganja materijala kiselini došlo do nekog vida korozije površine uzorka. Kako je materijal AISI 304 manje otpornosti na koroziju općenito te osjetljiviji na kiseline, mikroskopski snimak na slici 20 ukazuje na pojavu rupičaste korozije na samom zavaru.



Slika 20. Mikroskopski snimak površine zavara TIG tehnikom sa žicom 304 nakon tretiranja kiselinom

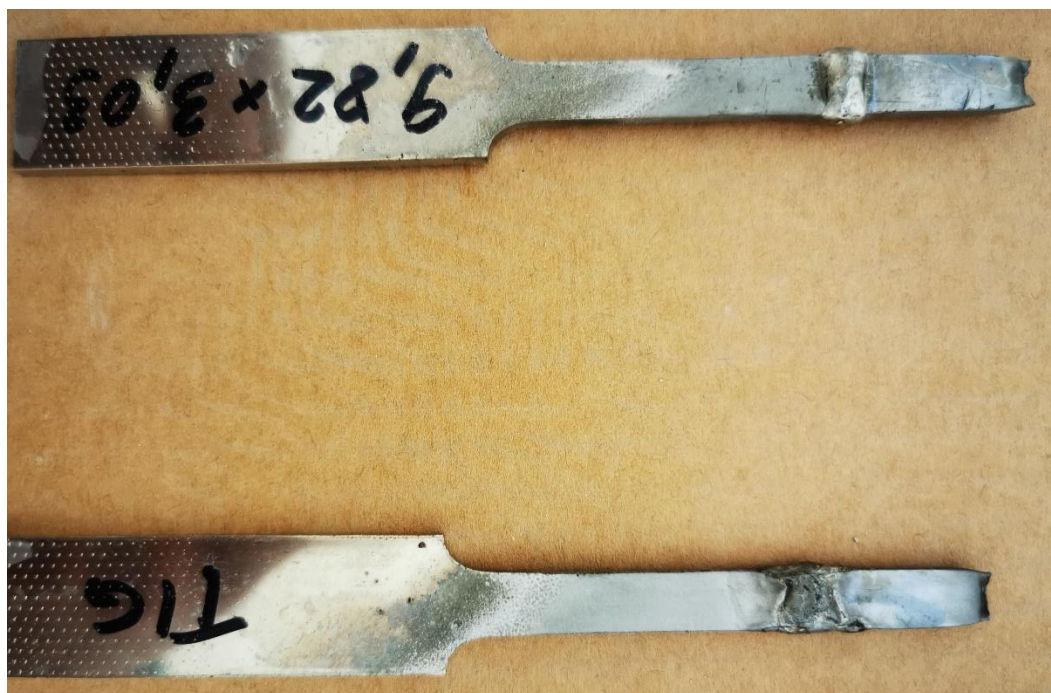
Fosfornom kiselinom tretiran je uzorak zavaren TIG postupkom sa žicom AISI 316 L kao dodatnim materijalom te obrađen brušenjem isto kao i uzorak zavaren REL tehnikom koji je također obrađen brušenjem. Oba uzorka pasivizirana su pastom i već prilikom vađenja uzoraka iz kiselinske kupke vidljivo je da nema jasnih vizualnih znakova nagrizanja. Kako je vidljivo na uzorku sa slike 21 jedini znakovi nagrizanja su na dijelu iznad onog koji je bio uronjen u kiselinu i to samo u obliku promjene boje. Prilikom ispiranja uzoraka vodom isprali su se i navedene zone obojenosti uzoraka. Kako je lom na ovom uzorku u zoni zavara prilikom snimanja mikroskopske snimke nije uočena promjena površine materijala koja bi ukazivala na koroziju. Isto tako, uslijed djelovanja

kiseline nije došlo do promjene boje i prozirnosti kao kod klorovodične i sumporne kiseline.



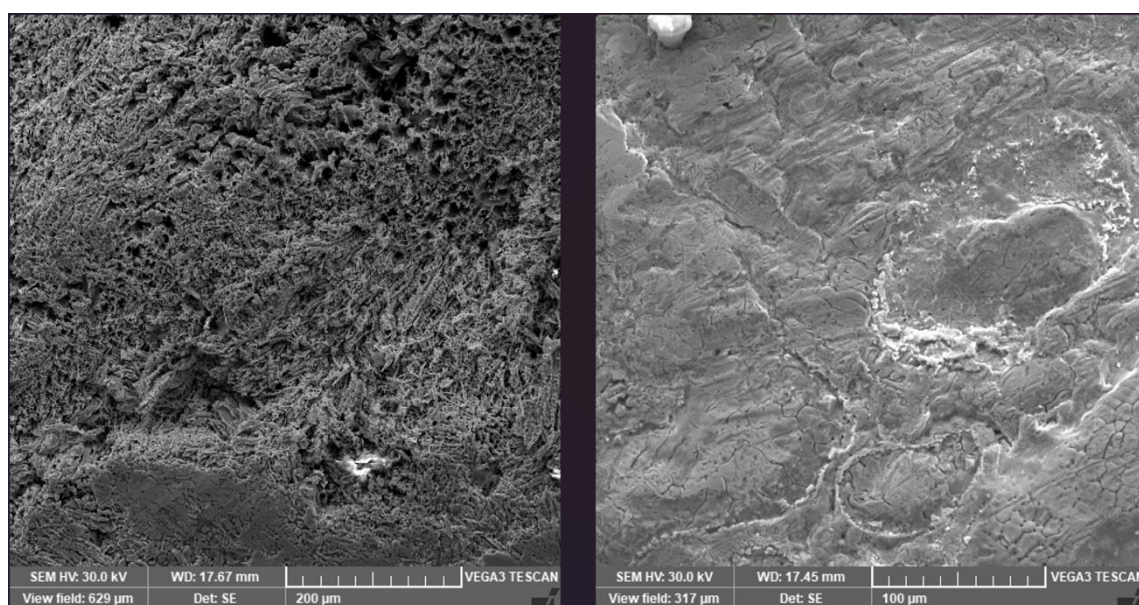
Slika 21. Uzorci uronjeni u fosforu kiselinu

U sumpornu kiselinu bili su uronjeni uzorci zavareni REL tehnikom te TIG tehnikom sa žicom AISI 316 L kao dodanim materijalom. Prilikom izranjanja uzoraka iz kiseline mogla se vidjeti promjena boje na području koje je tretirano kiselinom. Površina uzorka nije bila sjajna kao u originalu već matirana uz prisutnost zelenkastog oksida iznad uronjene zone. Iz navedenog može se zaključiti da je na površini uzorka prisutna korozija nastala zbog kisele atmosfere.



Slika 22. Uzorci tretirani sumpornom kiselinom

Kod TIG 316 L uzorka već se i golim okom moglo vidjeti da su određeni dijelovi zavara oštećeni ili nagriženi dok je kod REL tehnike zavar vizualno izgledao kao i prije urona u kiselinu. Mikroskopski snimak materijala potvrđuje da je kod TIG uzorka došlo do određenog nagrizanja dok je površina rel zavara bez znakova korozije. Na slici 23. lijevo je prikazan zavar TIG tehnikom na kojem se vide oštećenja od nagrizanja dok je desno REL uzorak na kojem nagrizanje gotovo da nije vidljivo.



Slika 23. Mikroskopski snimak uzoraka tretiranih sumpornom kiselinom

Razlog ovakvog odstupanja može biti u kvaliteti elektroda koje su korištene za REL postupak, budući da su to elektrode renomiranog proizvođača materijala i opreme za zavarivanje AVESTA. Žica koja se koristila za TIG postupak je nepoznatog proizvođača iako zadovoljava sve potrebne ateste.

7. ZAKLJUČAK

Zavarivani uzorci pokazali su svojstva vrlo slična referentnoj epruveti iz čega se može zaključiti da odabirom pravilnog dodatnog materijala područje zavora odgovara gotovo svim karakteristikama ostatku epruvete. Zavori kod kojih je lom nastao u zoni utjecaja nisu bili premazani sredstvom za pasivizaciju pa je kiselinska atmosfera na njih utjecala mnogo više nego na pasivizirane uzorke. Iz toga je razvidna važnost pasivizacije zavora i područja zone, a sve kako bi mu se povratila svojstva izvornog materijala i korozijska postojanost. Nepasivizirani materijal ima korozijski afinitet gotovo kao i nehrđajući čelik manjeg sadržaja kroma zbog stvaranja kromovih karbida prilikom zavarivanja te je smanjena mogućnost stvaranja pasivnog sloja kromovog oksida na površini. Izrazito agresivne kiseline oštetile su i površinski film oksida te se nakon ispiranja uzorka isti ponovno formirao i nije dolazilo do korozijskih promjena na površini uzorka, no na mikroskopskom snimku se može primijetiti udubine na površini materijala.

Teorijski, ako se svakim tretiranjem kiselinom s uzorka uklanja mikrofilm oksida može se zaključiti da se opetovanim izlaganjem uzorka kiselini smanjuje njegova debljina te smanjuju mehaničke sposobnosti materijala. Nadalje, zavor u kojem dodatni materijal nije bio odgovarajućih svojstava materijalu ostatka uzorka, izdržao je vlačno naprezanje slično kao i ostali uzorci te je s gledišta čvrstoće postojan u slučaju da se primjenjuje u izradi konstrukcija. Iako zavor zadovoljava zahtjeve čvrstoće problem se javlja kod korozijske otpornosti koja je manja te korozija može oštetiti zavor do te mjere da čvrstoća zavora bude narušena.

Kod vlačnog ispitivanja uzoraka zone utjecaja topline su se pokazale kao područje krutosti za dva uzorka što bi kako je navedeno u opisu nehrđajućih čelika iz uvoda rada značilo da prilikom zavarivanja i podešavanja parametara uređaja treba paziti da ne dođe do prekomjernog izlaganja toplini zona uz sam zavor. Iako AISI 316 L nema pretjerani afinitet prema okrupnjivanju zrna u zoni utjecaja topline očito je da je došlo do određenih strukturnih promjena koje su dovele do povećanja krutosti materijala.

Tablica 3. Prikaz vlačnih čvrstoća i ispitnog presjeka kod ispitivanih uzoraka

Vrsta uzorka	Presjek ispitnog dijela	Maksimalno naprezanje na vlačnom testu
Ansys simulacija	30 mm ²	589,23 MPa
Referentna epruveta	30,12 mm ²	592,6 MPa
TIG zavar 316 žica brušeno	26,95 mm ²	555,9 MPa
TIG zavar 316 žica	29,785 mm ²	599,4 MPa
TIG zavar 304 žica	29,989 mm ²	590,9 MPa
MIG zavar 316 žica	30,073 mm ²	563,6 MPa
REL	29,7546 mm ²	600,5 MPa
REL brušeno	28,518 mm ²	305 MPa

Kod jednog uzorka vidljivo je da je vlačna čvrstoća manja dok su ostali uzorci u rasponu od 550-600 MPa. Razlog tomu je greška prilikom zavarivanja, odnosno korijen zavara je ostao neprovaren, dok se na uzorku prije ispitivanja vizualno nije mogla uočiti nikakva manjkavost. Dakle prilikom zavarivanja konstrukcija, naročito čeonih zavara gdje je mogućnost prodiranja do korijena relativno mala ukoliko je zračnost između zavarenih polovica minimalna, bilo bi poželjno izvršiti testiranje nekom od metoda bez razaranja. Budući da je riječ o brušenoj površini pa je ispitivanje penetrantskim metodama gotovo nemoguće te materijalu koji nije moguće ispitivati magnetski za izbor ostaje metoda ultrazvukom ili rendgenom.

Epruvetama koje su zavarene bez naknadne mehaničke obrade brušenjem za ispitni presjek su uzete dimenzije neposredno uz zavar. Kako je površina zavara nepravilna te bi bilo gotovo nemoguće izmjeriti presjek tog područja odabrana je gore navedena površina. Na epruvetama koje nisu bile obrađene brušenjem do loma je došlo na dijelovima izvan zone zavara što bi značilo da površina presjeka unutar zavara može izdržati i veća naprezanja, naravno zbog većeg poprečnog presjeka. Upravo zbog toga kod zavarivanja konstrukcija zavari se najčešće ne obrađuju tako da se mehaničkom obradom ukloni sav nadodani materijal već se na zavarima ostavlja veći presjek kao određeni faktor sigurnosti da na tom mjestu neće doći do pojave loma. Brušenje zavara vrši se najčešće na dijelovima koji nemaju konstrukcijsku svrhu već sigurnosnu svrhu poput nekakvih barijera, brodskih ograda i sl. Kod takvih dijelova zavari se bruse i poliraju

kako bi estetski izgledali ljepše te imali karakteristike boje i sjaja okolnog materijala konstrukcije. Iako je brušena epruveta zavarena TIG postupkom s dodavanjem odgovarajućeg dodatnog materijala na vlačnom testu imala vlačnu čvrstoću samo 7% manju od referentne epruvete što govori da se i kod konstrukcijskih zavara može pristupiti brušenju zavara no kako je navedeno nije preporučljivo.

Literatura:

- [1] Kožuh, S. (2010), Specijalni čelici, skripta, Sisak, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak
- [2] online izvor : https://hr.wikipedia.org/wiki/Nehr%C4%91aju%C4%87i_%C4%8Delik , (24.3.2022)
- [3] Bačić, I. (2016), Poboljšanje korozijske zaštite nehrđajućeg čelika nanostrukturnim sol-gel ZrO₂ filmovima, Doktorska disertacija, Zagreb, Sveučilište u zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet
- [4] online izvor: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/ferritic-stainless-steel> (26.3.2022)
- [5] Juraga, I., Šimunović, V., Stojanović, I. (2007). Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje. 4. seminar DTZI „Čelici otporni na koroziju“, Pula
- [6] online izvor: <https://www.zavarivanje.info/cd/2689/osnovni-postupci-zavarivanja> (7.5.2022)
- [7] online izvor: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje> (7.5.2022)
- [8] Meden, G., Pavelić, A., Pavletić, D. (2000) Osnove zavarivanja, Rijeka, Tehnički fakultet
- [9] Lukačević Z., Zavarivanje, (1998). Slavonski Brod, Strojarski fakultet
- [10] online izvor: <https://www.varstroj.si/avtomatizacija-in-robotizacija/> (7.5.2022)
- [11] Juraga, I., Ljubić, K., Živčić, M., Garašić, I. (1998) *Pogreške u zavarenim spojevima*. Zagreb, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja
- [12] Brkić, S. (2007), Nehrđajući čelici, Zagreb, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju
- [13] Kraut, B. (2009), Strojarski priručnik, Zagreb, Tehnička knjiga
- [14] online izvor: https://hr.wikipedia.org/wiki/Vla%C4%8Dno_ispitivanje (6.9.2022)
- [15] Kuboň, Z., Stejskalová, Š., Kander, L., (2017), 'Effect of Sigma Phase on Fracture Behavior of Steels and Weld Joints of Components in Power Industry Working at Supercritical Conditions', in W. Borek, T. Tanski, Z. Brytan (eds.), *Austenitic Stainless Steels - New Aspects*, IntechOpen, London.

Popis slika

Slika 1. Prikaz spontanog stvaranja oksidnog filma na nehrđajućim čelicima [5].....	3
Slika 2. Feritna mikrostruktura nehrđajućeg čelika [4]	4
Slika 3. Prikaz austenitne mikrostrukture s većim utjecajem delta ferita (dolje lijevo).....	5
Slika 4. Prikaz mikrostrukture dupleks nehrđajućeg čelika [1]	7
Slika 5. Prikaz REL tehnike zavarivanja i shematski prikaz uređaja za zavarivanje [5]	12
Slika 6. Prikaz procesa TIG zavarivanja [5]	14
Slika 7. Prikaz MAG/MIG tehnike [5].....	15
Slika 8. Kemijski sastav materijala prema atestu	16
Slika 9. Dimenzije epruvete za vlačno testiranje.....	16
Slika 10. Rezanje epruveta laserom	17
Slika 11. Zavarene epruvete.....	18
Slika 12. Korozija zavara koji nije pasiviziran	19
Slika 13. Prikaz dijagrama naprezanja materijala na vlačnom testu.....	21
Slika 14. Grafički prikaz puknuća epruvete simuliran softverom ANSYS	22
Slika 15. Epruveta u kidalici.....	23
Slika 16. Mikroskopski prikaz MIG zavara	25
Slika 17. Mikroskopski snimak rubnog područja REL zavara epruvete	27
Slika 18. Mikroskopski snimak područja loma epruvete zavarene TIG tehnikom i dodatnim materijalom AISI 316 L	31
Slika 19. Izgled uzoraka neposredno nakon vađenja iz kiseline.....	33
Slika 20. Mikroskopski snimak površine zavara TIG tehnikom sa žicom 304 nakon tretiranja kiselinom	34
Slika 21. Uzorci uronjeni u fosforu kiselinu.....	35
Slika 22. Uzorci tretirani sumpornom kiselinom	36
Slika 23. Mikroskopski snimak uzoraka tretiranih sumpornom kiselinom	36

Popis dijagrama

Dijagram 1. Naprezanje simulirano u softveru ANSYS	22
Dijagram 2. Dijagram naprezanja referentne epruvete	24
Dijagram 3. Dijagram naprezanja za uzorak zavaren MIG tehnikom 316 punom žicom	26
Dijagram 4. Vlačno naprezanje epruvete zavarene REL postupkom	27
Dijagram 5. Vlačno naprezanje REL zavarene epruvete obrađene brušenjem	28
Dijagram 6. Vlačno naprezanje epruvete zavarene TIG postupkom s AISI 304 žicom	29
Dijagram 7. Vlačno naprezanje epruvete zavarene TIG tehnikom sa žicom AISI 316 L kao dodatnim materijalom.	30
Dijagram 8. Vlačno naprezanje epruvete zavarene TIG tehnikom s AISI 316 L žicom kao dodatnim materijalom	32

Popis tablica

Tablica 1. Odnos masenih udjela elemenata u 304 i 316 nehrđajućim čelicima [3].....	9
Tablica 2. Dimenzije uzoraka.....	19
Tablica 3. Prikaz vlačnih čvrstoća i ispitnog presjeka kod ispitivanih uzoraka	39

Popis kratica

Kratica	Značenje	Značenje na Hrvatskom jeziku
AISI	American Iron and Steel Institute standard	Američki institut za željezo i čelik
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje	
MIG	Metal inert gas zavarivanje	Zavarivanje taljivom elektrodom u atmosferi inertnog plina
MAG	Metal active gas zavarivanje	Zavarivanje taljivom elektrodom u atmosferi zaštitnog plina
TIG	Tungsten inert gas zavarivanje	Zavarivanje netaljivom elektrodom u atmosferi zaštitnog plina
FEM	Finite element method	Metoda konačnih elemenata
SEM	Scanning electron microscope	Pretražni elektronski mikroskop
ZUT	Zona utjecaja topline	