

Primjena TIG postupka zavarivanja za tvrdo navarivanje

Ivančić, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:660918>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-18**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Ivančić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Student:

Marko Ivančić

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru dr.sc Zoranu Kožuhu, asistentima mag.ing.mech. Ivanu Juriću i mag. ing nav. arch. Mislavu Štefoku, na savjetima i vođenju kroz rad te tehničkom osoblju Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za zaštitu materijala i Laboratorija za toplinsku obradu.

Također se zahvaljujem gđi. Aniti Krajačić iz tvrtke Toner d.o.o. na ustupljenom dodatnom materijalu za provedbu eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, prijateljima, kolegama svima ostalima na podršci tijekom studiranja.

Marko Ivančić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/21-6/1
Ur. broj:	15-1703-21

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARKO IVANČIĆ** Mat. br.: 0035202153

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena TIG postupka zavarivanja za tvrdo navarivanje**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of TIG welding for hardfacing process**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu diplomskog rada potrebno je opisati postupak tvrdog navarivanja te proučiti načine i vrste izvedbe tvrdog navarivanja kao i prednosti i nedostatke postupka. Također, potrebno je opisati specifičnosti tehnologije i opreme koje se koriste za tvrdo navarivanje. Usporediti i opisati dodatne materijale koji se koriste za tvrdo navarivanje s posebnim naglaskom na materijale koji se koriste za navarivanje na zube tračnih pila.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je provesti postupak tvrdog navarivanja TIG postupkom zavarivanja s različitim parametrima zavarivanja. Na izrađenim uzorcima provesti odgovarajuća nerazorna i razorna ispitivanja s naglaskom na analizu makrostrukture navara te utvrditi utjecaj odabranih parametara zavarivanja na dobivene rezultate. Konačno ocijeniti prikladnost TIG postupka za tvrdo navarivanje.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. TVRDO NAVARIVANJE	2
2.1. Uvod u postupke prevlačenja i modificiranja površina	2
2.2. Toplinska prevlačenja materijala	4
2.3. REL postupak zavarivanja	6
2.4. MIG MAG postupak zavarivanja.....	9
2.5. EPP postupak zavarivanja.....	11
2.6. Lasersko navarivanje.....	14
2.7. Navarivanje elektronskim snopom.....	20
3. TIG POSTUPAK NAVARIVANJA	23
3.1. Općenito o TIG postupku	23
3.2. Strojevi i oprema za TIG	24
3.3. Parametri TIG zavarivanja	25
3.4. Prednosti i nedostaci postupka	26
3.5. Specifičnosti tvrdog TIG navarivanja	26
3.6. Napredne tehnike TIG postupka	30
4. PRIMJENA TVRDOG NAVARIVANJA U PROIZVODNJI TRAČNIH PILA.....	32
4.1. Osnove obrade drveta rezanjem	32
4.2. Proizvodnja stelitiranih tračnih pila	34
5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	37
5.1. Uvod u eksperiment	37
5.2. Materijali	38
5.2.1. Osnovni materijal	38
5.2.1. Dodatni materijal	39

5.3. Priprema uzoraka	40
5.4. Oprema za zavarivanje	43
5.5. Provedba zavarivanja	44
5.6. Toplinska obrada.....	45
5.7. Izrada makroizbrusaka	44
5.8. Provedba korozijskog ispitivanja	45
6. ANALIZA REZULTATA	48
6.1. Rezultati NDT vizualne kontrole	48
6.2. Rezultati NDT ispitivanja penetrantima	51
6.3. Analiza kemijskog sastava XRF metodom	54
6.4. Analiza makroizbrusaka.....	55
6.5. Rezultati korozijskog ispitivanja.....	61
6.6. Rezultati mjerenja tvrdoće po Vickersu	63
7. ZAKLJUČAK.....	78
LITERATURA.....	79
PRILOZI.....	81

POPIS SLIKA

Slika 1. Postupci prevlačenja površina [1]	3
Slika 2. Prirubnice nakon postupka fosfatiranja [3]	4
Slika 3. Strojni dijelovi prevučeni PACVD postupkom [5]	5
Slika 4. Shematski prikaz REL postupka [6]	7
Slika 5. Utjecaj jakosti struje na oblik navara [6]	9
Slika 6. Shematski prikaz MIG MAG postupka [6]	10
Slika 7. Shematski prikaz EPP postupka s trakom [2]	11
Slika 8. Lasersko navarivanje antikorozivnog stelita [8]	12
Slika 9. Princip navarivanja snopom elektrona [9]	13
Slika 10. Navarivanje nakovnja tvrdim metalom [10]	14
Slika 11. Temperaturna postojanost materijala za izradu alata [11]	16
Slika 12. Stelitirana tračna pila za drvo [12]	17
Slika 13. Ventili motora nakon navarivanja stelitom i brušenja [13]	18
Slika 14. Mikrostruktura stelita 12 s povećanjem 500x [14]	21
Slika 15. Shematski prikaz TIG postupka lijevo i TIG zavarivanje u provedbi [2],	23
Slika 16. Standardna oprema za TIG postupak [6]	24
Slika 17. Utjecaj vrste plina na struju i napon kod TIG postupka [16]	26
Slika 18. Usporedba postotaka miješanja osnovnog i dodatnog materijala [6]	28
Slika 19. Primjeri ispravne B i pogrešne A tehnike rada kod navarivanja [6]	29
Slika 20. TIP TIG zavarivanje [18]	30
Slika 21. Tračna pila trupčara – pilana [11]	32
Slika 22. Osnovni oblici nazubljenja tračnih pila [11]	33
Slika 23. Krivulja trošenja oštrice [11]	34
Slika 24. Automatsko stelitiranje tračnih pila [12]	35
Slika 25. Egalizacija boka zuba tlačnim pločama lijevo, brusnim pločama desno [11]	36
Slika 26. Ploče dodatnog materijala prije rezanja	38
Slika 27. Dodatni materijal Stelit 12	39
Slika 28. Uzorci nakon rezanja i označavanja	40
Slika 29. Izvor struje Fronius MagicWave 230i	41
Slika 30. Režim toplinske obrade	43

Slika 31. Komorna peć za toplinsku obradu	44
Slika 32. Rezanje uzoraka na tračnoj pili	45
Slika 33. Čišćenje uzoraka u medicinskom alkoholu.....	45
Slika 34. Postupak izolacije osnovnog materijala [23]	46
Slika 35. Izolirani uzorci stelita.....	47
Slika 36. Korozijsko ispitivanje na rupičastu koroziju	47
Slika 37. Uređaj za analizu kemijskog sastava Innov - X Systems.....	54
Slika 38. Mjesto mjerenja kemijskog sastava	54
Slika 39. Uzorak C1 nakon korozije	61
Slika 40. C1TO uzorak nakon korozije	62
Slika 41. C2 uzorak nakon korozije	62
Slika 42. C2TO uzorak nakon korozije	63
Slika 43. Skica penetratora i otiska kod Vickers metode [25]	64
Slika 44. Uređaj za mjerenje tvrdoće po Vickersu.....	64
Slika 45. Mjesta mjerenja tvrdoće.....	65
Slika 46. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka A1	66
Slika 47. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka A2.....	67
Slika 48. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka A3.....	68
Slika 49. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka A4.....	69
Slika 50. Grafički prikaz kretanja tvrdoće za uzorak B1	70
Slika 51. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka B2	71
Slika 52. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka B3	72
Slika 53. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka B4.....	73
Slika 54. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka D1.....	74
Slika 55. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka D2.....	75
Slika 56. Grafički prikaz tvrdoće stelita po uzorcima.....	76
Slika 57. Usporedba tvrdoće uzorka A3 prije i nakon toplinske obrade.....	76
Slika 58. Usporedba tvrdoće uzorka B3 prije i nakon toplinske obrade	77

POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled elektroda za tvrdo navarivanje [7]	8
Tablica 2. Podjela legura stelita [14].....	20
Tablica 3. Mehanička svojstva stelita 12 [14].....	22
Tablica 4. Približne vrijednosti parametara zavarivanja [6]	25
Tablica 5. Zaštitni plinovi za TIG zavarivanje [17]	26
Tablica 6. Plan ispitivanja	37
Tablica 7. Kemijski sastav osnovnog materijala [21]	38
Tablica 8. Mehanička svojstva osnovnog materijala [12].....	39
Tablica 9. Specifikacija izvora struje Fronius MagicWave 230i [22].....	41
Tablica 10. Parametri navarivanja uzoraka	42
Tablica 11. Vizualna kontrola uzoraka	48
Tablica 12. Rezultati ispitivanja penetrantima	51
Tablica 13. Kemijski sastav navara stelita	55
Tablica 14. Makrostruktura uzoraka	55
Tablica 15. Vrijednosti tvrdoće uzorka A1	65
Tablica 16. Vrijednosti tvrdoće uzorka A2	66
Tablica 17. Vrijednost tvrdoće uzorka A3	67
Tablica 18. Vrijednost tvrdoće uzorka A4	68
Tablica 19. Vrijednost tvrdoće uzorka B1	69
Tablica 20. Vrijednost tvrdoće uzorka B2	70
Tablica 21. Vrijednost tvrdoće uzorka B3	71
Tablica 22. Vrijednost tvrdoće uzorka B4	72
Tablica 23. Vrijednost tvrdoće uzorka D1	73
Tablica 24. Vrijednosti tvrdoće uzorka D2	74
Tablica 25. Vrijednosti tvrdoće navara	75

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
<i>A</i>	-	udio metala navara
<i>B</i>	-	udio ZUT-a
<i>d</i> ₁	mm	Dijagonala 1
<i>d</i> ₂	mm	Dijagonala 2
<i>E</i>	GPa	Modul elastičnosti
<i>E</i> _s	lx	Rasvjetljenost
<i>F</i>	N	Sila
<i>I</i>	A	Struja
<i>Q</i>	kJ/mm	Unesena toplina
<i>Q</i> _{EL}	kJ/min	Toplina električnog luka
<i>Q</i> _{DM}	kJ/min	Toplina dodatnog materijala
<i>R</i> _{p 0,2}	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
<i>R</i> _m	MPa	Vlačna čvrstoća
<i>t</i>	s	Vrijeme
<i>U</i>	V	Napon
<i>v</i> _z	cm/min	Brzina zavarivanja
<i>Φ</i>	mm	promjer dodatnog materijala
<i>η</i>	-	Stupanj iskoristivosti električnog luka

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AC	<i>Alternating Current</i> – izmjenična struja
Ar	Argon – zaštitni plin
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i> – kemijsko prevlačenje u parnoj fazi
DC	<i>Direct Current</i> – istosmjerna struja
DLC	<i>Diamond Like Carbon</i> – dijamantu slična prevlaka
DIN	<i>Deutscher Institut für Normung</i> – njemački standard
HB	<i>Hardness Brinell</i> – tvrdoća po Brinellu
He	Helij – zaštitni plin
OM	Osnovni metal
PACVD	<i>Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition</i> – plazmom potpomognut CVD postupak
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i> – fizikalno prevlačenje u parnoj fazi
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i> – zavarivanje pod praškom
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> – zavarivanje u zaštiti plina
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> – elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom
WPS	<i>Welding Specification Procedure</i> – Specifikacija postupka zavarivanja
VF	Visoka Frekvencija
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada je ispitati mogućnost tvrdog navarivanja TIG postupkom s naglaskom na primjenu u proizvodnji tračnih pila. Opisane su osnove TIG postupka zavarivanja u kontekstu navarivanja te je dan pregled postupaka tvrdog navarivanja s obzirom na izbor dodatnih materijala te specifičnosti određenih proizvoda. U eksperimentalnom dijelu rada postupkom tvrdog navarivanja navarena je tvrda legura stelit 12 (eng. *Stellite*) na konstrukcijski čelik S235 JR u cilju određivanja optimalnih parametara navarivanja. U svrhu provjere korozivskih osobina ovog materijala, provedeno je ispitivanje na rupičastu koroziju.

Ključne riječi:

Tvrdo navarivanje, TIG postupak, Stelit, Otpornost na trošenje

SUMMARY

The aim of this thesis is to examine the possibility of hard welding by TIG process with emphasis on the application in the production of band saws. The basics of the TIG welding process in the context of welding are described, and an overview of the hard welding process is given with regard to the choice of additional materials and the specifics of certain products. In the experimental part of the work, a hard alloy Stellite was welded to structural steel S235 JR in order to determine the optimal welding parameters. In order to check the corrosion properties of this material, a crevice corrosion test was performed.

Key words:

TIG welding, hardfacing, cladding, wear resistance

1. UVOD

Metalni dijelovi u industriji često gube svoja uporabna svojstva, ali ne nužno zbog loma, već zbog pojave trošenja materijala odnosno gubitka svojih dimenzija. Gubitak materijala može biti uzrokovan mehanizmima tribološkog trošenja ili zbog korozijskog djelovanja atmosfere. U svakom slučaju potrebno je zamijenit istrošeni dio ili napraviti reparaturno zavarivanje. Zbog toga su razvijene razne metode i tehnike tvrdog navarivanja materijala. Osim reparature, tvrdo navarivanje se koristi i kao postupak za izradu novih proizvoda, posebice alata za obradu drveta i čelika ili oplemenjivanje površina koje će u eksploataciji biti izložene djelovanju abrazije, adhezije, umora površine ili i tribokorozije. [1] Uglavnom se navaruju materijali koji imaju veću cijenu koštanja od osnovnog materijala iako to ne mora biti uvijek slučaj.

TIG zavarivanje je postupak elektrolučnog zavarivanja u zaštiti inertnog plina pomoću netaljive elektrode, a upotrebljava se ponajprije za zavarivanje materijala malih debljina vrlo visoke kvalitete. Varijantnost postupka ovisi o puno faktora poput vrste i jakosti struje i napona, vrste zaštitnog plina, oblika vrha netaljive elektrode i brzine zavarivanja.[2]

Ovaj postupak se koristi za zavarivanje nehrđajućih čelika, obojenih metala te za postupke tvrdog navarivanja i toplinskog ravnjanja. Nedostatak postupka je sporost kod ručnog zavarivanja te mali depozit materijala. Jedinstvena primjena ovog postupka je stoga navarivanje zubaca tračnih pila tvrdim metalom.

Konvencionalni način proizvodnje uključuje izradu pile od istog materijala gdje je osnovni materijal ujedno i materijal oštrice. Imperativ današnje proizvodnje čine stelitirane tračne pile sa zubima izrađenim tvrdim navarivanjem materijala trgovačkog naziva stelit (eng. *Stellite*). Glavna prednost ovog postupka je duže trajanje oštrice i veći broj oštrenja pile do ponovne obnove u specijaliziranim tvornicama u odnosu na pile izrađene klasičnim postupkom. Stelit je legura na bazi kobalta legirana kromom, volframom i ugljikom koja sadrži složene karbide. Osim otpornosti na trošenje i visoke tvrdoće, ova legura posjeduje odličnu otpornost na visoke temperature sve do 600°C. Istraživanja raznih autora na ovu temu uglavnom se bave tribološkim i korozijskim ispitivanjima, a u kontekstu određivanja svojstava navedenog materijala koji će mu omogućiti duži vijek trajanja. Ovaj rad je stoga usmjeren na određivanje optimalnih parametara navarivanja i toplinske obrade legure stelita.

2. TVRDO NAVARIVANJE

2.1. Uvod u postupke prevlačenja i modificiranja površina

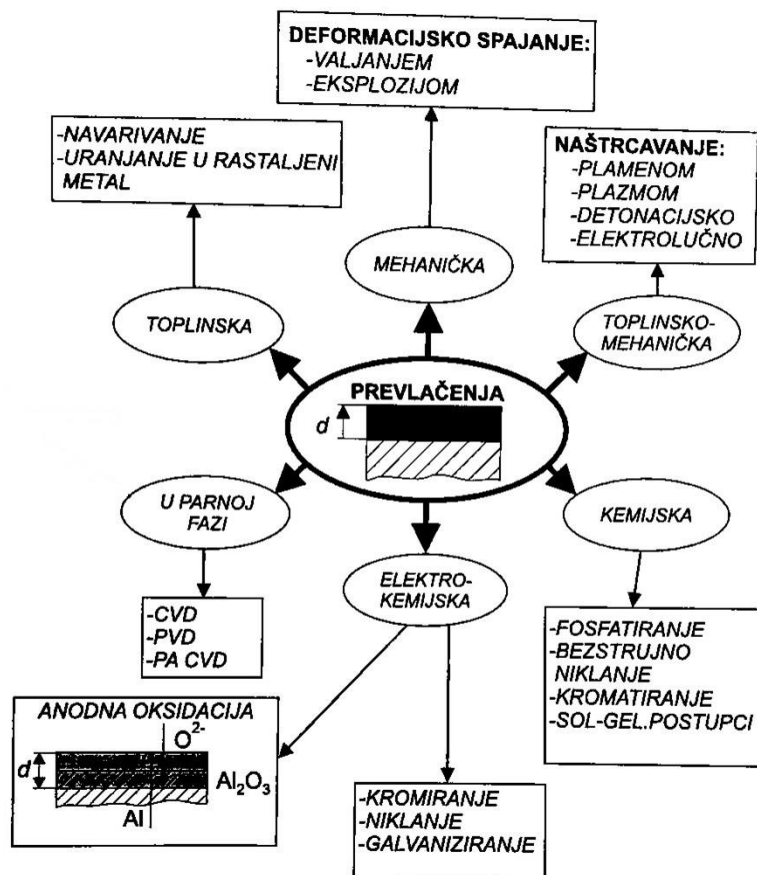
Problemi trenja i trošenja, iako na prvi pogled djeluju jednostavno, mogu biti vrlo kompleksni zbog mnogostrukih triboloških i korozijskih procesa. Trenje i trošenje se definira kao svojstvo sustava, jer na proces djeluju podjednako i materijali, konstrukcijska izvedba, vrsta i način opterećenja, način podmazivanja te drugi faktori. Iz mnogobrojnosti mogućih međudjelovanja proizlaze i različiti mehanizmi trošenja. Prilikom projektiranja novih proizvoda odnosno konstrukcija, preporuka je koristiti analizu tribosustava za izbor tribološki prikladnih materijala. Stoga slijede i mogući načini rješavanja i smanjenja trošenja:

- promjena osnovne konstrukcije,
- primjena novih materijala,
- primjena međuslojeva,
- primjena slojeva otpornih na trošenje.

Često se u praksi ne može jednostavno provesti primjena konstrukcijskog rješenja ili zamjena strojnog dijela posebno s ekonomskog gledišta. Zato se kao racionalan izbor nameće primjena različitih slojeva za zaštitu osnovnog materijala od povećanog trošenja ili primjena postupaka modificiranja površina. Slika 1. daje pregled mogućih postupaka prevlačenja za zaštitu materijala od trošenja i korozije. [1]

Prema tome, prevlačenja konstrukcijskih materijala poredana se u sljedeće kategorije:

- mehanička prevlačenja,
- toplinsko – mehanička prevlačenja,
- kemijska prevlačenja,
- elektrokemijska prevlačenja,
- prevlačenja u parnoj fazi,
- toplinska prevlačenja.



Slika 1. Postupci prevlačenja površina [1]

Mehanička prevlačenja materijala postižu se valjanjem i eksplozijom. Primjena prevlačenja eksplozijom se još naziva i zavarivanje eksplozijom, a primjenjuje se najčešće za spajanje čelika i aluminija. U skupinu toplinsko mehaničkih postupaka prevlačenja ili naštrcavanja spadaju naštrcavanja plamenom, plazmom, detonacijom i elektrolučno. Toplinski naštrcani slojevi za razliku od slojeva nanesenih drugim postupcima, razlikuju se po strukturi, mehanizmima vezanja te mogućnostima naknadne obrade. Prianjanje toplinski naštrcanih slojeva većinom je mehaničko, a čvrstoća istog može iznositi i više od 100 MPa. Ponekad se obratci predgrijavaju u svrhu povišenja čvrstoće prianjanja. [1]

Kemijskim prevlačenjem poput fosfatiranja i niklanja na površini obrađenog materijala postižu se slojevi otporni na trošenje sa dobrom zaštitom od korozije. Kod niskih udjela fosfora (manje od 3%) u prvom planu je zaštita od trošenja, dok kod visokih udjela (više od 11%) u prvom planu zaštita od korozije. Procesu kemijskih prevlačenja su uglavnom autokatalitički što znači da je proces samoodrživ. Sol – gel postupci prevlačenja baziraju se na

tri reakcije: hidrolizi, kondenzaciji alkohola i kondenzaciji vode. Ovaj postupak uključuje razvoj anorganskih mreža kroz formiranje koloidne otopine(sol) i geliranje sola da formira gel. Do geliranja sustava dolazi reakcijama hidrolize i kondenzacije uz kiselinu kao bazu.

Elektrokemijski postupci također imaju cilj povećanje otpornosti na koroziju i trošenja. Najpoznatiji postupci ove skupine su: kromiranje, niklanje i galvanizacija. Sporedna uloga ovih prevlaka je i dekorativna svrha pa se često koriste u opremanju interijera. Na slici 2. prikazana je površina prirubnica obrađenih fosfatiranjem. [1]



Slika 2. Prirubnice nakon postupka fosfatiranja [3]

Prevlačenje u parnoj fazi zauzima visoko mjesto na listi postupaka prevlačenja uz konstantno razvijanje novih postupaka. Prevlačenjem u pranoj fazi nanose se stabilni i tvrdi spojevi koji spadaju u podskupine neoksidne keramike kao što su TiC, TiN, TiCN, TiAlN, TiAlCN, B₄C, SiC, oksidne keramike Al₂O₃ i TiO₂, metaloorganskih spojeva Me:CH W97C3 te dijamantu sličnog ugljika DLC.

CVD postupci provode se na temperaturama pri 1000 °C, stoga neminovno nastaju i promjene mikrostrukture i dimenzija materijala koji se obrađuje. Prevlake su uglavnom zlatno žute boje i debljine između 2 i 10 µm. Primjena CVD postupka na alatnim čelicima postaje

problematična zbog potrebe naknadne toplinske obrade kaljenjem ispod prevlake, a nužna je i upotreba vakumskih peći. Zbog opasnosti od pojave deformacije, ovaj postupak se ne preporuča za iznimno precizne dijelove strojeva i naprava.[1]

U posljednjih desetak godina razvijen je postupak PACVD koji za prevlačenje koristi plazmu iona, a time je temperatura postupka snižena za 200 °C. Slika 3. prikazuje strojne dijelove prevučene PACVD postupkom. Ovime je proširena primjena postupka na alatne čelike za hladni rad koji ne podnose visoke temperature postupka te imaju malu otpornost prema popuštanju. [4]



Slika 3. Strojni dijelovi prevučeni PACVD postupkom [5]

PVD postupak odnosno fizikalno taloženje iz parne faze, postupak je u kojem se stvaranje slojeva provodi transportom atoma, molekula i iona u vakuumu. Čestice na izvoru provode se iz čvrste u parnu fazu fizikalnim putem. Temperatura postupka je oko 500°C pa se često koristi i za prevlačenje brzoreznih čelika. Pomoću PVD postupka postižu se vrlo tanke prevlake od gotovo svih elemenata. Za razliku od CVD postupka, ovi slojevi ne traže naknadnu toplinsku obradu, a osigurava se vrlo dobra otpornost na trošenje i smanjuje faktor trenja. [1]

2.2. Toplinska prevlačenja materijala

Kako je već prikazano u prethodnom poglavlju, postoji široki spektar razvijenih postupaka prevlačenja materijala. Korištenjem toplinskog prevlačenja površinski sloj nastaje djelovanjem toplinske energije rastaljivanjem metala koji kristalizira na površini obrađivanog dijela. U ovu skupinu ubrajaju se dva postupka, a to su postupci tvrdog navarivanja te postupci uranjanja u rastaljeni metal. Za razliku od ostalih postupaka ove skupine, ovdje je riječ o debljim slojevima (5 – 10 mm) navarenog materijala koji se mogu i ponovno obnoviti istim postupkom.

Tvrdo navarivanje može se postići sljedećim elektrolučnim postupcima zavarivanja:

- REL (eng. SMAW) postupak,
- MIG – MAG (eng. GMAW) postupci,
- TIG (eng. GTAW) postupak,
- EPP (eng. SAW) postupak,
- Praškom punjenom žicom (eng. FCAW) postupak.

Te ostalim postupcima zavarivanja:

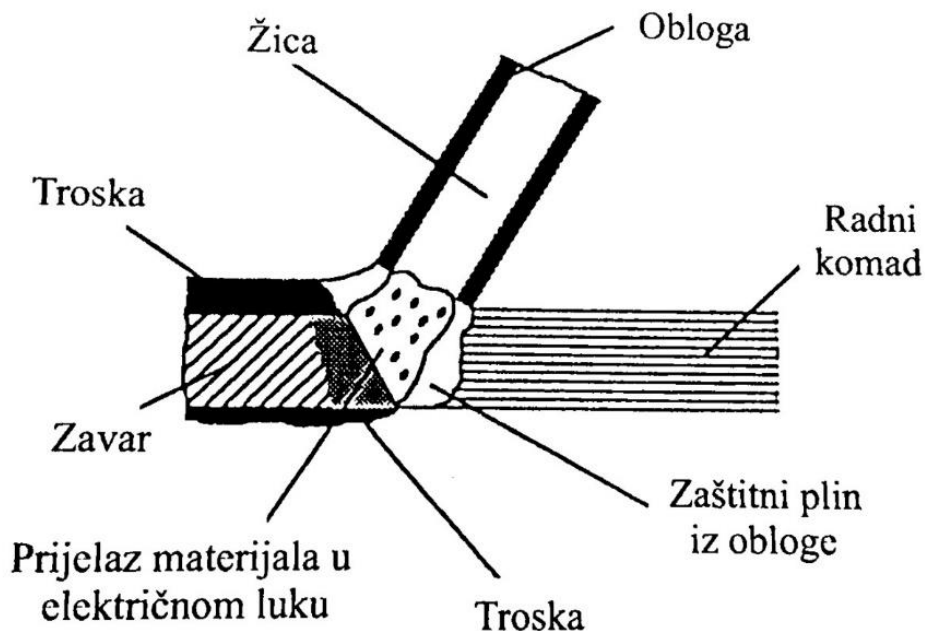
- Lasersko navarivanje,
- Plinsko navarivanje,
- Zavarivanje eksplozijom.

Toplinsko naštrcavanje je postupak kojim se dobiva oplemenjivanja površina metalnih dijelova, ali za razliku od postupaka navarivanja, ovdje ne dolazi do pojave promjene mikrostrukture osnovnog materijala niti do taljenja osnovnog materijala. Čestice metala ili nemetala isključivo prijanjaju na osnovnu podlogu i poboljšavaju svojstva bazne površine. Danas su poznati postupci naštrcavanja plinskim plamenom, plazmom i elektrolučnim postupkom. Ciljevi toplinskog naštrcavanja su gotovo identični kao i kod navarivanja, ali često puta je ovaj postupak ekonomičniji posebice kod velikih površina. [1]

2.3. REL postupak navarivanja

Ručni elektrolučni postupak zavarivanja je postupak zavarivanja taljenjem obložene elektrode. Toplinska energija dobiva se taljenjem od električnog luka u kojem se električna struja pretvara u toplinu i tali dodatni i osnovni materijal. U počecima ovog postupka, nije se koristila obložena već gola elektroda, no postupnim razvojem obloge, došlo se do današnje elektrode koja osigurava pravilnu zaštitu taline u procesu zavarivanja. Funkcija obloge je

višestruka, a treba navesti da omogućuje zavarivanje u različitim položajima, osigurava dobru kvalitetu spoja te može raditi sa svim vrstama struje (AC ili DC). Slika 4. prikazuje proces REL postupka zavarivanja s glavnim elementima električnog luka. [2]



Slika 4. Shematski prikaz REL postupka [6]

Izvor struje zavarivanja može biti istosmjerni ili izmjenični, s time da elektroda može biti spojena na „+“ ili „-“, pol izvora. Za ostvarivanje potrebne jakosti izvora, koriste se transformatori s ispravljačima ili inverteri, dok se vrlo rijetko mogu pronaći i rotacijski pretvarači i električni generatori istosmjerne struje.

Prednost ovog postupka proizlazi iz same jednostavnosti upotrebe, relativno jeftinijoj opremi te mogućnosti zavarivanja na terenu. Posebno je pogodan za gotovo sva reparaturna zavarivanja. Nedostatak postupka je slabija produktivnost uz neizostavan gubitak dijela elektrode (8-10%), a ako se pri tome u obzir uzmu i gubici štrcanjem metalnih kapi, onda iskoristivost pada na svega 60 %. U odnosu na ostale elektrolučne postupke, udio dimnih plinova i prašine, najveći je upravo kod ovog postupka. [6]

U kontekstu tvrdog navarivanja, ovaj postupak se može shvatiti kao prvi izbor u poslovima reparature strojnih dijelova. Na tržištu dodatnih materijala za zavarivanje se tako nalaze posebno namijenjene elektrode za tvrdo navarivanje. U tablici 1. prikazane su elektrode za navarivanje iz asortimana proizvođača Elektroda Zagreb.

Tablica 1. Pregled elektroda za tvrdo navarivanje [7]

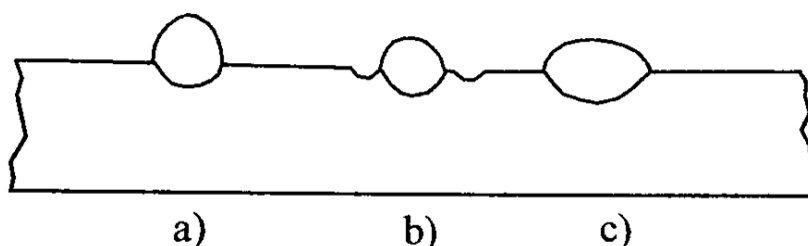
Tvornička oznaka	Norma	Opis	Tvrdoća
EZ – 300 TN	HRN EN 14700 E Fe 1	Bazično obložena elektroda za srednje tvrda navarivanja.	275 – 325 HB
EZ – 400 TN	HRN EN 14700 E Fe 1	Bazično obložena elektroda za srednje tvrda navarivanja. Otpornost na abraziju.	375-450 HB
EZ – 500 TN	HRN EN 14700 E Fe 2	Vrlo tvrd i žilav navar. Navar obradiv isključivo brušenjem.	57 – 62 HRC
EZ – ABRA 60	HRN EN 14700 E Fe 14	Rutilna visokoučinska elektroda. Iznimna otpornost na abraziju i udar	60 HRC
EZ – ABRA 65	HRN EN 14700 E Fe 16	Bazično grafitna visokoučinska elektroda. Navar otporan na abraziju, temperaturna postojanost do 700 °C.	65 HRC (600 HV)

Elektrode za tvrdo navarivanje imaju uglavnom bazičnu oblogu te sadrže znatnije količine legirajućih elemenata poput (Mn, Cr, Mo, W i drugih) koji stvaraju karbide radi povećanja tvrdoće navarenog sloja. Osim navarivanja tvrdih slojeva, često se pojavljuje potreba za navarivanjem elastičnog međusloja poput primjerice elektrode (EZ – Krom 20). Ovime se postiže bolja kvaliteta izvedbe tvrdog navarivanja. Također dobro je spomenuti kako se navarivanje može provoditi svim elektrodama, pa i onima za nehrđajuće čelike ili obojene i lake metale.

Kod izvođenje samog navarivanja, vrlo je važno imati odgovarajući nagib elektrode kako bi se talina pravilno nanosila na površinu, te proces zaštiti od djelovanja atmosfere. Ispravna brzina navarivanja ovisiti će o vrsti materijala, položaju i vrsti elektrode. Kako bi navar imao potrebnu širinu, nužno je odrediti njihanje vrha elektrode. [6]

Glavni parametar zavarivanja kod REL postupka jest jakost struje zavarivanja koja prema polaritetu može biti izmjenična i istosmjerna. Ovaj parametar ovisi uglavnom o promjeru i vrsti elektrode, dimenzijama osnovnog materijala, položaju zavarivanja i vještini zavarivača. Iz pozicije navarivanja, može se zaključiti kako se uglavnom radi o PA položaju navarivanja

stoga su potrebne niže struje u odnosu na zavarivanja u prisilnom položaju. Napon električnog luka je promjenjivog karaktera te iznosi od 20 do 40 V.



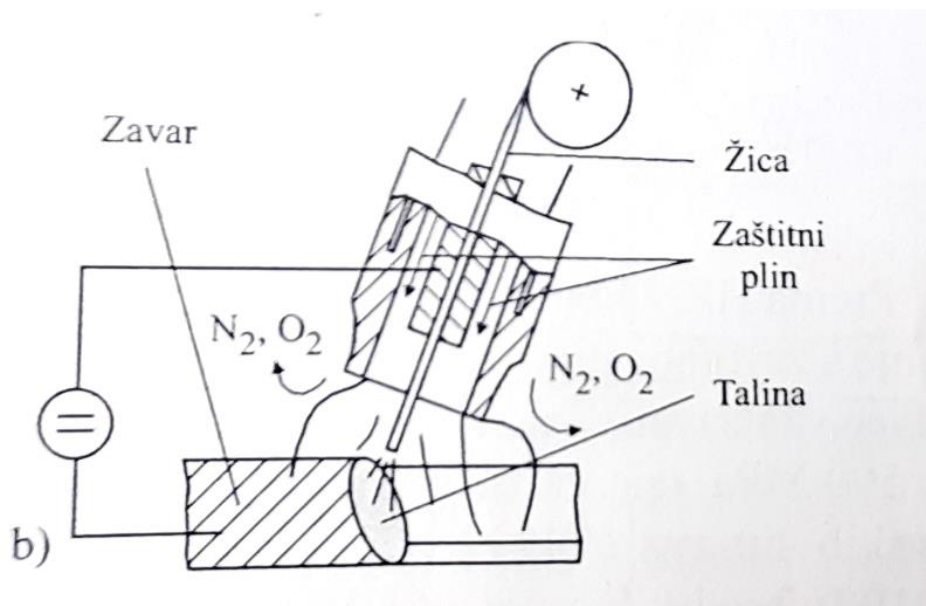
Slika 5. Utjecaj jakosti struje na oblik navara [6]

Općenito može se reći da na oblik navara utječe struja zavarivanja. Na slici 5. prikazana je ovisnost širine i visine navarenog sloja o jakosti struje zavarivanja. Navar označen slovom a) izveden je premalom strujom, onaj označen slovom b) prevelikom jakosti, dok navar c) ima ispravan odnos penetracije i nadvišenja.

Pogreške zavarenih i navarenih spojeva najčešće nastaju zbog pogreške zavarivača. Površinski izgled zavarenog sloja obično ne igra presudnu ulogu kod navarivanja, pošto se lice obrađuje postupcima strojne obrade. Česta pogreška je poroznost koja nastaje u zoni taljenja i otkriva se često prekasno obradom odvajanjem čestica, a nastaje zbog predugačkog ili prekratkog luka, vlažne obloge ili loše zaštite mjesta zavarivanja. Uključci troske su također moguća pogreška ako se ne primjenjuju pravila tehnološki ispravnog čišćenja međuslojeva. Ali isti efekt može nastati uslijed nepravilnog odnosno preširokog njihanja električnog luka. Pukotine nastaju zbog prebrzog ohlađivanja, nepravilnog redosljeda slaganja slojeva ili ukrućenja konstrukcije zbog nemogućnosti toplinske dilatacije. Naljepljivanje se rijetko događa kod REL postupka, a može se izbjeći korištenjem veće struje zavarivanja. [5]

2.4. MIG-MAG postupak navarivanja

MIG MAG postupci odnosno postupci elektrolučnog zavarivanja metalnom taljivom elektrodom, u zaštitnoj atmosferi inertnog (argon, helij - MIG) odnosno aktivnog (CO₂ plina - MAG) je postupak zavarivanja taljenjem. Zaštitni plin ima dvojaku ulogu u procesu, zaštita električnog luka i rastaljenog materijala od utjecaja plinova iz okoliša – zraka. Plin CO₂ koristi se isključivo za zavarivanje i navarivanje crnog čelika, dok se inertni plinovi i njihove mješavine koriste za zavarivanje svih ostalim metala. Slika 6. prikazuje shematski proces zavarivanja.



Slika 6. Shematski prikaz MIG/MAG postupka [6]

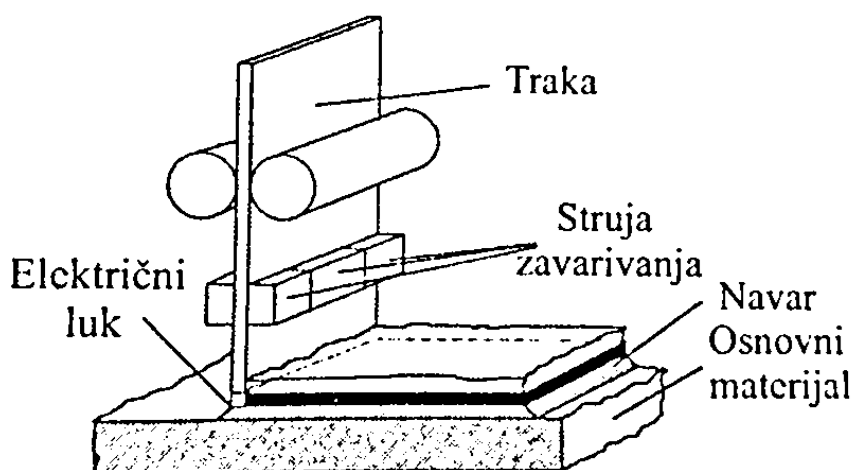
Dodatni materijali za zavarivanje uglavnom su pune žice promjera 0,6 do 1,6 mm (vrlo često 0,8 i 1,2 mm) te praškom punjene žice. Funkcija žice je električna, metalurška te antikorozijska. Stoga se ista često izvodi kao pobakrena ili poniklana zbog bolje električne vodljivosti i zaštite od korozije. Sa aspekta navarivanja, MIG postupak koristi se redovito u reparaturama, dok je u postupcima tvrdog navarivanja uglavnom primjenjiva praškom punjena žica. Radovi se izvode u radionicama ili općenito zatvorenim objektima kako bi se osigurala pravilna zaštita taline.

Parametri zavarivanja kod ovog postupka su sljedeći: jakost struje zavarivanja, napon električnog luka, protok zaštitnog plina, brzina zavarivanja, duljina slobodnog kraja žice, tehnika zavarivanja, induktivitet i drugi. Kod navarivanja čeličnih materijala u ovom postupku, koristiti se desna tehnika, a zbog položenog PA položaja koji se standardno primjenjuje, moguće je koristiti i veće unose topline kako bi se dobio veći stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala. Efikasnost se očitava u brzini rada, posebice u odnosu na TIG postupak navarivanja. [2]

2.5. Ostali postupci tvrdog navarivanja

2.5.1 EPP postupak navarivanja

Postupak EPP (eng. SAW) zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja pod praškom. Tijekom zavarivanja, dodatni materijal u obliku žice ili trake, zaštićen je odgovarajućim praškom za zaštitu procesa. Ovaj postupak se najčešće koristi za spajanje debelostijenih konstrukcija, limova u brodogradnji ili gradnji velikih spremnika i slično. U kontekstu zavarljivih materijala, postupak je pronašao primjenu isključivo za niskolegirane i visokolegirane čelike. Ekonomičnost se postiže kod zavarivanja dugačkih spojeva i do nekoliko metara, a u jednom prolazu moguće je bez poteškoća zavariti limove debljine 10 mm. Prašak kod EPP postupka može biti bazični ili rutilni, slično kao i kod obloge obložene elektrode za REL zavarivanja, no ipak razlike postoje. Funkcija praška je osim same zaštite procesa, da osigura stabilnost električnog luka, nadomjesti gubitke legiranih elemenata iz metala zavara te spriječi naglo hlađenje spoja. [2]



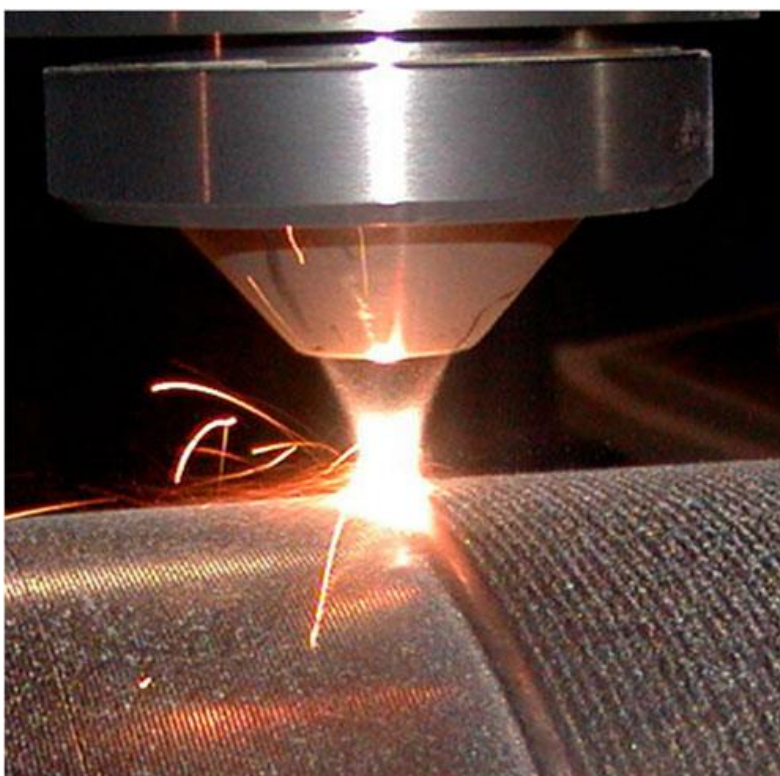
Slika 7. Shematski prikaz EPP postupka s trakom [2]

U smislu navarivanja materijala, posebno se koristi varijanta EPP navarivanja trakama prikazana shematski na slici 7. Postupak se koristi za navarivanje i platiniranje velikih spremnika materijalom otpornim na koroziju. Postoji određena razlika između navarivanja trakom i žicom u samom električnom luku. Električni luk uspostavlja se na rubnim dijelovima trake ili po određenim mjestima, a ne ravnomjerno po cijeloj širini iste. U zavisnosti o upotrijebljenom prašku, osnovnom materijalu i parametrima zavarivanja električni luk oscilira. Ovaj postupak se koristi strogo u vodoravno odnosno iznimno i vodoravno - okomitom položaju, a ostali položaji nisu primjenjivi zbog curenja taline i praška. [2]

2.5.2 Lasersko navarivanje

Laser je koncentrirana zraka monokromatske svjetlosti, koja nastaje tijekom simuliranoga i kontroliranog prijelaza elektrona – molekule iz višeg u niže energetske stanje. Fokusirana zraka ima nešto manju gustoću zračenja (oko 10^6 W/cm²). Danas su komercijalno dostupne dvije vrste lasera: plinski CO₂ laser i kruti NdYag laser. Za zavarivanje se pretežito koristi CO₂ laser (snage do 25 kW, valne duljine 1,06 μm) i kruti Nd-YAG laser (snage do 3kW, valne duljine 1,06 μm). Moguća su dva načina zavarivanja laserom: zavarivanje taljenjem i zavarivanje protljiivanjem, a sami proces je moguć i bez dodatnog materijala.

Zbog navedenih značajki, ovaj postupak uz razvoj automatizacije, postao je jedan od neizostavnih za navarivanje i oplemenjivanje površina (eng. *Laser Cladding*). Slika 8. prikazuje mehanizirani postupak laserskog navarivanja stelita na površinu klipnjače hidrauličnog cilindra. [6]



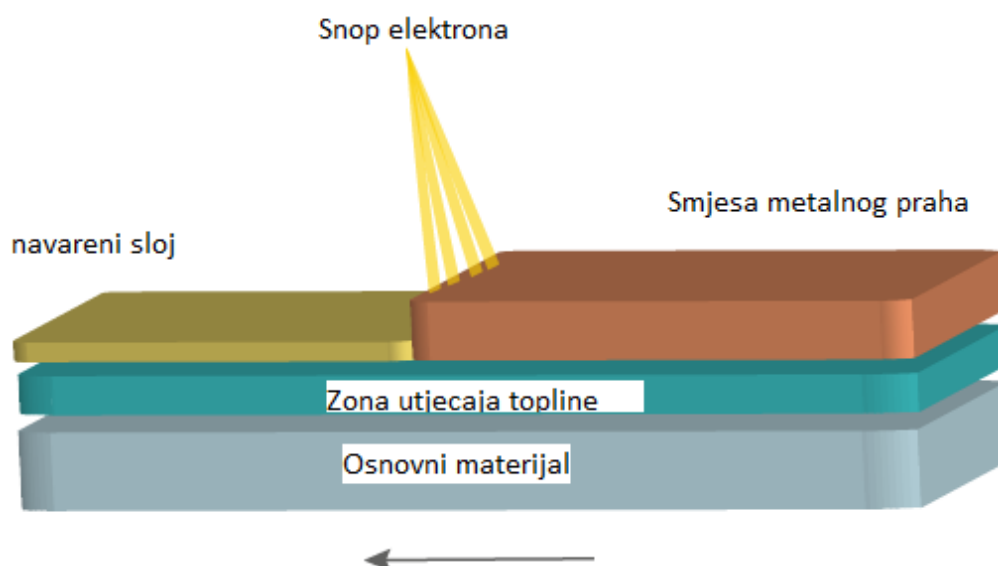
Slika 8. Lasersko navarivanje antikorozivnog stelita [8]

Kod ovog postupka, laserska zraka koristi se primarno za zagrijavanje obratka, dok se mlaz inertnog plina zajedno s metalnim prahom koji se navaruje, nanosi na fokusirano područje zrake. Ovim načinom rada, moguće je ostvariti depozit od čak 12 kg materijala po minuti. [8]

2.5.3 Navarivanje elektronskim snopom

Zavarivanje elektronskim snopom odnosno mlazom elektrona provodi se toplinom nastalom nakon pretvorbe kinetičke energije mlaza elektrona ubrzanih pri udaru u metal koji se zavaruje. Vrlo često se ne koristi dodatni materijal kod zavarivanja jer talina za oblikovanje spoja nastaje taljenjem osnovnog materijala. Neophodno je osigurati vakum (oko 10^{-4} mbar) za provođenje postupka. U takvom prostoru, elektronski mlaz se fokusira i ubrzava zbog velike razlike između anode i katode. Cijeli se proces vodi računalom, a u praksi se postupak provodi za zavarivanje komada debljine i do 750 mm. Uređaji koji se koriste za zavarivanje elektronskim snopom koriste snage do 100 kW, uz korištenje napona istosmjerne struje 15 – 200 kV i jakosti struje do nekoliko mA. [2]

Navarivanje elektronskim snopom (eng. *Electron Beam Cladding*) visoko je produktivan postupak navarivanja velikih površina, prema sličnom principu kao i navarivanje laserom.



Slika 9. Princip navarivanja snopom elektrona [9]

U fokusu snopa elektrona, zbog visoke frekvencije dolazi do taljenja osnovnog materijala i metalnog praha te se stvara navareni sloj. Slika 9. prikazuje shematski princip navarivanja elektronskim snopom. Za optimizaciju parametara navarivanja, važno je precizno kontrolirati snagu i promjer snopa. Time se kontrolira sama debljina navarenog sloja, otpornost na koroziju i tvrdoća. [2]

2.6. Materijali i primjena tvrdog navarivanja

2.6.1. Materijali za navarivanje alatnih čelika

Navarivanje se često koristi kod alatnih čelika koji se dijele na čelike za rad u hladnom stanju, čelici za rad u toplom stanju te brzorezne čelike. Alatni čelici za rad na hladno, kao što su noževi za tokarenje i blanjanje, svrdla, glodala, probijači, nareznice i ureznice, štance, alati za savijanje itd. sadrže u prosjeku 1,3% Cr, do 0,8% Mo, do 3% Ni, do 1% V, do 3,0% W. Skupina alatnih čelika za rad u toplom, kao što su razni valjci valjaoničkih strojeva, ukovnji, matrice, kalupi za lijevanje itd. legirani su u prosjeku s 13% Cr, 3% Mo, 2% V, 9% W i 5% Co. Ovi čelici podvrgavaju se toplinskim obradama kaljenja, te visokotemperaturnog popuštanja. Na slici 10. prikazano je tvrdo navarivanje nakovnja.

Brzorezni čelici koriste se za izradu alata (tokarski noževi, glodala, spiralna svrdla) za obradu odvajanjem čestica. Legirani su u dvije skupine, na bazi CoCrMoVW i CrMoVW sa 10% Co, do 4,5% Cr, 8% Mo, do 4% V i do 18% W. Toplinske obrade ovih materijala su kaljenje i visokotemperaturno popuštanje. [6]



Slika 10. Navarivanje nakovnja tvrdim metalom [10]

Dodatni materijali za navarivanje alata, klasificiraju se u 4 glavne kategorije:

- Materijali za navarivanje alata za rad u hladnom stanju, tvrdoća ovih materijala je do 450 HB, a radi se o alatima za postupke oblikovanja savijanjem, duboka vučenja,

probijanja, kalupe za prešanje u hladnom stanju, noževi za škare za rezanje lima i slično.

- Materijali za navarivanje alata koji se koriste pri oblikovanju i rezanju metala u vrućem stanju, tvrdoće navarenog sloja iznose od 35 do 60 HRC. Ovdje postoje dodatni zahtjevi poput otpornosti na visoke temperature, udarna opterećenja, antikorozivnost, žilavost te otpornost na učestale toplinske promjene. To su visokolegirani materijali na bazi CrMovW, CoCrWFe.
- Materijali za navarivanje brzoreznih čelika gdje navareni slojevi moraju odgovarati svojstvima brzoreznog čelika tvrdoće od 55 do 65 HRC, a legirani su na bazi CrMoWV i WCrVCo.
- Materijali za vrlo tvrda navarivanja poput kruna bušaćih garnitura u rudarstvu, alati za bušenje u postupcima pronalaženja nafte i slično. Navari su vrlo visoke tvrdoće (2400 – 3200 HV). To su volframovi i kromovi karbidi gdje željezo služi kao vezivo. [6]

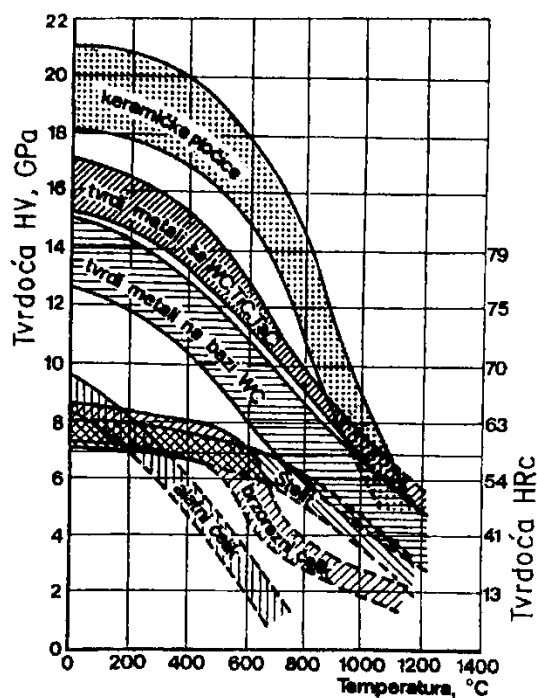
2.6.2. Materijali za navarivanje alata za rezanje drveta

Alati za rezanje drveta i drvnih prerađevina su kružne, tračne i gaterske pile. Kružne pile izvode kružno gibanje i imaju paran broj zubi po obodu, a koriste se za poprečni i uzdužni rez. Tračne pile izvode pravolinijsko gibanje, a mogu se koristiti za uzdužni i poprečni rez. Gaterske ili recipročne pile danas se rjeđe primjenjuju stoga o njima u ovom radu neće biti riječi. U poglavlju 4 biti će detaljno opisane značajke i postupci izrade alata za obradu drveta. Od samog alata se traže sljedeća svojstva:







- dovoljna čvrstoća i žilavost
- potrebnu otpornost na trošenje
- dovoljnu kemijsku otpornost pri zagrijavanju
- prihvatljivu cijenu koštanja.

Osnova svakog alata je alatni čelik koji se i sam može koristiti kao jedinstveni alat za obradu drveta. Međutim takav alat nije pogodan za obradu kod strojeva visokog učinka. Iz tog razloga koriste se brzorezni čelici, tvrde legure i tvrdi metali. Komercijalni nazivi ovih legura su još: stelit, celzit, aknit, perzit i reinit, iako se za sve navedene legure uvriježilo naziv stelit. Legure stelita dobivaju se postupkom lijevanja, a kao glavni legirni elementi dolaze kobalt, krom, volfram i ugljik. U sastavu se može nalaziti i do 10 % željeza. Po tvrdoći i žilavosti,

legura se nalazi između brzoreznog čelika i tvrdog (sinteriranog) metala. Pošto mogu dobro podnositi visoke temperature, zadržavaju svoja mehanička svojstva pri visokobrzinskim obradama. Općenito vrijedi da je izdržljivost tvrdih legura 2 do 3 puta veća od postojanosti visokolegiranih alatnih čelika i brzoreznih čelika [11]



ZA POJEDINE VRSTE VRIJEDI Približno:

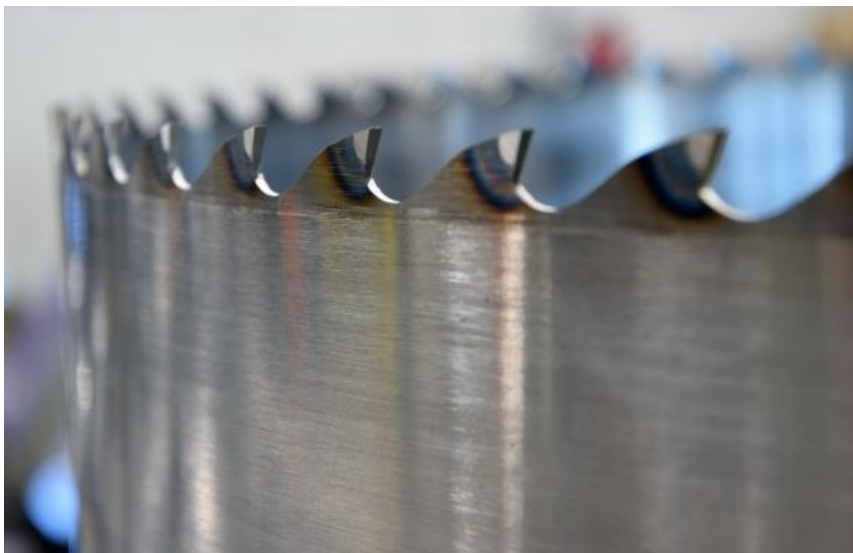
-  C-alatni čelici - 200 do 250 °C
-  brzorezni čelici - 550 do 700 °C
-  tvrde legure steliti - 800 do 900 °C
-  tvrdi sint metali WC do -900 °C
-  tvrdi sint metali WC, TiC, TaC do -1000 °C
-  sint oksidi do -1200 °C (keram pločice)

Slika 11. Temperaturna postojanost materijala za izradu alata [11]

Na slici 11. prikazana je temperaturna postojanost materijala za izradu pila. Prema dijagramu vidljiv je pad tvrdoće s porastom temperature primjene. Površinski slojevi pri obradi odvajanjem čestica, zagrijavaju se na znatno veće temperature od sobne, stoga je nužno zadržati tražena svojstva alata tijekom obrade rezanjem. [15]

Stelit 12 je legura sa svojstvima između stelita 1 i stelita 6. Otpornost ove legure na abrazijsko trošenje je veća od spomenutih. Primarna primjena legure stelita 12 je za proizvodnju alata za pilansku, papirnu i tekstilnu industriju te za proizvodnju ležajeva. Legura se isporučuje u

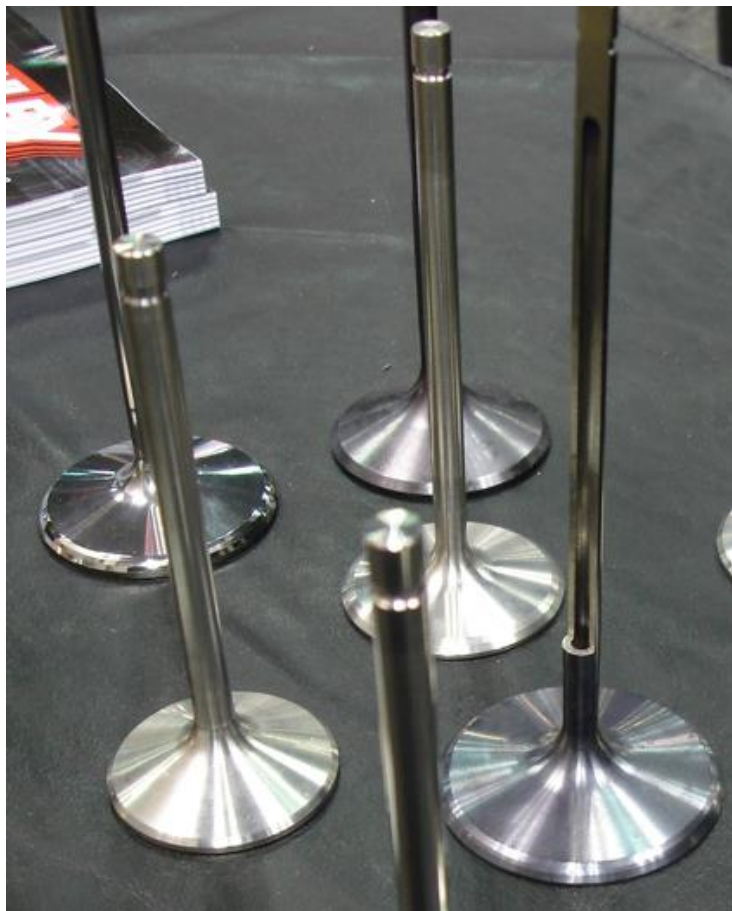
stanju šipke, žice i elektrode. Na slici 12. prikazana je primjena ove legure kod stelitirane tračne pile za drvo. Osnovni materijal u ovom slučaju je ugljični i toplinski obrađen čelik oznake C70S .



Slika 12. Stelitirana tračna pila za drvo [12]

2.6.3. Materijali i specifičnosti navarivanja dijelova motora s unutrašnjim izgaranjem

Motori s unutrašnjim izgaranjem koriste u svom radu veliki dio pokretnih dijelova koji su skloni tribološkim procesima trošenja abrazijom i umorom površine. Kako bi se osigurao dugotrajan i stabilan rad motora, pouzdanost mora biti na visokom stupnju. U procesu proizvodnje ventila motora, koriste se visokolegirani čelici za ventile koji su legirani kromom. Ventili motora s unutrašnjim izgaranjem imaju ciklus dinamički izmjeničnog opterećenja uz djelovanje iznimno jakog trošenja. Temperature u ispušnom sustavu penju se do 700°C , a ponekad i do 900°C . Zbog toga se dijelovi sjedišta ventila i samog ventila tvrdo navaruju TIG postupkom. Za ovo navarivanje koriste se također legure na bazi CoCrW (Stelit F) te legure na bazi NiCrFe (eng. *Brightray*). Stelit F je legura sa blago većom tvrdoćom i žitkosti od Stelita 6 s dobrom otpornošću na trošenje. Na slici 13. prikazani su ventili motora s unutrašnjim izgaranjem nakon provedenog postupka stelitiranja i brušenja.



Slika 13. Ventili motora nakon navarivanja stelitom i brušenja [13]

Glavna primjena je za navarivanje sjedišta ventila motora s unutrašnjim izgaranjem. Legure na bazi NiCrFe sadrže do 80%Ni i oko 20 % Cr, a mogu podnijeti temperature primjene i do 1050 °C.

2.6.4. Materijali i specifičnosti navarivanja na energetskim postrojenjima

Kotlovska postrojenja, posude za skladištenje i transport, kućišta i dijelovi turbina, kemijska postrojenja su primjeri grupa objekata izrađeni od čelika. Čelici koji se koriste u izradi ovh konstrukcija mogu se podijeliti na sljedeće kategorije:

- opći nelegirani konstrukcijski čelici,
- sitnozrnati čelici, čelici za povišene temperature te čelici za niske temperature,
- visokolegirani čelici (čelici otporni na agresivne medije, vatrootporni čelici, čelici za vrlo niske temperature itd.),

- legure nikla.

Opći nelegirani konstrukcijski čelici nemaju posebne zahtjeve glede navarivanja i dobro su zavarljivi, stoga se dodatni materijali za ovu skupinu odabiru prema približno istom kemijskog sastavu. Kemijski sastav se sastoji do 0,2% C, do 0,4% Si, do 0,5% Mn te maksimalno 0,045% S i P. Ako se navarivanje izvodi REL postupkom, preporuča se upotreba bazičnih elektroda. Sitnozrnati čelici dobivaju se posebnom toplinskom obradom, a karakterizira ih sitnozrnata mikrostruktura, povišena čvrstoća, visoka granica razvlačenja i žilavost. Kemijski sastav se sastoji do 0,2% C, do 1,7% Mn, do 0,3% Cr te 1% Ni. Trgovački nazivi ovih čelika su još Niobali, Niovali, Niomoli i Nionicali. Dodatni materijali biraju se prema njihovim mehaničkim i kemijskih svojstvima, a uglavnom se koriste bazične elektrode za kotlovske čelike.

Kod čelika za povišene temperature, glavni legirni elementi su Mn, Mo i CrMo (kotlovska postrojenja), CrMoV (kućišta parnih turbina) te CrVMoW za cijevi i limove do 520 °C. Kod ovih materijala, obavezno je predgrijavanje prije zavarivanja na temperaturu određenu prema ekvivalentnom udjelu kemijskih elemenata C_{ekv} . Dodatni materijali su sličnog kemijskog sastava i mehaničkih svojstava kao i osnovni.

Čelici za niske temperature izrađuju se od CrNi austenitnih čelika, legirani su najčešće s 3,5 %Ni ili najviše 9% Ni. Jeftiniji su od visokolegiranih CrNi čelika, a imaju i višu granicu razvlačenja. Dodatni materijali za zavarivanje i navarivanje su austenitnog tipa CrNi 18/8, CrNiMn 18/8/6 ili CrNi 25/20. Predgrijavanje nije potrebno, a mogu se primjenjivati gotovo svi postupci zavarivanja. [6] Visokolegirani konstrukcijski čelici su čelici izloženi posebnim eksploatacijskim uvjetima poput agresivnih medija, povišenih, visokih i niskih temperatura uz djelovanje opterećenja. Ovi čelici dijele se prema strukturi na austenitne, feritne i martenzitne. Austenitni CrNi čelici imaju najbolju otpornost na koroziju, dobru vatrootpornost i dobra svojstva kod niskih temperatura, a karakterizira ih visoki sadržaj kroma (18-20% Cr) te nikla (8-25% Ni). Sa stajališta zavarivanja, dobro su zavarljivi, ali mogući su problemi poput sklonosti toplim pukotinama i izlučivanju kromovih karbida na granice zrna austenitne strukture odnosno pojave interkristalne korozije, iako je danas pojava ovog oblika korozije smanjena [6]

2.7. Svojstva i podjela legura stelita

Steliti su tvrde legure na bazi kobalta, kroma, volframa i male količine ugljika sa svojstvima poput otpornosti na trošenje, postojanosti na iznimno visoke temperature te dobrom navarljivošću. U tablici 2. prikazana je podjela legura stelita s obzirom na kemijski sastav, tvrdoću i temperaturu tališta. Navedeni materijali proizvod su njemačke tvrtke Kennametal. [14]

Tablica 2. Podjela legura stelita [14]

Naziv legure	Kemijski sastav, %	Tvrdoća, HRC	Temperatura tališta, °C
Stelit 1	C 2,5 Cr 32 W 13 Co 52,5	55	1250 - 1290
Stelit 6	C 1 Cr 27 W 5 Co 33	42	1280 - 1390
Stelit 12	C 1,8 Cr 30 W 9 Co 86,2	48	1280 - 1315
Stelit 21	C 0,2 Cr 27 Mo 5 Co 67,8	32	1180 - 1280
Stelit 31	C 0,5 Cr 26 W 7 Co 56,5 Ni 10	32	1260 - 1415
Stelit 694	C 1 Cr 28 W 19 Co 46 Ni 5 V 1	50	1280 - 1360

Stelit F	C 1,7 Cr 25 W 12 Co 39,3 Ni 22	44	1260 - 1305
-----------------	--	----	-------------

Stelit 1 je legura iznimno dobre otpornosti na abraziju i atmosfersku koroziju. Tvrdoću zadržava na temperaturama do 600 °C. Primjena ove legure je za brtvljenje pumpi, kućišta ležajeva te navarivanje vijaka ekstrudera. Stelit 6 je tvrda legura niže tvrdoće od stelita 1, otporna na eroziju s širokom primjenom za opće navarivanje. Otpornost na pojavu pukotina pri višeslojnom navarivanju je manja nego kod stelita 12, ali bolje otpornosti na trošenje. Primjena se bazira na ventile motora s unutrašnjim izgaranjem, rukavce rotora pumpi i sve klizne elemente. Stelit 31 ima izvrsnu otpornost na opterećenja pri visokim temperaturama, posebno od oksidacije. Primjenjuje se u reparaturama i proizvodnji plinskih turbina zbog visoke otpornosti na vruće plinove. Stelit 694 je visokočvrsta legura na bazi kobalta s finoizratom mikrostrukturom i stabilnošću na visokim temperaturama. Koristi se za proizvodnju i popravak dijelova plinskih turbina, na mjestima gdje Stelit 31 ne zadovoljava zbog niže tvrdoće.

Mikrostruktura legura stelita se sastoji od tvrdih faza M_7C_3 karbida, M_6C karbida i kristala mješanaca kobalta i kroma. Na slici 14. prikazana je mikrostruktura stelita 12. [14]



Slika 14. Mikrostruktura stelita 12 s povećanjem 500x [14]

Struktura s karbidima u Co matrici ovisi uvelike o brzini skrućivanja i unosu topline. Brzina skrućivanja ovih legura mijenja se s obzirom na postupak navarivanja, stoga se plinskim postupkom zavarivanja gdje je brzina skrućivanja mala, nastaju velika zrna Co matrice i izlučenih karbida. Dugotrajnim toplinskim obradama na temperaturama iznad 650 °C moguća je fazna transformacija iz FCC u HCP kristalnu rešetku što dovodi do blagog porasta otpornosti na trošenje. U tablici 3 prikazana su mehanička svojstva legure stelit 12 na sobnoj temperaturi. [14]

Tablica 3. Mehanička svojstva stelita 12 [14]

Mehanička svojstva materijala				
Oblik	R_m , MPa	R_p , Mpa	A_5 , %	E , GPa
Odljevak stelita	740	580	1	226
Stelit 12	1200	900	2	208

Tipični elektropotencijal u morskoj vodi i na temperaturi od 20 °C legure stelita iznosi približno – 0,3 V. Poput nehrđajućih čelika, ove legure primarno korodiraju mehanizmom jamičaste korozije (eng. *Pitting*), dok nema značajnih pokazatelja korozije u morskoj vodi odnosno atmosferske korozije. Zbog ovih svojstava, navedeni materijal koristi se u prehrambenoj i kemijskoj industriji.

3. TIG POSTUPAK ZAVARIVANJA

3.1. Općenito o TIG postupku zavarivanja

TIG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja netaljivog elektrodom u zaštiti inertnog plina. Između netaljive elektrode i radnog komada, uspostavlja se električni luk u koji se dodaje dodatni materijal u obliku šipke standardnih promjera 0,5 – 8 mm, a postupak se može provoditi i bez dodavanja materijala. Razvoj postupka počeo je u vrijeme 2. svjetskog rata, za potrebe zrakoplovne industrije. Ovim postupkom zavaruju se gotovo svi metali (nelegirani konstrukcijski i nehrđajući čelici, aluminij, bakar, titan i njihove legure). Netaljiva elektroda izrađena je od legure volframa mikrolegirana određenim kemijskim elementima te prema tome i označena kodnim brojevima i bojama (čisti volfram – zelena, torij – crvena, lantal – plava itd.) Svaka od navedenih elektroda ima svoje područje primjene u smislu opterećenja elektrode i materijala koji se zavaruje. Kod TIG zavarivanja, elektroda se spaja na „–“, pol istosmjerne struje, a može se koristiti i izmjenična struja.

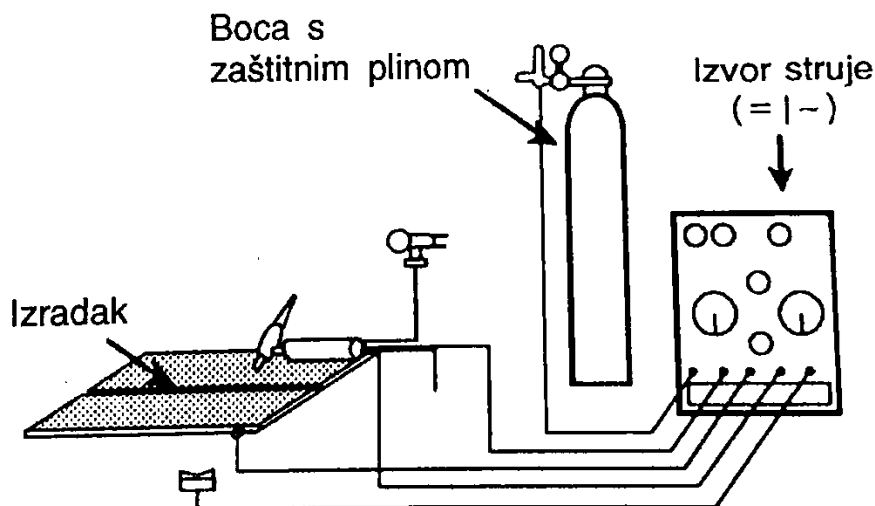


Slika 15. Shematski prikaz TIG postupka lijevo i TIG zavarivanje u provedbi [2],

Na slici 15. prikazan je shematski prikaz zavarivanja ručnim TIG postupkom. Postupak još može biti poluautomatiziran i automatiziran. Zavarivanje kreće uspostavom električnog luka koji se može ostvariti klasičnim paljenjem luka ili grebanjem o radni komad, te pomoću visokofrekventnog paljenja (danas najčešće u praksi). Zbog stvaranja visoke frekvencije, moguće je ostvariti i visoki napon električnog luka kojim se omogućava beskontaktno paljenje luka. Nakon uspostave luka, visoka frekvencija se isključuje, a ovime se izbjegava dodir elektrode i radnog komada odnosno pojava uključaka volframa u zavaru.

3.2. Oprema za TIG

Oprema za TIG zavarivanje sastoji se od: izvora struje zavarivanja, kabela za masu, TIG gorionika s pripadajućim priključkom te boce zaštitnog plina s regulatorom protoka i manometrom. Na slici 16. prikazana je oprema za TIG postupak. [6]



Slika 16. Standardna oprema za TIG postupak [6]

Izvori struje za TIG zavarivanje su u pravilu transformatori s ispravljačima ili inverteri. Struja zavarivanja se održava približno na istim vrijednostima prilikom zavarivanja, stoga ovi izvori imaju strmu statičku karakteristiku, kao i aparati za REL. Izvori su opremljeni modulom za visokofrekventni start te dodatno modulima za izmjeničnu struju koja se upotrebljuje za zavarivanje aluminija. Kod rada na višim i impulsnim strujama i pri većem toplinskom opterećenju TIG gorionika, često se dodaje jedinica za hlađenje. Polikabeli prema tome mogu biti s izvedenim zračnim i vodenim hlađenjem, a dolaze u dužini od 4 ili 8 m. Gorionik se sastoji od držača gorionika, keramičke sapnice za plin, stezača volframove elektrode s steznom kontaktnom cjevčicom, kontaktne cjevčice, volframe elektrode i zaštitne kape. Posebne izvedbe TIG gorionika imaju dodatni ventil za plin na držaču, koje se koriste za ručni postupak bez VF starta. Današnji moderni gorionici opremljeni su tipkama za fino podešavanje struje i drugih značajki. [2] [6]

3.3. Parametri TIG zavarivanja

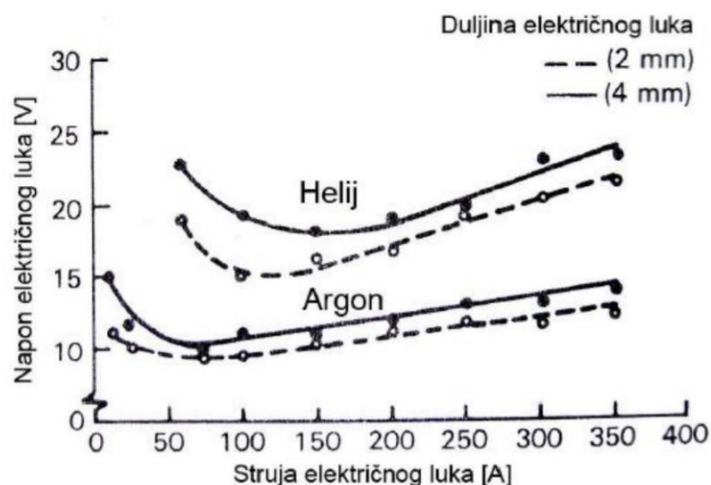
Osnovni parametar zavarivanja je struja, no postupnim razvojem došlo je i do povećanja parametara zavarivanja TIG postupkom. Struja zavarivanja odabire se s obzirom na promjer i vrstu dodatnog materijala, promjer volframove elektrode te položaju zavarivanja. Napon električnog luka potreban za ionizaciju je relativno nizak i iznosi od 15 - 35 V. U tablici 3 prikazani su orijentacijski podaci za TIG zavarivanje nehrđajućih čelika za preklopni spoj.

Tablica 4. Približne vrijednosti parametara zavarivanja [6]

Debljina osnovnog materijala, mm	W-elektroda Φ , mm	Promjer žice dodatnog materijala, mm	Jakost struje, A	Protok plina, l/min
1,5	1,6	1,6	50-70	7
3,0	2,4	2,5	90-110	7
5,0	3,2	3,0	125-150	10
6,0	3,2	3,0	160-180	10

Kod impulsnog zavarivanja pojavljuje se parametar frekvencije impulsa, dok dodatno kod zavarivanja izmjeničnom strujom (AC) odabire se balans pozitivnog i negativnog dijela.

Zaštitni plinovi imaju zadaću zaštititi talinu od utjecaja okolišnog zraka, a to se postiže korištenjem inertnih plinova (argona i helija). Zaštitni plin direktno utječe na svojstva zavarenog spoja, geometriju zavara, stabilnost luka te konačno i kvalitetu zavara. Argon se nametnuo kao primarni odabir za zaštitu, a dolazi u različitim razredima čistoće koje su klasificirane brojevima (4.6, 4.8, 5.0). Primjena helija je ograničena na zavarivanje u nadglavnim položajima zavarivanja te dodatno poskupljuje proces zbog više cijene koštanja. Na slici 17. prikazana je ovisnost jakosti struje i napona na duljinu električnog luka kod različitih zaštitnih plinova. [6]



Slika 17. Utjecaj vrste plina na struju i napon kod TIG postupka [16]

Za ionizaciju električnog polja pri korištenju argona, potreban je niži napon nego u slučaju korištenja helija. Helij ima viši potencijal pa će biti potrebna i veća jakost struje.

S obzirom na nižu gustoću od argona, utrošak helija je veći pa je potrebno povećati protok ovog zaštitnog plina. Glavni benefit korištenja helija je veća penetracija. Kao zaštitni plinovi u posljednje vrijeme sve se više koriste mješavine plinova argona. U tablici 5. prikazane su mješavine plinova argona za TIG postupak proizvođača Messer Croatia Plin d.o.o.

Tablica 5. Zaštitni plinovi za TIG zavarivanje [17]

Naziv plina	Grupa po ISO 14175	Ar, %	He, %	H ₂ , %	N ₂ , %
Argon 4.8	I1	100	-	-	-
Helij 4.6	I2	-	100	-	-
Aluline He90	I3	10	90	-	-
Aluline He50	I3	50	50	-	-
Inoxline H2	R1	98	-	2	-
Inoxline H5	R1	95	-	5	-
Inoxline H7	R1	92,5	-	7,5	-
Inoxline N1	N2	98,75	-	-	1,25
Inoxline He15 N1	N2	83,75	-	-	1,25

Inoxline He3 N1	R1	95,3	3	1,5	-
--------------------	----	------	---	-----	---

Mješavine argona i vodika često su korištene pri automatiziranim postupcima TIG zavarivanja, gdje ne dolazi do pukotina uzrokovanih vodikom. Vodik se dodaje u malom postotku od 2% do 7%. Jedna od primjena vodika je povećanje penetracije u procesu zavarivanja. Čisti dušik koristi se i pod nazivom formir plin, a zbog niske cijene, koristi se za zaštitu korijena cijevi. U mješavine argona dodaje se od 1% do 2 % dušika kod zavarivanja metala koji imaju visoku toplinsku vodljivost te nekih nehrđajućih čelika radi postizanja austenitne mikrostrukture. Inače mogu dovesti do pojave pukotina kod ostalih metala. [17], [6]

3.4. Prednosti i nedostaci postupka

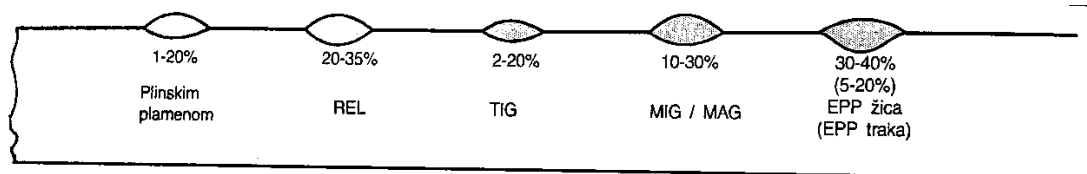
Glavna prednost TIG postupka zavarivanja je mogućnost zavarivanja gotovo svih metala, a kao dodatni materijal može poslužiti i trake osnovnog materijala. Zavarivanje se može provoditi u radionicama ili na terenu, a prilikom rada, nema pojave kapljica (što je tipično za MAG postupak). Količina dimnih plinova i prašine je minimalna u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima, a kvaliteta zavarenih konstrukcija na najvišoj je razini. Postupak se može vrlo lako automatizirati, s dodavačem žice kao kod MIG postupka. Brzina zavarivanja nije u korelaciji s jakosti električnog luka i dodavanjem dodatnog materijala.

Nedostatak TIG postupka vidi se u maloj količini rastaljenog materijala, stoga ovaj postupak se često koristi za zavarivanje korijena, a popuna se izvodi drugim postupcima. Kod rada na otvorenom, potrebno je paziti na utjecaj vjetra koji može smanjiti zaštitu procesa. TIG postupak traži čiste i odmašćene površine stoga je prije zavarivanja, nužna dodatna tehnološka operacija. Zaštitni plinovi su višeg stupnja čistoće, a zbog korištenja plinskih mješavina, njihova cijena u odnosu na plinove u MIG/MAG zavarivanju množi se faktorom 2 - 3 . U konačnici, cijena zavarivanja drastično je veća, a ukoliko parametri zavarivanja nisu optimalni, to će dovesti do povećanih troškova zavarivanja. [2],[6]

3.5. Specifičnosti TIG tvrdog navarivanja

Kada je općenito riječ o postupcima navarivanja ili reparatura konstrukcija, prvi odabir smatra se još uvijek REL postupak (SMAW). TIG navarivanje je stoga još uvijek slabije zastupljeno, no postoji trend sve većeg korištenja upravo ovog postupka navarivanja, posebno u današnjim zahtjevima sve veće automatizacije procesa. Važno svojstvo kada je riječ o navarivanju je

stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala. Stupanj miješanja ovisi o količini rastaljenog materijala, unosu topline te postupku zavarivanja. Na slici 18. prikazana je ovisnost različitih postupaka zavarivanja na stupanj miješanja.



Slika 18. Usporedba postotaka miješanja osnovnog i dodatnog materijala [6]

Na slici 19, prikazano je kako stupanj miješanja kod TIG i plinskog postupka nosi najmanju vrijednost, što je posljedica slabijeg unosa topline zbog specifičnosti ova dva postupak.

Stupanj miješanja kod navarivanja općenito ovisi o sljedećem:

- o vrsti i kvaliteti osnovnog i dodatnog materijala
- ako je temperatura taljenja dodatnog materijala niža od temperature taljenja osnovnog materijala – miješanje je manje
- manja toplinska vodljivost osnovnog materijala ili manje dovođenje topline, znači veće miješanje osnovnog i dodatnog materijala.
- miješanje je najveće u prvom sloju navara, dok se svakim sljedećim miješanje smanjuje.
- što je specifična težina legirajućih elemenata u dodatnom materijalu, veća, to je lijeganje istih u donje slojeve veće pa se ne preporuča veliki nanosi takvih legura na površinu navara.

Stupanj miješanja određen je izrazom: [6]

$$\text{postotak miješanja} = \frac{A}{A + B} \times 100 \quad (1)$$

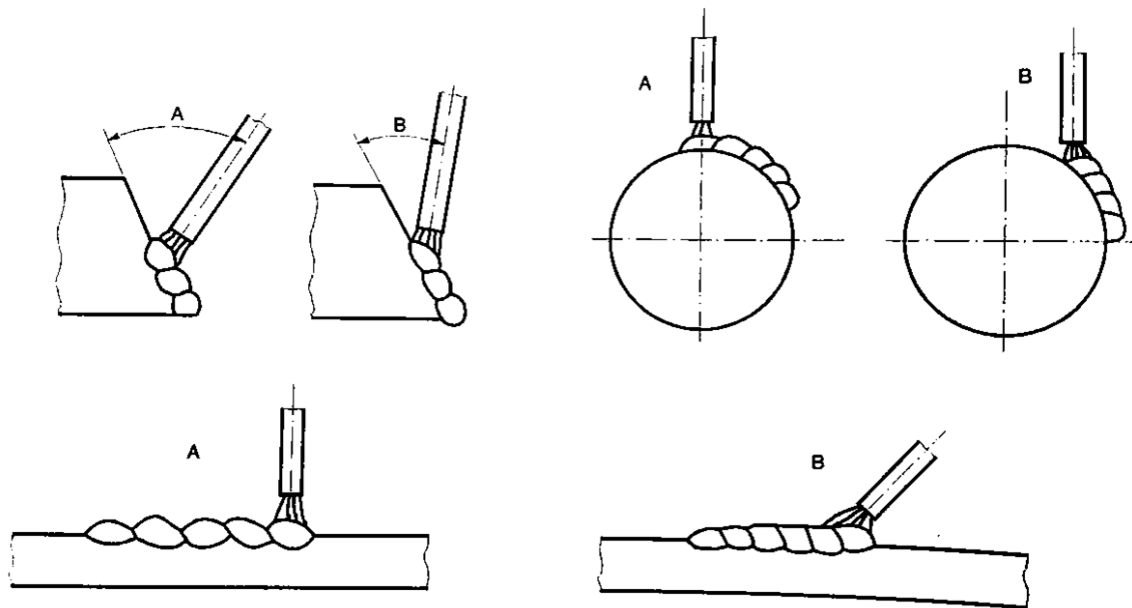
gdje je:

A - udio metala navara

B – udio ZUT.

Osnovno pravilo kod navarivanja je odabrati postupak kojim će se postići najmanji stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala. TIG postupak se zbog ove činjenice

koristi kod navarivanja malih površina i oštih rubova. Za navarivanje većih površina preporuka je odabrati REL i MIG postupke, ali u današnje vrijeme ovim postupcima mogu konkurirati i napredni TIG postupci navarivanja (TIP TIG postupak). Tehnika navarivanja odabire se tako da daje najmanji stupanj miješanja. Slika 19. prikazuje detalje tehnike navarivanja pri kojoj se ostvaruju najmanji stupnjevi miješanja osnovnog i dodatnog materijala. [6]

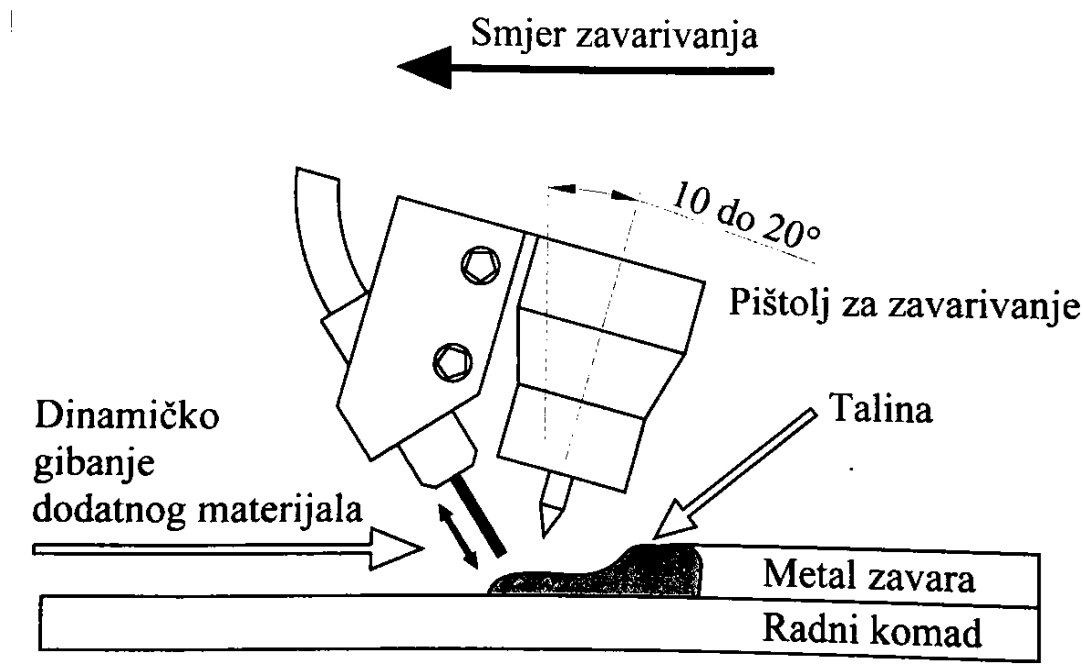


Slika 19. Primjeri ispravne B i pogrešne A tehnike rada kod navarivanja [6]

Tehnikom rada B odnosno određenim nagibom elektrode ili pištolja stvara se manji unos topline, te time i manji stupanj miješanja. Ova pravila vrijede za navarivanje kružnih i pločastih materijala. [6]

3.6. Napredne tehnike TIG postupka

U posljednje vrijeme, razvijene su različite varijante automatiziranog TIG-a zbog slabe produktivnosti konvencionalnog postupka. Jedna takva modifikacija pod nazivom TIP TIG omogućuje povećanje produktivnosti i integraciju u postojeće automatizirane sustave. Na slici 20. prikazan je shematski koncept i način rada TIP TIG zavarivanja.



Slika 20. TIP TIG zavarivanje [18]

Sustav se sastoji od klasičnog TIG uređaja i opreme za zavarivanje te dodavača žice sa gibanjem „naprijed – nazad“. Dodavač žice preko mehaničkog sustava proizvodi pulsirajuće gibanje žice što odgovara i ručnom dodavanju, ali s većom brzinom. Kinetička energija dinamičkog gibanja žice omogućuje bolje miješanje osnovnog i dodatnog materijala, dok nečistoćama i plinovima omogućuje izlazak iz taline. Brzina žice i frekvencija izlaza žice je dodatan parametar kod ovog postupka. Primjenom TIP TIG postupka zavarivanja omogućuju se sljedeće dobrobiti:

- veći depozit materijala u odnosu na postojeći sustav (navarivanje),
- visoka kvaliteta zavara ili navara,
- dobar estetski izgled i geometrija zavara,
- smanjeni unos topline u radni komad što daje manje deformacije i manji ZUT. [18]

Razvijene su i dvije inačice ovog postupka poput dodavanja hladne i vruće (predgrijane) žice u električni luk. Zavarivanje hladnom žicom je relativno jednostavan sustav, a sastoji se od mikroprocesorom upravljanog dodavača žice, pištolja za zavarivanje i izvora struje. Inačica s pregrijavanjem žice ima dodatno uređaj za pregrijavanje dodatnog materijala. Glavna prednost ovog postupka je odvojena regulacija dodavanja žice i parametara električnog luka.

Unos topline kod TIP TIG postupka vrućom žicom računa se kao zbroj unosa topline pri nastanku električnog luka, te topline od predgrijane žice:

$$Q = Q_{EL} + Q_{DM} \quad (2)$$

$$Q_{EL} = \frac{I_z \times U}{v_z \times 1000} \times 60 \times \eta \quad (3)$$

Gdje je:

Q – ukupna toplina

Q_{EL} – toplina električnog luka [kJ/mm]

Q_{DM} – toplina dodatnog materijala [kJ/mm]

I_z – jakost struje zavarivanja [A]

U – napon električnog luka [V]

v_z – brzina zavarivanja [cm/min]

η – stupanj iskoristivosti el. luka. [19]

Unos topline kod konvencionalnog postupka kao i postupka sa hladnom žicom računa se prema izrazu za Q_{EL} . Primjenom ovog postupka mogu se učinkovito zavarivati i navarivati svi zavarljivi metalni materijali. Kod inačice sa vrućom žicom posebno dolazi do izražaja navarivanje velikih površina. Upotreba ovakvih procesa dovodi do bolje ekonomičnosti postupka, posebno onih automatiziranih. [18], [20]

4. PRIMJENA TVRDOG NAVARIVANJA U PROIZVODNJI TRAČNIH PILA ZA DRVO

4.1. Osnove obrade drveta rezanjem

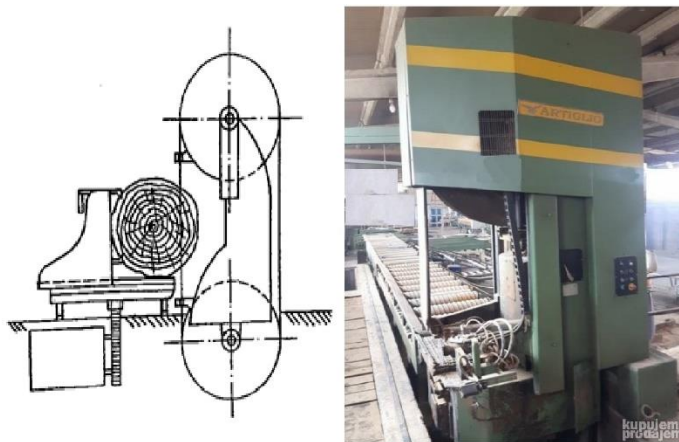
Strojna obrada drveta rezanjem postiže se različitim postupcima, a može se klasificirati na postupke sa stvaranjem strugotine i bez stvaranja strugotine. Postupci rezanja bez stvaranja strugotine su štancanje i rezanje nožem. Ovaj rad bazirat će se na postupke obrade drveta odvajanjem čestica, a to je u prvom redu piljenje, te ostali postupci poput glodanja, tokarenja, bušenja, blanjanja i drugi. Piljenje može biti izvedeno na strojevima tračnim pilama, kružnim pilama ili recipročnim pilama.

Tračne pile su strojevi za piljenje drva u kojem alat u obliku beskonačne trake (list tračne pile) izvodi pravocrtno gibanje, a snaga se dovodi na mjesto rezanja pomoću pogonskog kotača. U osnovi ovaj mehanizam možemo gledati kao jednostavni remenski prijenos jer se koristi identična kinematika mehanizma. Tračne pile imaju široku primjenu, a u drvenoj industriji možemo ih podijeliti na:

- tračne pile trupčare ili teške tračne pile,
- rastružne tračne pile ili srednje tračne pile,
- stolarske tračne pile ili lake tračne pile. [11]

4.1.1. Tračne pile

U nastavku rada, naglasak će biti na prvu skupinu pila odnosno tračnih pila trupčara. Na slici 21. prikazana je shematski i u praksi pila za piljenje trupaca.

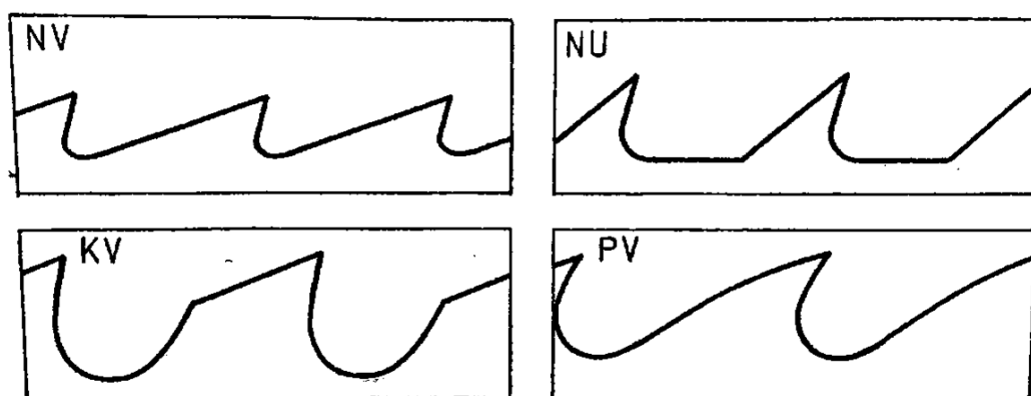


Slika 21. Tračna pila trupčara – pilana [11]

Pile trupčare mogu biti vertikalne što je prikazano na slici 21. kod kojih se posmično gibanje uglavnom izvodi pomoću postolja odnosno kolica obratka ili horizontalne gdje posmično gibanje izvodi uglavnom alat. Potonje pile su vrlo često i mobilne pilane. [11]

4.1.2. Alat tračne pile

Alat tračne pile je jednostrano ili dvostrano nazubljena beskonačna čelična traka. Traka se izrađuje na ekscentarskim ili hidrauličnim prešama štancanjem. U praksi se štanca materijal u dovoljnoj količini za izradu nekoliko pila, koje se režu na konačne dimenzije. Zavarivanje trake izvodi se mehaniziranim MIG ili TIG postupcima, te elektrootporno iskrenjem. Na slici 22.1 prikazani su osnovni oblici nazubljenja kod ovih vrsta pila. Svaka pila osim definiranog oblika nazubljenja, mora imati i svoj korak.



Slika 22. Osnovni oblici nazubljenja tračnih pila [11]

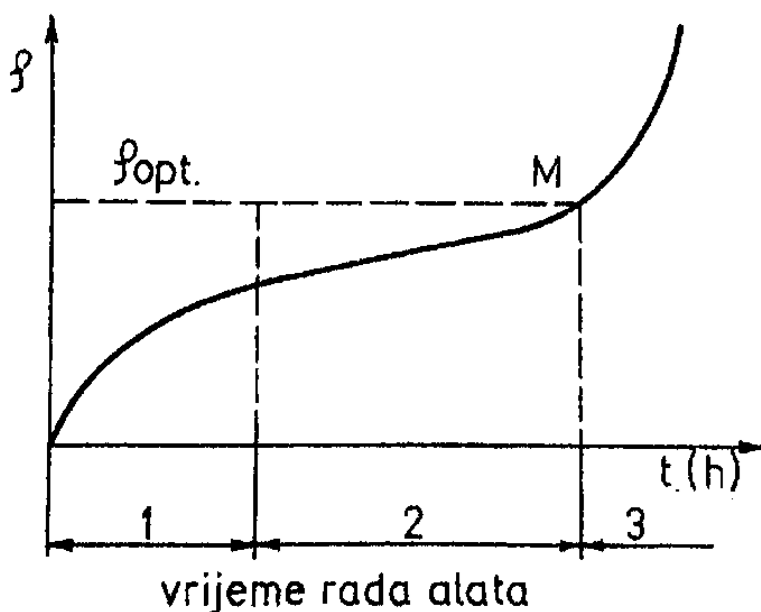
PV oblik zuba je najčešći kod širokolisnih pila. Zaobljena leđa osiguravaju minimalan stražnji kut oštrice, a to dodatno ojačava zube i ujedno osigurava odgovarajuću površinu pazuha koja je ograničavajući faktor u postizanju optimalnog rezanja.

NV oblik čest je oblik ozubljenja na uskolisnim tračnim pilama i čest je u skandinavskim zemljama. Ovaj oblik koriste i kružne pile manjih promjera alata.

NU oblik ozubljenja ima oslabljene zube i veliku površinu pazuha. Koristi se pretežito kod uskolisnih tračnih pila za rezanje mekog drveta, te za grubo poprečno rezanje. [11]

4.1.3. Postojanost oštrice alata

Zubi tračnih pila odnosno oštrice se sastoje od prednje i stražnje površine, koju omeđuje klin. Svaki alat u toku rada se troši, a rezultat je promjena mikro geometrije oštrice. Promjene nastale na oštrici definiraju se kao zatupljivanje oštrice. Postojanost alata stoga možemo definirati kao sposobnost istog da u određenim radnim uvjetima i kroz određeno razdoblje zadrži projektiranju sposobnost rezanja. Na slici 23. prikazana je opća krivulja trošenja koja vrijedi za oštrice pila.



Slika 23. Krivulja trošenja oštrice [11]

U prvom periodu (oznaka 1) koji još nazivamo i period uhodavanja, dolazi do intenzivnog trošenja oštrice alata. Sile koje djeluju na oštrici pri rezanju zbog male površine presjeka, izazivaju naprezanja veća od graničnih za materijal oštrice te dolazi do njegovog otkidanja. U drugom periodu (oznaka 2) koji se naziva i period normalnog trošenja, intenzitet trošenja se smanjuje, a pila u ovom stanju najduže radi ispravno. Nakon točke M, nastupa period ubrzanog ili katastrofalnog trošenja. Razlog leži u činjenici povećanja otpora rezanja i povećanju snage rezanja te treba zaustaviti rezanje i naoštriti pilu ili zamijeniti novom. Ukoliko se nastavi koristiti pila i nakon točke M, dolazi do porasta temperature pa čak i uništenja samog alata. [11]

4.2. Proizvodnja stelitiranih tračnih pila za drvo

Proizvodnja stelitiranih tračnih pila za pilansku industriju predstavlja određeni standard u ovoj branši. Do nedavna, koristile su se tračne pile s tlačenim i razmetanim zubima, čija je postojanost bila daleko lošija od zahtjeva današnje moderne pilanske proizvodnje. U tom smislu, razvijaju se postupci stelitiranja pila, odnosno u početku postupci lemljenja umetaka stelita, da bi se danas isti proizvodili automatiziranim tvrdim navarivanjem. Stelitirane tračne pile imaju daleko veći broj mogućih oštrenja od onih proizvedenih na klasičan način. Količina navarenog stelita može se iskoristiti za 20 oštrenja tračnih pila.

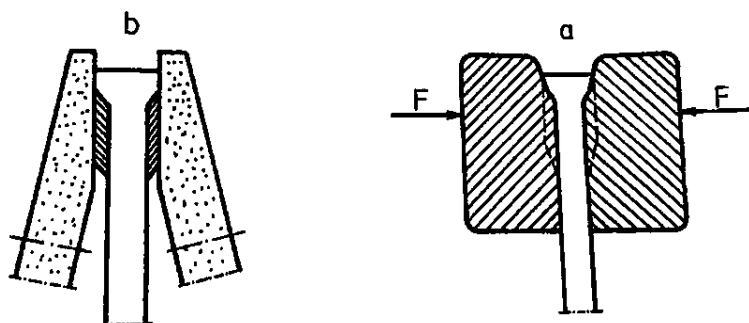
Postupak proizvodnje tračnih pila započinjem štancanjem tračnog čeličnog lima prema zahtjevima profila i koraka zuba pile. Nakon rezanja trake na konačnu duljinu, uzdužog zavarivanja i ravnanja, tračne pile su spremne za postupak stelitiranja. Postupak stelitiranja izvodi se na posebnim strojevima s automatiziranim TIG postupkom navarivanja i naknadne toplinske obrade. Navarivanje stelita izvodi se u bakrenim kalupima u kojima se formira potrebni volumen stelita jednako na svakom zubu. Stroj u taktu zatvara kalup pneumatskim stezanjem, uključuje se struja TIG aparate, te se dodaje potrebna količina stelita spuštanjem šipke stelita na mjesto električnog luka. Dok se izvodi stelitiranje jednog zuba, sljedeći se podvrgava zagrijavanjem plinskim plamenom do užarenja te hladi na zraku.



Slika 24. Automatsko stelitiranje tračnih pila [12]

Postupak se ponavlja dok se ne izvrši navarivanje svih zuba na tračnoj pili. Sličan postupak izvodi se i s kružnim pilama, a može se ponoviti više put u slučaju istrošenja navarenog sloja. Slika 24. prikazuje princip rada u praksi.

Nakon faze stelitiranja preostaje još izvesti tehnološke operacije egalizacije (bočnog brušenja zuba) te formiranja prednje i stražnje površine oštrice. Ovo se izvodi na brusilicama bokova zuba te profilnim oštrilicama. Kod stelitiranih tračnih pila, nema potrebe za razvraćanjem zubiju, već se potrebna širina reza ostvaruje brušenjem bokova zuba obično s malim kutom od $0,5^\circ - 1^\circ$. Na slici 25. prikazan je shematski postupak egalizacije zubi tračnih pila postupcima brušenja (lijevo) i tlačenja (desno).



Slika 25. Egalizacija boka zuba tlačnim pločama lijevo, brusnim pločama desno [11]

Za egalizaciju i profiliranje zubaca pile, koriste se korund (plemeniti korund, silicijev korund, berilijev korund) ili dijamant. Brusne ploče razlikuju se bojama, gdje svaka predstavlja brusnu ploču određene tvrdoće. [15] Postupak stelitiranja može se provoditi i ručno na postojećim pilama kojima je u eksploataciji došlo do istrošenja oštrice.

5. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

5.1. Uvod u eksperiment

Eksperiment je proveden u cilju utvrđivanja optimalne tehnologije navarivanja tvrde legure Stelit 12, te određivanja korozijske otpornosti na rupičastu koroziju. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za zavarivanje katedre za zavarene konstrukcije, Laboratoriju za zaštitu materijala te Laboratoriju za toplinsku obradbu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Plan i tijek ispitivanja prikazan je u tablici 6.

Tablica 6. Plan ispitivanja

Redni broj	Naziv ispitivanja	Broj uzoraka
1	Vizualna kontrola	8
2	Ispitivanje penetrantima	8
3	Analiza kemijskog sastava XRF metodom	1
4	Analiza makrozbrusaka	10
5	Korozijsko ispitivanje na rupičastu koroziju	4
6	Mjerenje tvrdoće	10

U smislu analize navarenih spojeva, razmatrana su ispitivanja savijanjem, no zbog variranja više parametara u postupku navarivanja, u ovom radu to nije provedeno. Vizualnom metodom, te penetrantskom metodom nastoji se provjeriti kvaliteta navarenih slojeva na površini. Izradom makrozbrusaka, cilj je provjeriti geometriju navarenih slojeva, odrediti ZUT i postotak miješanja osnovnog i dodatnog materijala. Korozijsko ispitivanje na rupičastu ili jamičastu koroziju je odabrano zbog činjenice da legure stelita 12 općenito imaju problema s pojavom ovog tipa korozije, dok je otpornost na atmosfersku koroziju odlična. Mjerenjem tvrdoće, posebice nakon toplinske obrade, nastoji se utvrditi s kojim parametrima navarivanja se postiže maksimalna tvrdoća koja je važna u kontekstu otpornosti na trošenje.

5.2. Materijali

5.2.1. Osnovni materijal

Za osnovni materijal, odabran je opći konstrukcijski čelik oznake S235JR prema normi HRN EN ISO - 10025 čiji je kemijski sastav prikazan u tablici 6 dok su opća mehanička svojstva navedenog materijala prikazana u tablici 7. Materijal je izrezan iz toplovaljane ploče debljine 10 mm, a sami uzorci za navarivanje izrezani su na tračnoj pili. Konačne dimenzije uzoraka su 50x120x10 mm, a prikazane su na slici 26.



Slika 26. Ploče dodatnog materijala prije rezanja

Tablica 7. Kemijski sastav osnovnog materijala [21]

Kemijski sastav materijala S235 u %					
Fe	C	Mn	S	P	Si
ostatak	0,22	1,6	0,05	0,05	0,05

Granica razvlačenja osnovnog materijala niža je 5 puta od legure stelita dok je produljenje čelika S235 približno 11 puta veće.

Tablica 8. Mehanička svojstva osnovnog materijala [12]

Mehanička svojstva materijala S235				
Vlačna čvrstoća R_m , MPa	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$, MPa	Produljenje A_5 , %	Žilavost KV , J	Tvrdoća HV
340 - 470	225	21	27	-

5.2.2. Dodatni materijal

Za tvrdo navarivanje u ovom eksperimentu, korištena je legura na bazi Co-Cr-W odnosno Stelit 12 američkog proizvođača Kennametal Stellite. Radi se o materijalu velike otpornosti na trošenje, koroziju te navedena svojstva zadržava na temperaturama do 700 °C, a iznimno i do 900 °C. Kako je već navedeno u poglavlju 3, stelit 12 je legura svojstvima između stelita 1 i stelita 6. Isporučuje se u obliku žice za MIG/MAG zavarivanje, šipki za TIG zavarivanje, praha za naštrcavanje ili elektrode. Unutar ovog eksperimenta korišten je dodatni materijal u obliku šipke za TIG zavarivanje promjera 3,2 mm, koji se koristi u tvornici Toner d.o.o. za proizvodnju stelitiranih tračnih i kružnih pila. Slika 27. prikazuje dodatni materijal korišten u ovom radu.

**Slika 27. Dodatni materijal Stelit 12**

5.3. Priprema uzoraka

Ploče na slici 26. izrezane su plinskim plamenom te su iste očišćene čeličnom rotirajućom četkom kako bi se odstranio crni sloj na površini. Toplovaljani limovi u proizvodnji presvlače se shop primerom kako bi se privremeno osigurala zaštita dok materijali stoje na skladištu. Nakon čišćenja, uzorci su izrezani na tračnoj pili za metal. Slika 28. prikazuje uzorke nakon rezanja i označavanja.



Slika 28. Uzorci nakon rezanja i označavanja

Označavanje uzoraka izvedeno je pomoću utisnih brojeva i slova veličine 5 mm. Zbog različitih parametara navarivanja i ostalih ispitivanja, odabrano je 10 uzoraka, dok su 2 ostala u rezervi. Ispitne pločice su odmašćene i očišćene medicinskim alkoholom kako bi se uklonile bilo kakve nečistoće s površine materijala prije navarivanja te su na tračnoj brusilici skošeni svi oštri bridovi.

5.4. Oprema za navarivanje

U eksperimentalnom dijelu radu korišten je izvor struje zavarivanja za TIG postupak Fronius MagicWave 230i . U tablici 9. prikazana je specifikacija korištenog izvora struje zavarivanja, a slika 29. prikazuje uređaj u Laboratoriju za zavarivanje.



Slika 29. Izvor struje Fronius MagicWave 230i

Upravljanje uređajem vrši se pomoću jedne multifunkcionalne tipke što olakšava namještanje zadanih parametara uz korištenje zaštitnih rukavica. Uređaj je opremljen i jedinicom za hlađenje TIG gorionika.

Tablica 9. Specifikacija izvora struje Fronius MagicWave 230i [22]

Parametar	Vrijednost
Struja zavarivanja/radni ciklus [10min/40°C]	230A / 35%
Struja zavarivanja/radni ciklus [10min/40°C]	195A / 60%
Struja zavarivanja/radni ciklus [10min/40°C]	165A/100%
Radni napon	10,1 – 19,2 V
Napon praznog hoda	100,0 V
Mrežna frekvencija	50 – 60 Hz
Mrežni napon	230 V
Mrežni osigurač	16 A
Dimenzija / b	210,0 mm

Dimenzija / l	558,0 mm
Masa uređaja	17,0 kg
Stupanj zaštite	IP23

Nova generacija Fronius uređaja za zavarivanje olakšava rad zavarivaču pomoću memoriranih funkcija, izbornika na hrvatskom jeziku te dodatne mogućnosti povezivanja Bluetooth uređajem radi lakšeg učitavanja parametara. Pištolj za TIG zavarivanje opremljen je dodatno tipkama za fino upravljanje strujom ili nekim drugim parametrom po izboru, a tu je i LED osvjetljenje na samom držaču pištolja. [22]

5.5. Tijek navarivanja

Zbog nepoznavanja tehnologije navarivanja stelita 12 na crni čelik kao i ponašanja materijala tijekom zavarivanja, izvedeno je probno navarivanje na probnom komadu čelika S235. Nakon nekoliko pokušaja, određena je brzina navarivanja zavarivača (takt zavarivanja), dok su parametri bili određeni prema preporukama proizvođača dodatnog materijala. U tablici 10 prikazani su korišteni parametri navarivanja za svaki uzorak.

Tablica 10. Parametri navarivanja uzoraka

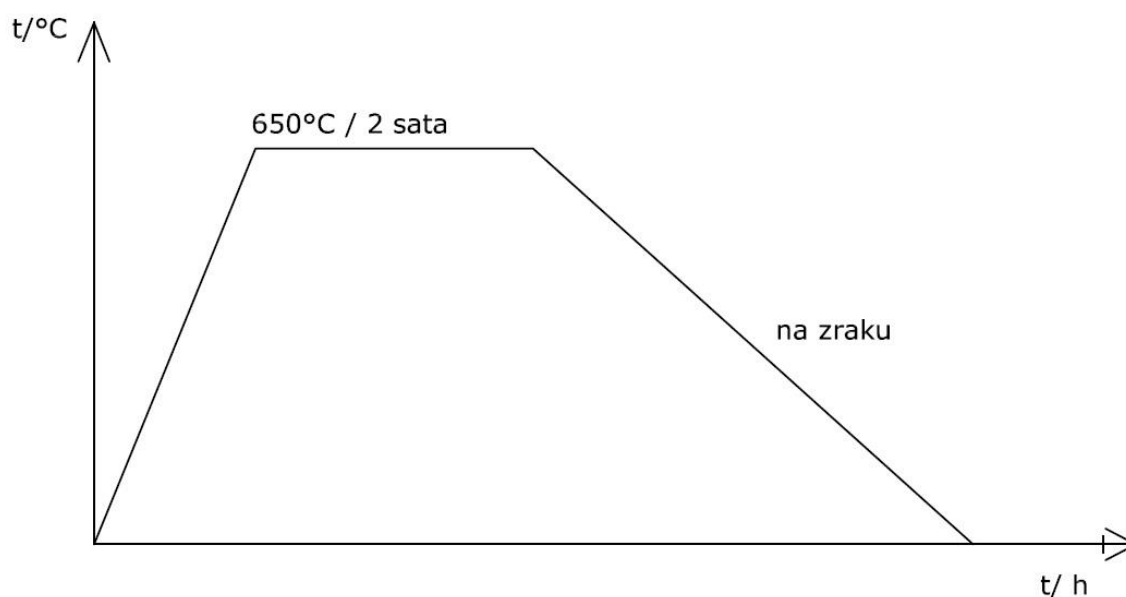
<i>Uzorak</i>	<i>Struja, A</i>	<i>Napon, V</i>	<i>Zaštitni plin</i>	<i>AC balans, %</i>	<i>Temperatura predgrijavanja, °C</i>
A1	175	14	argon 5.0	-	20
A2	175	14	argon 5.0	35	20
A3	175	14	argon H5	-	20
A4	175	14	argon H5	35	20
B1	175	14	argon 5.0	-	220
B2	175	14	argon 5.0	35	220
B3	175	14	argon H5	-	220
B4	175	14	argon H5	35	220

Protok zaštitnog plina je bio 10 l/min. Početna struja kod zavarivanja svih uzoraka bila je 50 % nazivne (88 A) dok je završna struja iznosila 35 % nazivne struje (60A). Kod zavarivanja

izmjeničnom strujom, bilo je potrebno promijeniti vrh elektrode, s obzirom da zavarivanje izmjeničnom strujom traži zaobljeni vrh netaljive elektrode. Brzina zavarivanja bila je 18-20 cm/min konstantno za svaki uzorak.

5.6. Toplinska obrada

Toplinska obrada provedena je u Laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje, a režim toplinske obrade prikazan je na slici 30. Odabrani su uzorci nastali navarivanjem uzoraka A3 i B3 iz kojih su nastali novi uzorci nakon toplinske obrade D1 i D2. Ovi uzorci su izrezani na tračnoj pili, a toplinska obrada će pokazati utjecaj na korozijska svojstva. Na toplinsku obradu poslani su na pola izrezani uzorci C1 i C2 koji su nakon iste dobili novu oznaku C1-TO, C2-TO. Slika 31. prikazuje elektrootpornu komornu peć u kojoj je provedena toplinska obrada.



Slika 30. Režim toplinske obrade



Slika 31. Komorna peč za toplinsku obradu

Toplinska obrada sastojala se od zagrijavanja u peći na 650°C te držanja na toj temperaturi dva sata, nakon čega je slijedilo polagano hlađenje na zraku. Cilj toplinske obrade bila je redukcija zaostalih naprezanja, te promatranje utjecaja na postizive tvrdoće i korozivna svojstva stelita. Pri dugotrajnom žarenju na 650°C , moguća je fazna pretvorba FCC u HCP rešetku, no za takvo ispitivanje je potrebno žarenje 20 sati. Skraćenom toplinskom obradom, željelo se postići slično stanje.

5.7. Izrada makroizbrusaka

Makroizbrusci su izrađeni rezanjem na tračnoj pili za metal što je i prikazano na slici 32. Ukupno je provedeno 10 rezanja, a zbog velike tvrdoće navarenog sloja, u tijeku rezanja došlo je do intenzivnog zatupljenja oštrice pile. Nakon rezanja, izvršeno je grubo brušenje na tračnoj brusilici s granulacijom P80 kako bi se poravnala površina potrebna za fino brušenje.



Slika 32. Rezanje uzoraka na tračnoj pili

Fino brušenje provedeno je brusnim papirima prema redoslijedu veličine zrna: P120, P150, P240, P320, P400, P500 i P600. Kod promjene brusnog papira, mijenja se i smjer brušenja rotacijom izbruska za 90°. Nakon brušenja, uzorci su očišćeni u 70% medicinskom alkoholu i nagriženi u otopini NITAL-a (3% HNO₃) na sobnoj temperaturi u trajanju od 30 sekundi. Na slici 33. prikazani su uzorci neposredno nakon čišćenja u Laboratoriju za zavarene konstrukcije.



Slika 33. Čišćenje uzoraka u medicinskom alkoholu

5.8. Provedba korozijskog ispitivanja

Legure stelita imaju vrlo dobro otpornost na koroziju u slanoj vodi, dok je otpornost na rupičastu koroziju nešto slabija. U svrhu ispitivanja otpornosti na rupičastu koroziju, korištena je američka norma ASTM G48 koja se izvorno koristi za ispitivanje korozije nehrđajućih čelika. Ova norma se dijeli na metodu A i B, a u ovom radu je korištena prva metoda A koja vrijedi za rupičastu koroziju. Agresivna otopina nagriza sve što je uronjeno u posudu, stoga je bilo nužno izolirati osnovni materijal od agresivnog utjecaja. U ovom slučaju korištena je izolacijska traka STOPAQ proizvođača SealForLife Industries prikazana zajedno s ostalom opremom na slici 34.



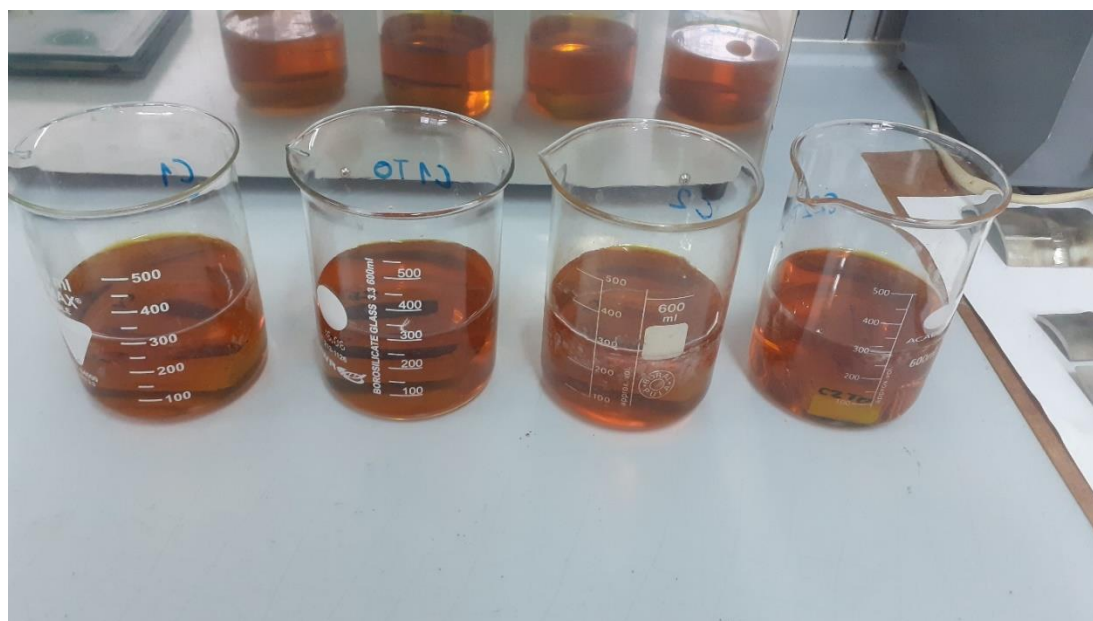
Slika 34. Postupak izolacije osnovnog materijala [23]

STOPAQ izolacijska masa izrađena je od amorfno polimera koji ima odličnu nepropusnost na kisik, vlagu, bakterije i ostale uzročnike korozije. Temperaturna otpornost kreće se od -40 °C do 95 °C. Karakterizira ga vrlo velika mogućnost oblikovanja i lakog prianjanja na gotovo sve površine bez potrebe za posebnim pripremanjima. Osim u laboratorijskim ispitivanjima korozije, ovaj materijal koristi se za izolaciju cjevovoda, odnosno dodatnu zaštitu zavarenih spojeva u sektoru naftovoda i plinovoda. [23]

Nakon izoliranja uzoraka, pripravljena je otopina FeCl_3 (željezov (III) klorid) koncentracije 10% u vodi. Ispitivanje je provedeno na sobnoj temperaturi $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ u trajanju 48 sati. Na slici 35. prikazani su uzorci nakon pripreme, odnosno na slici 36. uzorci uronjeni u otopinu na početku ispitivanja.



Slika 35. Izolirani uzorci stelita



Slika 36. Korozijsko ispitivanje na rupičastu koroziju




6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

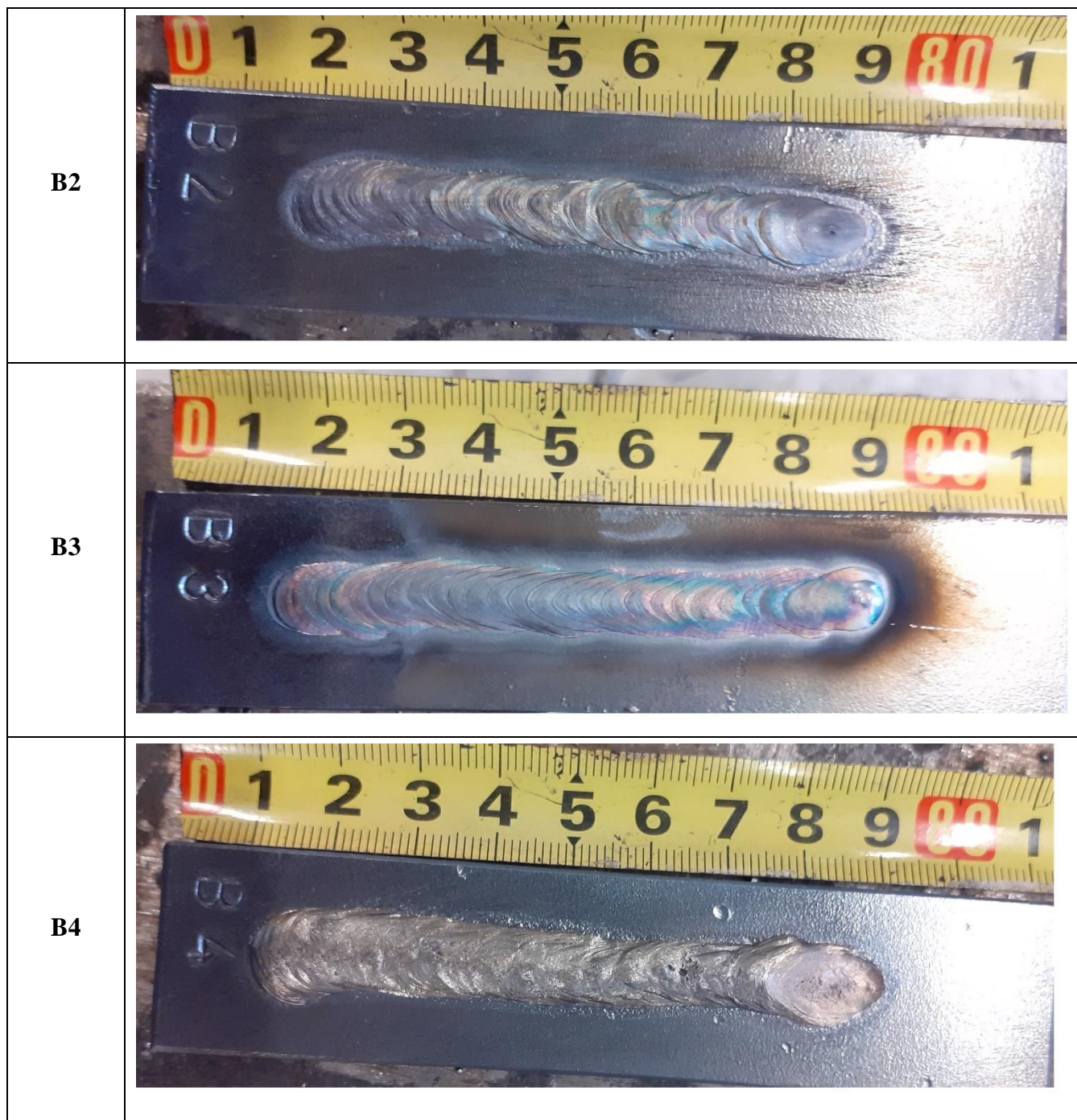
6.1. Rezultati vizualne kontrole

Vizualna metoda definirana je normom HRN EN ISO 9712. Metoda se može primjenjivati prije, za vrijeme i nakon navarivanja. Ispitivanje je vrlo jednostavno i provodi se na dnevnoj ili umjetnoj svjetlosti minimalne rasvijetljenosti 350 lx, a udaljenost oka od predmeta mjerenja ne smije biti veća od 600 mm. Kut gledanja na predmet ispitivanja, mora biti minimalno 30° od horizontalne osi. Provedbom ovog ispitivanja, moguće je odrediti površinske pogreške navarenih slojeva, stanje površine, dimenzijska mjerenja geometrije i deformacija navara. Prilikom navarivanja, kod svih uzoraka nije bilo pojave štrcanja električnog luka, što je i očekivano za TIG postupak. U tablici 11. prikazani su uzorci nakon navarivanja. [24]

Tablica 11. Vizualna kontrola uzoraka

Uzorak	Izgled
A1	 A photograph of a welded metal sample labeled 'A1'. The sample is a dark grey metal plate with a horizontal weld bead. The weld bead has a distinct, slightly raised, and somewhat irregular profile. A yellow measuring tape is placed above the sample, showing a scale from 1 to 10 centimeters. The weld bead is approximately 5 cm long.
A2	 A photograph of a welded metal sample labeled 'A2'. The sample is a dark grey metal plate with a horizontal weld bead. The weld bead has a more pronounced, rounded, and slightly irregular profile compared to sample A1. A yellow measuring tape is placed above the sample, showing a scale from 1 to 10 centimeters. The weld bead is approximately 5 cm long.

<p>A3</p>	 A photograph of a metal specimen labeled 'A3' with a weld. A yellow ruler is placed above the specimen for scale, showing markings from 0 to 9 cm. The weld is a single, somewhat irregular bead with a rounded end on the right side.
<p>A4</p>	 A photograph of a metal specimen labeled 'A4' with a weld. A yellow ruler is placed above the specimen for scale, showing markings from 0 to 9 cm. The weld is a single, more uniform bead with a rounded end on the right side.
<p>B1</p>	 A photograph of a metal specimen labeled 'B1' with a weld. A yellow ruler is placed above the specimen for scale, showing markings from 9 cm to 8 cm. The weld is a single, uniform bead with a rounded end on the right side.




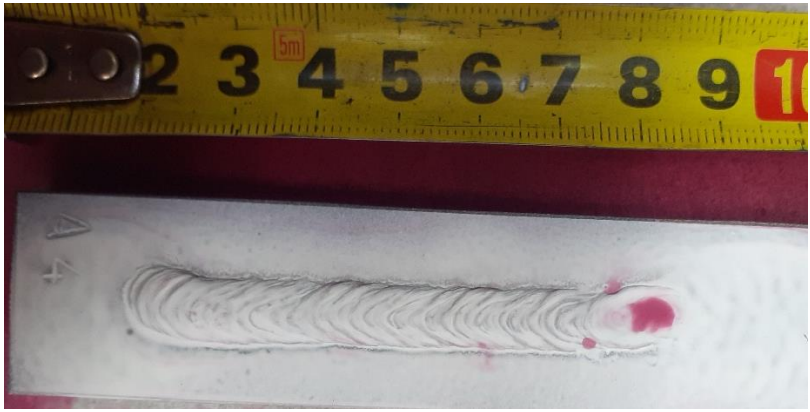

Iz tablice 11, vidljiva su lica navarenih slojeva. Uzorci A1, A3 te B1 i B3 na kojima je korištena istosmjerna struja, imaju bolju estetiku navara, dok se na uzorcima gdje je korištena izmjenična struja (AC) vidi gruba površina lica zavara. Prema riječima zavarivača, na uzorcima koji su navarivani u zaštiti plinske mješavine 5% H i 95% Ar, električni luk ponašao se mirnije.




6.2. Rezultati NDT ispitivanja penetrantima

Pri ispitivanju penetrantima, potrebno je prethodno ispuniti uvjete promatranja, pa se ovaj zahtjev ispunio i u ovom slučaju. Uvjeti promatranja su dovoljna osvijetljenost ispitivane površine (min. 500 lux) te izbjegavanje sjena i refleksija. Ispitivanje je provedeno pod umjetnim svjetlom u Laboratoriju za zavarivanje. Ispitivanje je započelo čišćenjem uzoraka, a nakon nanošenja obojenog penetranta, čekalo se 10 minuta da penetrant popuni eventualne nepravilnosti. Uzorci su isprani u vodi i nanesen je sloj razvijaača bijele boje. Unutar sljedećih 10 minuta, došlo je do razvijanja indikacija. U tablici 12 prikazani su uzorci s pripadajućim indikacijama nakon ispitivanja. [24]

Tablica 12. Rezultati ispitivanja penetrantima

Uzorak	Indikacije
A1	
A2	

<p>A3</p>	
<p>A4</p>	
<p>B1</p>	

B2	 A photograph of a metal specimen labeled B2. The specimen is a long, thin, cylindrical piece of metal with a series of concentric rings or grooves along its length. At the right end, there is a distinct red stain, likely from a penetrant test. The specimen is placed on a white surface, and a yellow ruler is visible above it, showing markings from 2 to 10 cm.
B3	 A photograph of a metal specimen labeled B3. The specimen is a long, thin, cylindrical piece of metal with a series of concentric rings or grooves along its length. At the right end, there is a distinct red stain, likely from a penetrant test. The specimen is placed on a white surface, and a yellow ruler is visible above it, showing markings from 2 to 10 cm.
B4	 A photograph of a metal specimen labeled B4. The specimen is a long, thin, cylindrical piece of metal with a series of concentric rings or grooves along its length. At the right end, there is a distinct red stain, likely from a penetrant test. The specimen is placed on a white surface, and a yellow ruler is visible above it, showing markings from 2 to 10 cm.

Nakon provedenog ispitivanja obojenim penetrantima, može se zaključiti kako se indikacije na svim uzorcima od A1 do B4 nalaze isključivo na mjestu završetka navara.

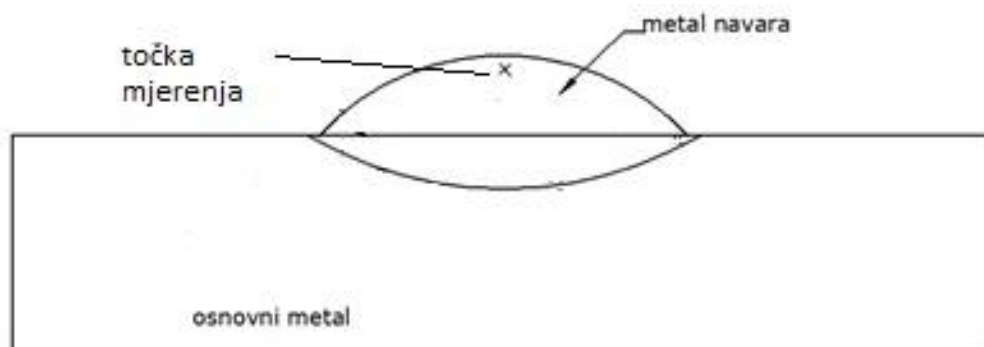
6.3. Analiza kemijskog sastava XRF metodom

Određivanje kemijskog sastava uzoraka, provedeno je XRF metodom odnosno uređajem za rendgensku fluorescentnu analizu u Laboratoriju za zaštitu materijala. Rezultati ispitivanja zasnivaju se na principu mjerenja energije X- zračenja. Na slici 37. prikazan je prijenosni uređaj za analizu kemijskog sastava metala.



Slika 37. Uređaj za analizu kemijskog sastava Innov - X Systems

Analizom kemijskog sastava, dobivene su vrijednosti prikazane u tablici 13. Vrijednosti u tablici su prosjek tri uzastopna mjerenja. Na slici 38. prikazane su točke na kojima je provedeno mjerenje.



Slika 38. Mjesto mjerenja kemijskog sastava

Tablica 13. Kemijski sastav navara stelita

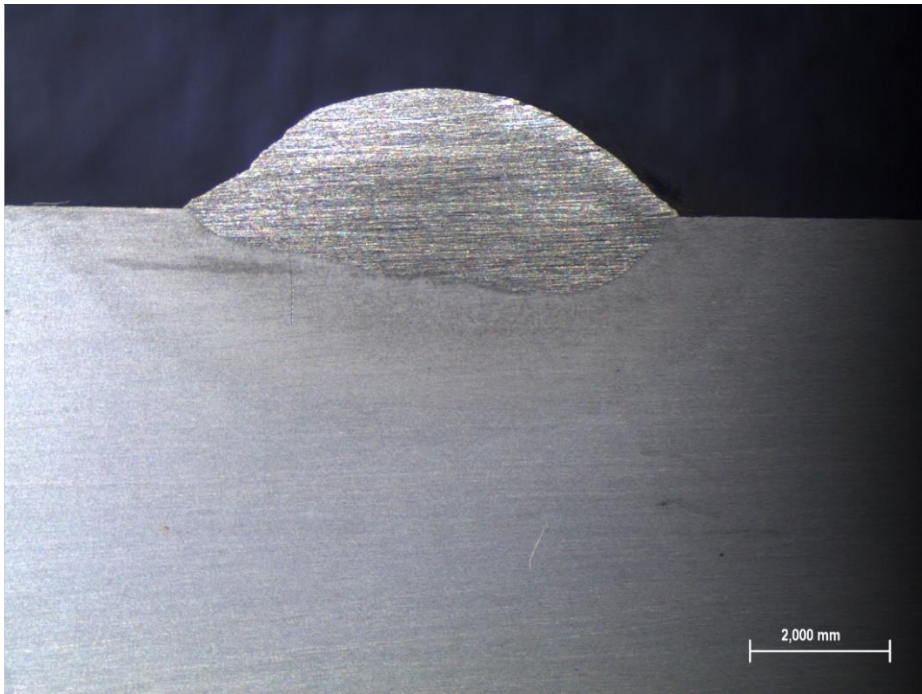
Kemijski sastav, %						
Co	Cr	Fe	Mn	Mo	Pb	W
4,03	2,65	90,99	0,82	0,118	0,127	1,27

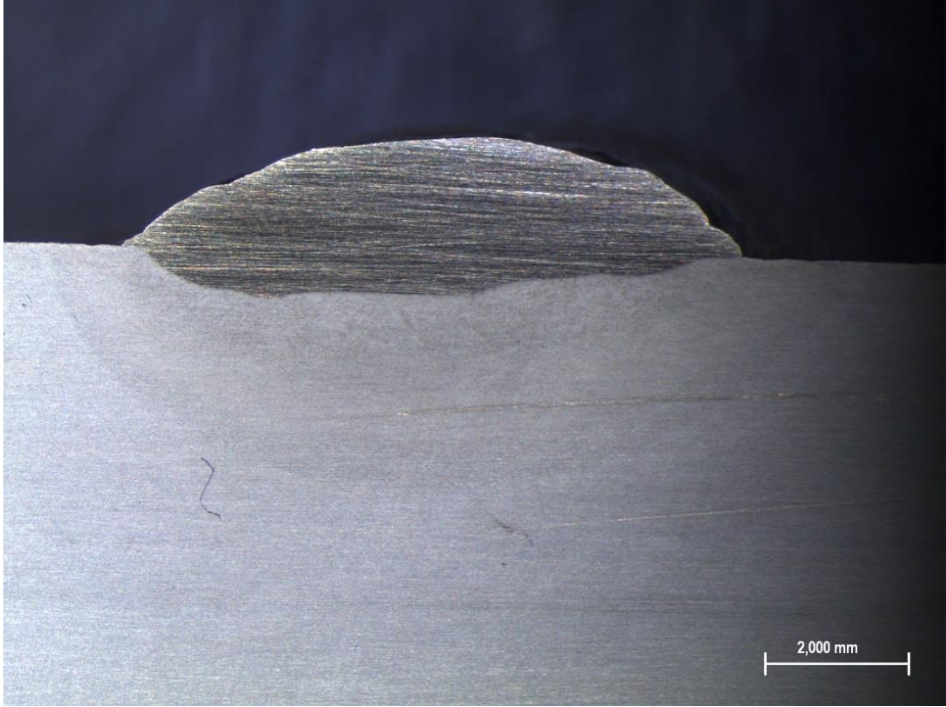
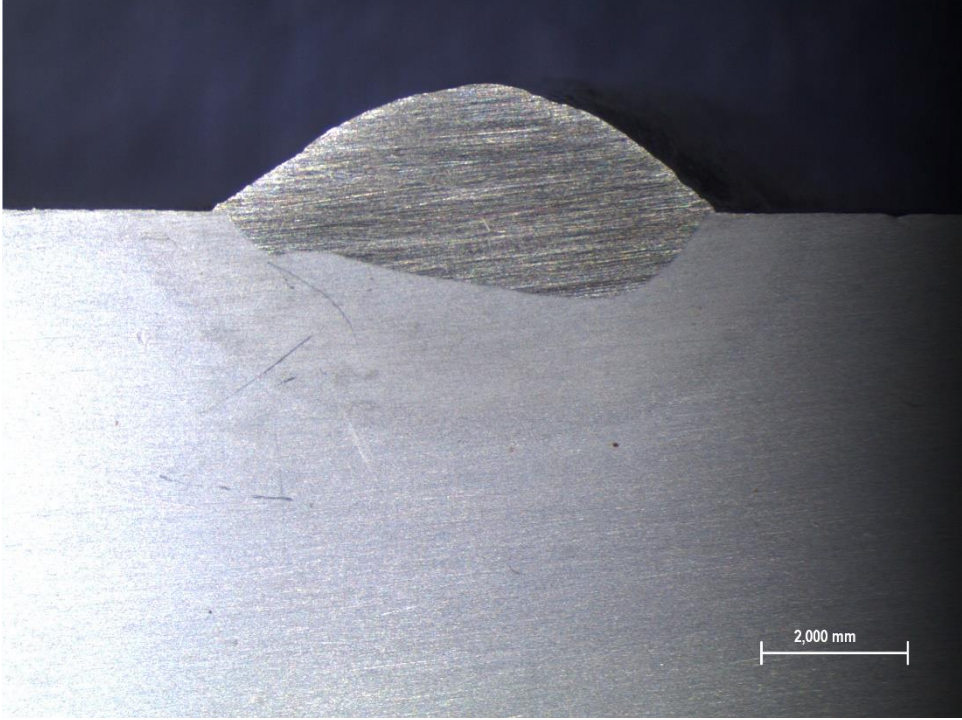
Usporedbom rezultata kemijskog sastava navara sa kemijskim sastavom stelita 12 iz tablice 2, vidljive su velike razlike u danim vrijednostima. U metalu navara došlo je do velikog udjela miješanja sa osnovnim materijalom, stoga se preporuča navarivanje stelita u više slojeva s manjim unosom topline.

6.4. Analiza makroizbrusaka

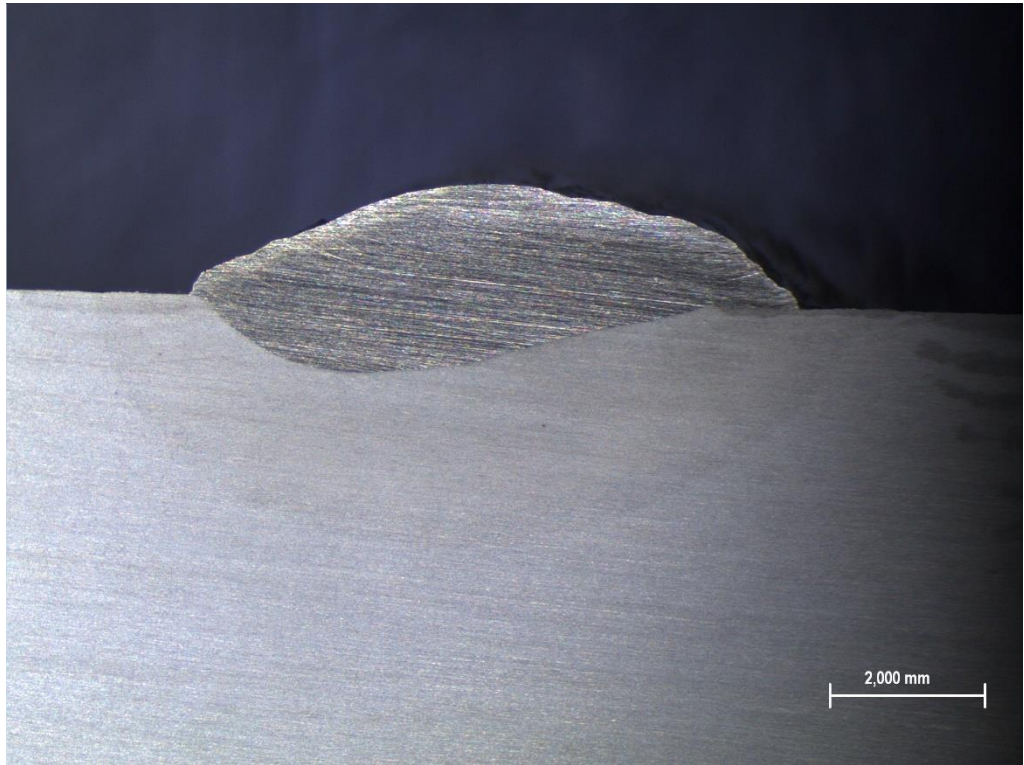
Metalografsko ispitivanje navarenih slojeva, neizostavno je u području zavarenih konstrukcija. Nagrizanjem uzoraka, dobivena je makrostruktura uzoraka. Snimanje uzoraka provedeno je u laboratoriju za zaštitu materijala na mikroskopu Leica MZ6. Svi uzorci snimljeni su s povećanjem 10x . Izoštavanjem slike i promjenom kuta svjetla, moguće je postići bolju vidljivost ZUT-a. Tablica 14 prikazuje makroizbruske uzoraka.

Tablica 14. Makrostruktura uzoraka

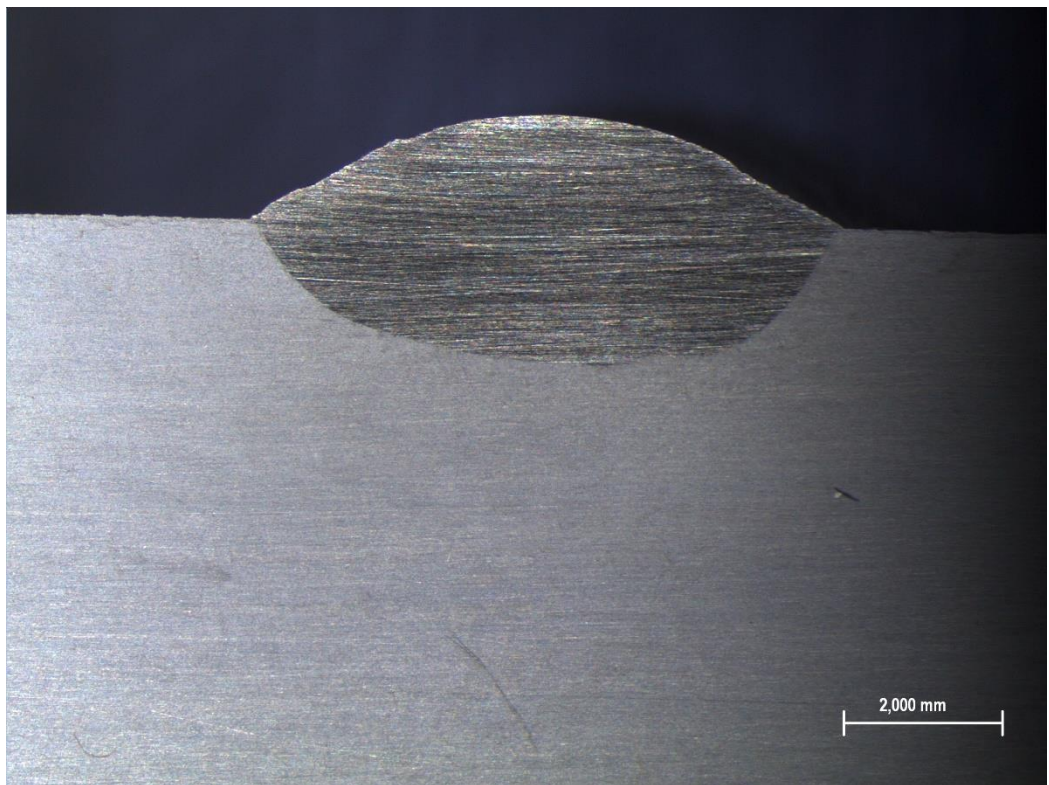
Uzorak	Makrostruktura
A1	

<p>A2</p>	
<p>A3</p>	

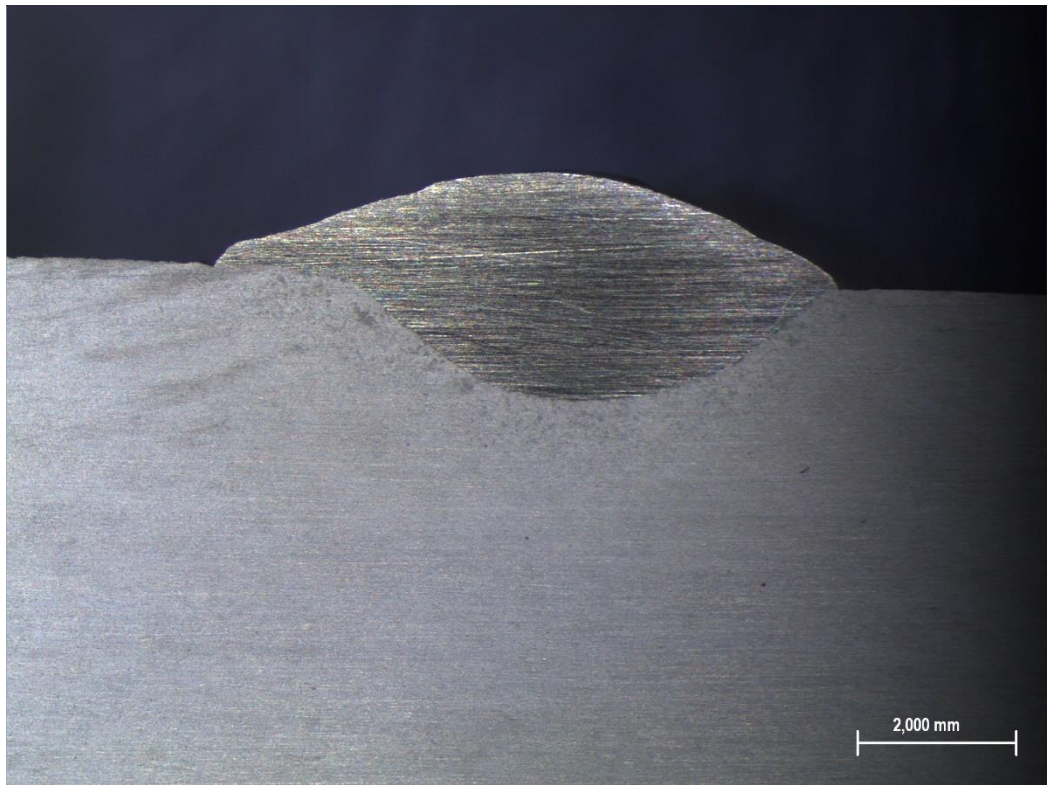
A4



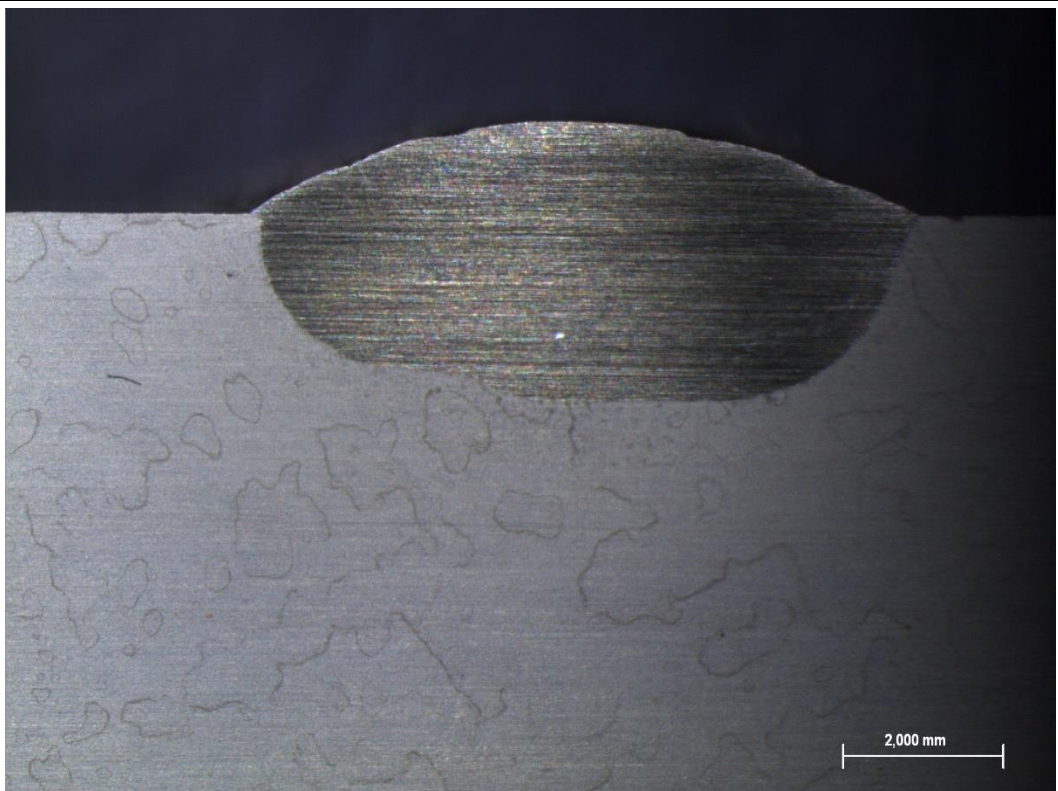
B1



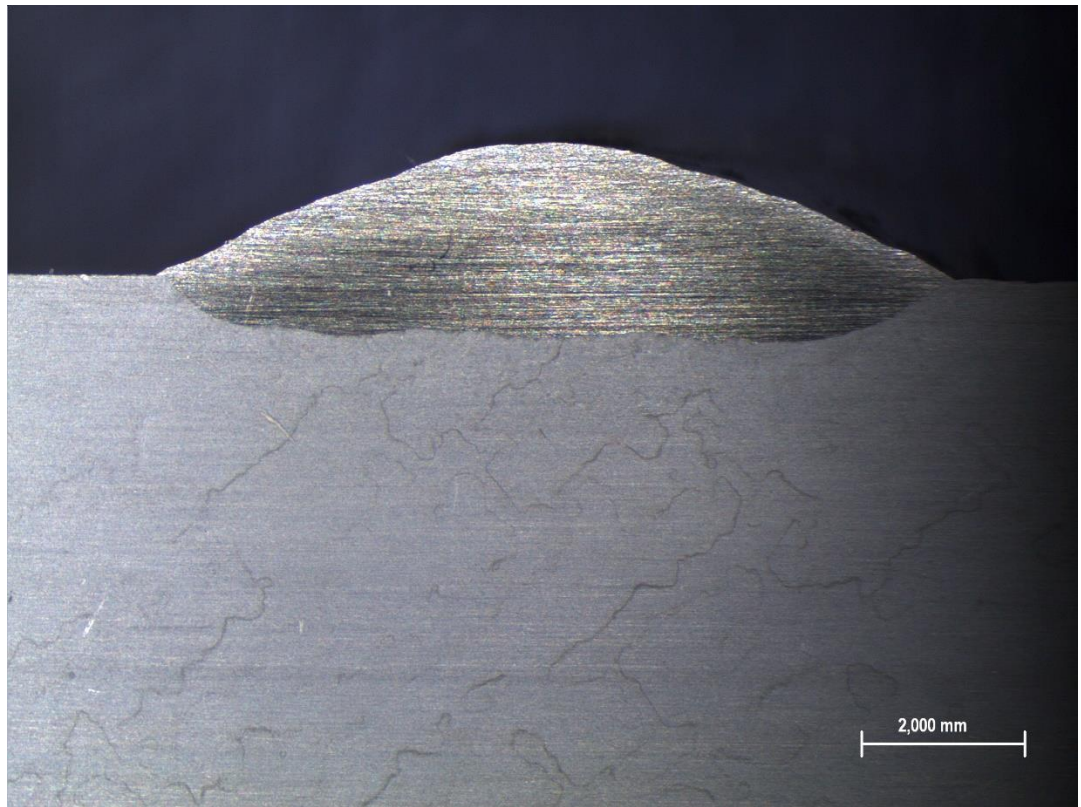
B2



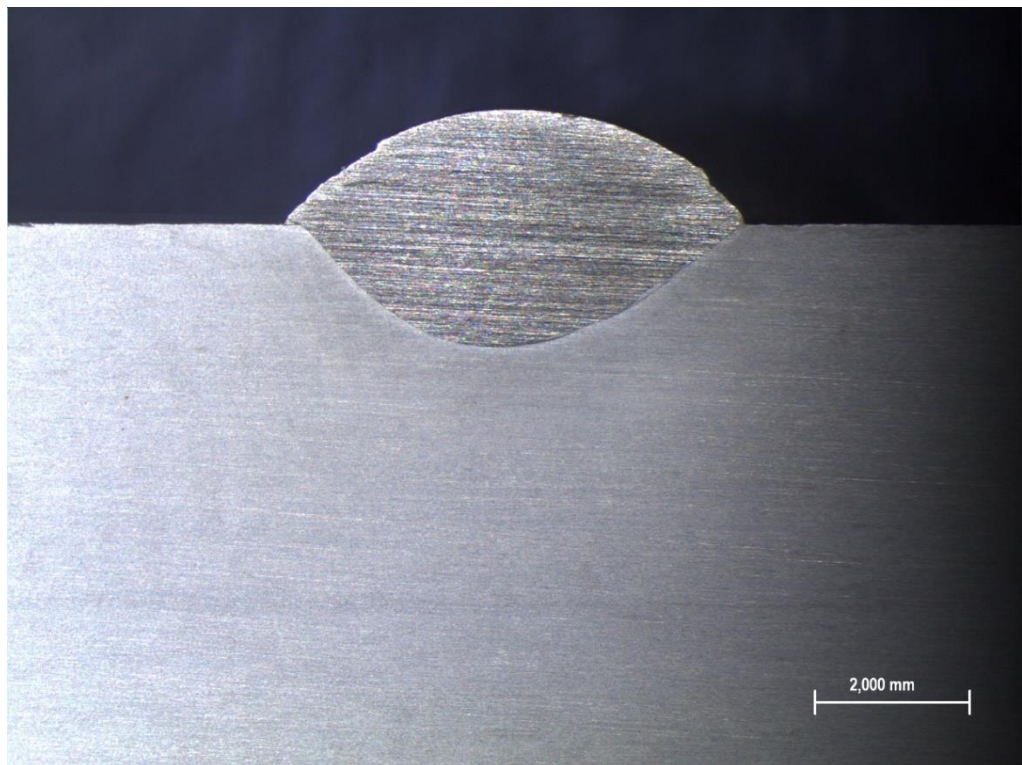
B3

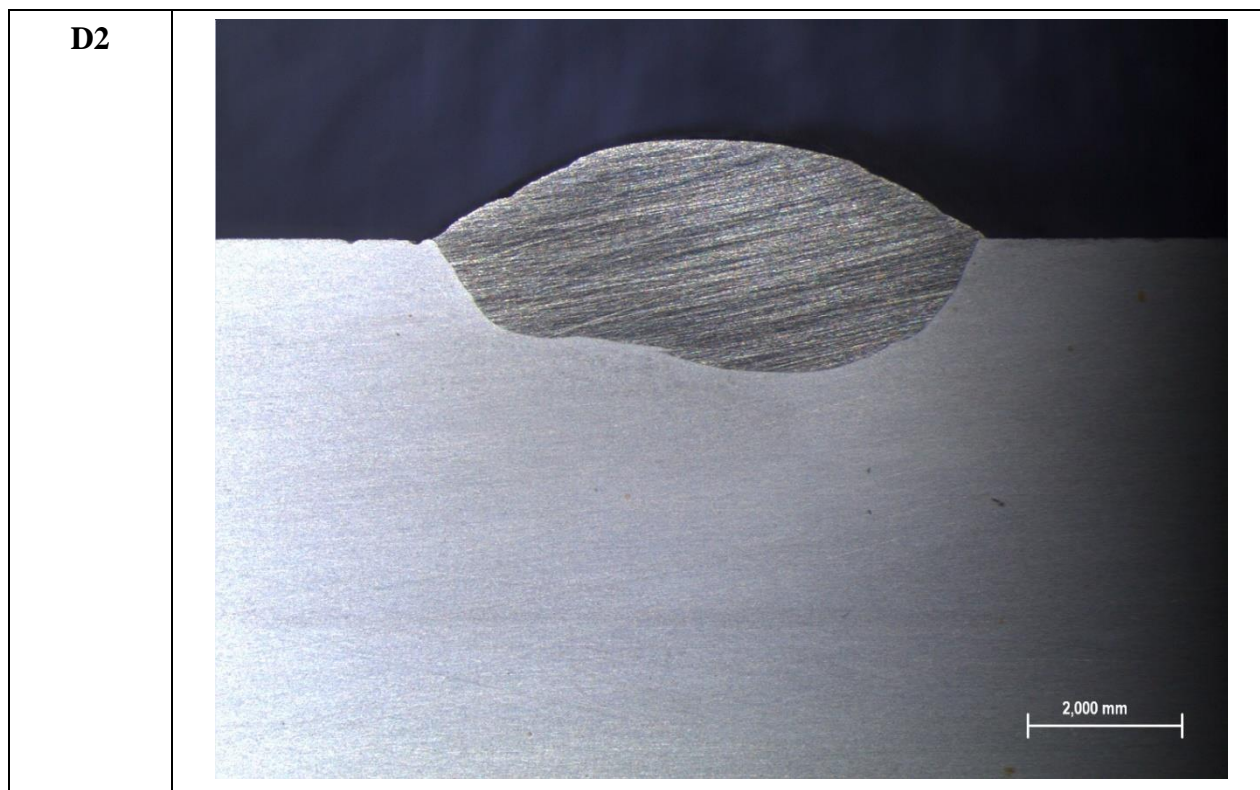


B4



D1





Na uzorcima koji nisu prethodno predgrijani (A1 , A2 , A3 , A4 i D1), jasno je vidljiva makrostrukura ZUTa, dok se linija staljivanja između metala zavara i ZUT-a jasno vidi na svim makroizbruscima. Unos topline uzrokovao je slabiju uočljivost zone utjecaja topline kod uzoraka B1, B2, B3, B4.

6.5. Rezultati korozijskog ispitivanja na rupičastu koroziju

Provedeno je ispitivanje metala navara stelita na rupičastu koroziju prema normi ASTM G48 u otopini FeCl_3 (željeznog klorida) koncentracije 10 %. Nakon ispitivanja na temperaturi od 20 °C i trajanju od 48 sati. Nakon ispiranja u vodi i čišćenja 70% alkoholom, uzorci su pregledani mikroskopom Leica. Cilj ispitivanja je bio ustanoviti korodira li ova legura rupičastom korozijom i kako na to utječe toplinska obrada. Na slikama 39, 40, 41 i 42 prikazane su površine svih 4 uzorka pod uvećanjem 10x.



Slika 39. Uzorak C1 nakon korozije



Slika 40. C1TO uzorak nakon korozije

Na svim uzorcima nakon provedenog korozijskog ispitivanja uočena je promjena boje na mjestu spoja izolacijske mase i metala navara.



Slika 41. C2 uzorak nakon korozije



Slika 42. C2TO uzorak nakon korozije

Toplinska obrada nije dovela do razlike u korozivnoj otpornosti što je vidljivo iz usporedbe uzoraka C1 i C1TO te C2 i C2TO. Navedeno ispitivanje ne može potvrditi značajnu otpornost legure stelita 12 na rupičastu koroziju. Korozivnim ispitivanjem očekivana je pojava ovog tipa korozije zbog činjenice da čisti stelit 12 korodira mehanizmom rupičaste korozije poput nehrđajućih čelika. U svrhu dodatnih ispitivanja na ovu temu, može se preporučiti ispitivanje s uzorcima gdje je tvrda legura navarena u više slojeva uz dulje ispitivanje.

6.6. Rezultati mjerenja tvrdoće

Tvrdoća je mjerena u laboratoriju za zavarivanje metodom po Vickersu zbog širokog raspona mjernog područja. Tvrdoća nije ovisna o primijenjenoj sili, a penetrator je istostrana četverostrana piramida s kutem vrha od 136° . Mjerenje se sastoji od utiskivanja penetratora u materijal nakon kojeg ostaje otisak oblika piramide. Preciznim mikroskopom mjeri se duljina dijagonala d_1 i d_2 . Za izračun tvrdoće uzima se srednja vrijednost dviju dijagonala, a konačna tvrdoća računa se prema izrazu:

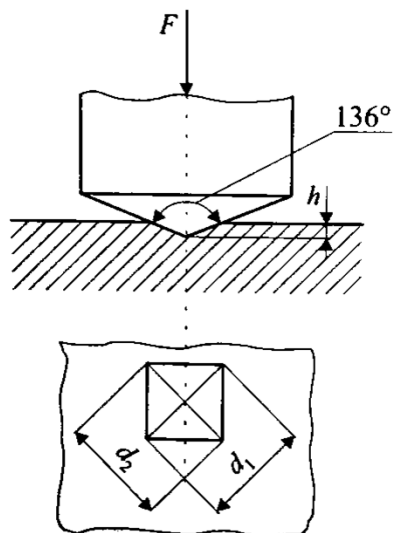
$$HV = \frac{F \times 0,189}{d^2} \quad (4)$$

gdje je:

F – primijenjena sila

d – srednja vrijednost dijagonala baze u mm. [25]

Slika 43. prikazuje skicu penetratora i otiska u materijalu, dok slika 44. prikazuje uređaj BRIVISOR KL 2 na kojem je provedeno mjerenje tvrdoće u Laboratoriju za zavarivanje. [17]

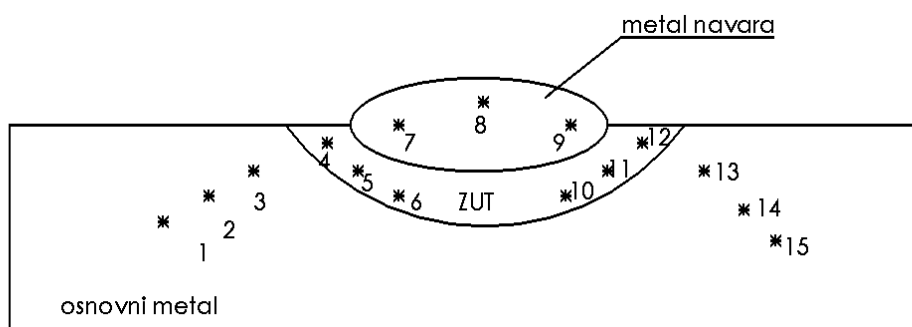


Slika 43. Skica penetratora i otiska kod Vickers metode [25]



Slika 44. Uređaj za mjerenje tvrdoće po Vickersu

Slika 45. prikazuje shematski mjesta mjerenja po poprečnom presjeku navara uzorka.

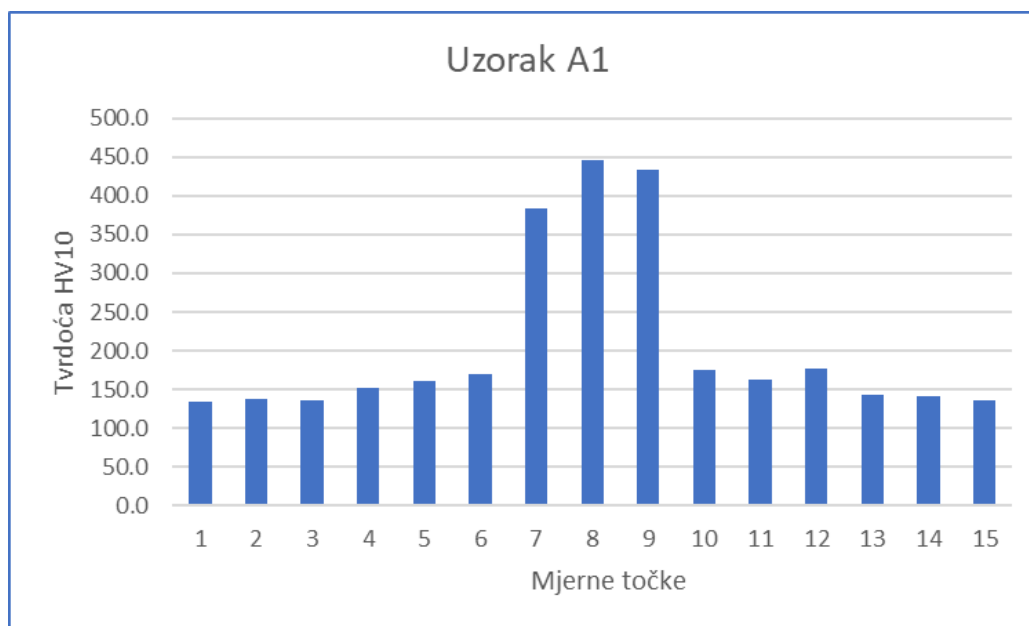


Slika 45. Mjesta mjerenja tvrdoće

Na slikama od 46. do 56. prikazano je kretanje vrijednosti tvrdoće po poprečnom presjeku, a u tablicama od 15. do 25. prikazane su izmjerene vrijednosti tvrdoće za sve uzorke .

Tablica 15. Vrijednosti tvrdoće uzorka A1

Uzorak A1		
Točka	Tvrdoća HV10	Područje mjerenja
1	133,3	OM
2	136,9	
3	135,5	
4	151,4	ZUT
5	160,0	
6	170,0	
7	383,0	MZ
8	446,0	
9	433,0	
10	175,0	ZUT
11	163,0	
12	177,0	
13	143,1	OM
14	141,5	
15	135,5	

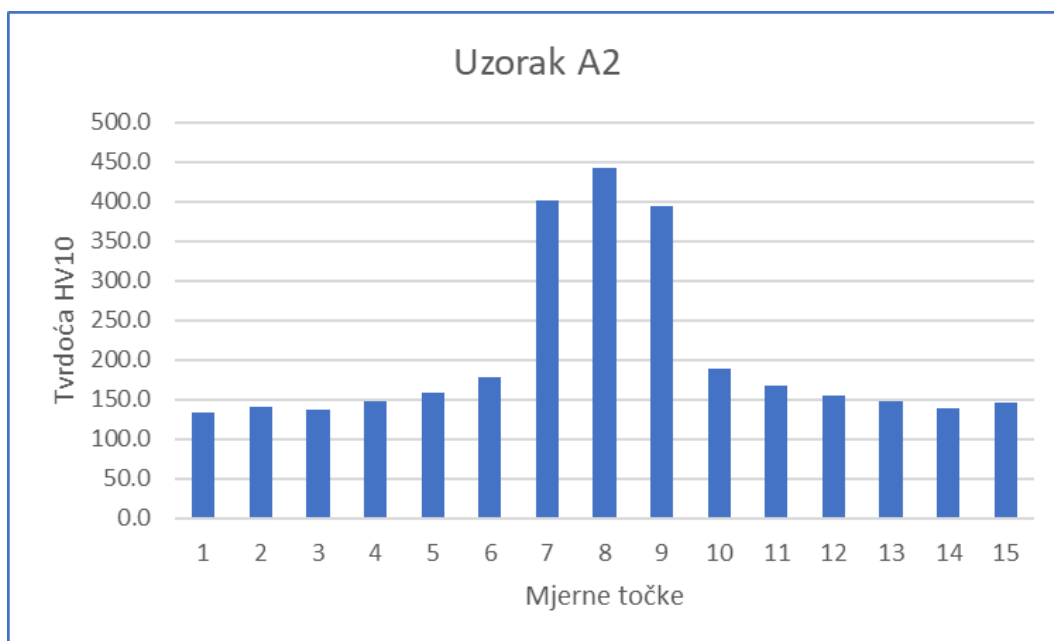


Slika 46. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka A1

Na slici 46 vidljivo je kako tvrdoća stelita odskače u vrijednostima od osnovnog materijala.

Tablica 16. Vrijednosti tvrdoće uzorka A2

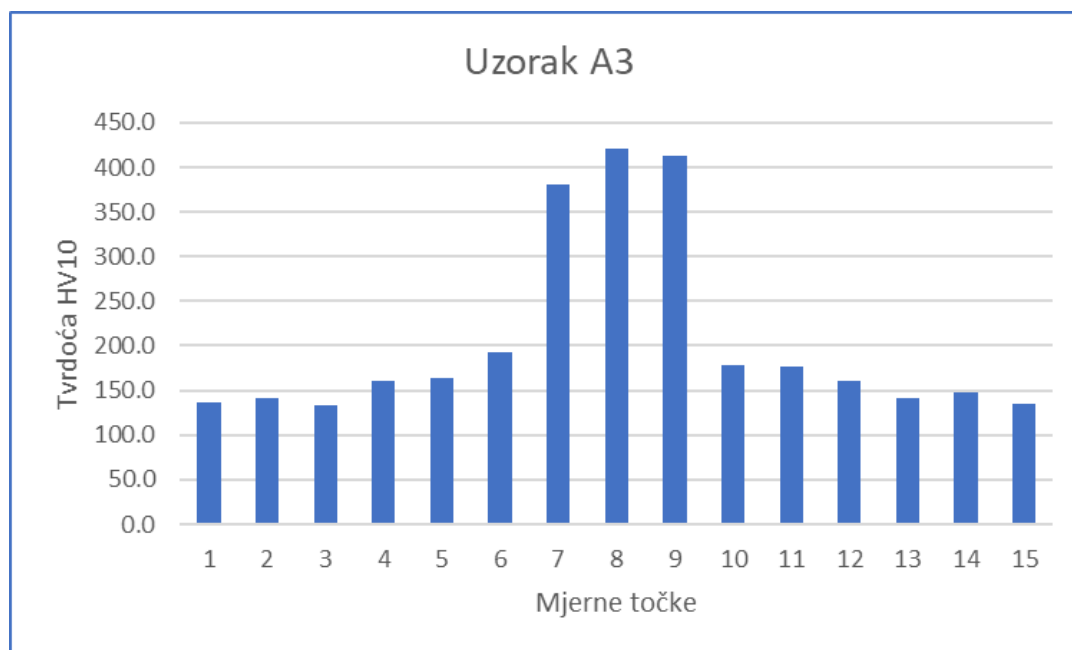
Uzorak A2		
Točka	Tvrdća HV10	Područje mjerenja
1	134,0	OM
2	140,0	
3	137,0	
4	148,0	ZUT
5	159,0	
6	178,0	
7	401,0	MZ
8	442,0	
9	394,0	
10	188,0	ZUT
11	168,0	
12	155,0	
13	148,0	OM
14	139,2	
15	145,5	



Slika 47. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka A2

Tablica 17. Vrijednost tvrdoće uzorka A3

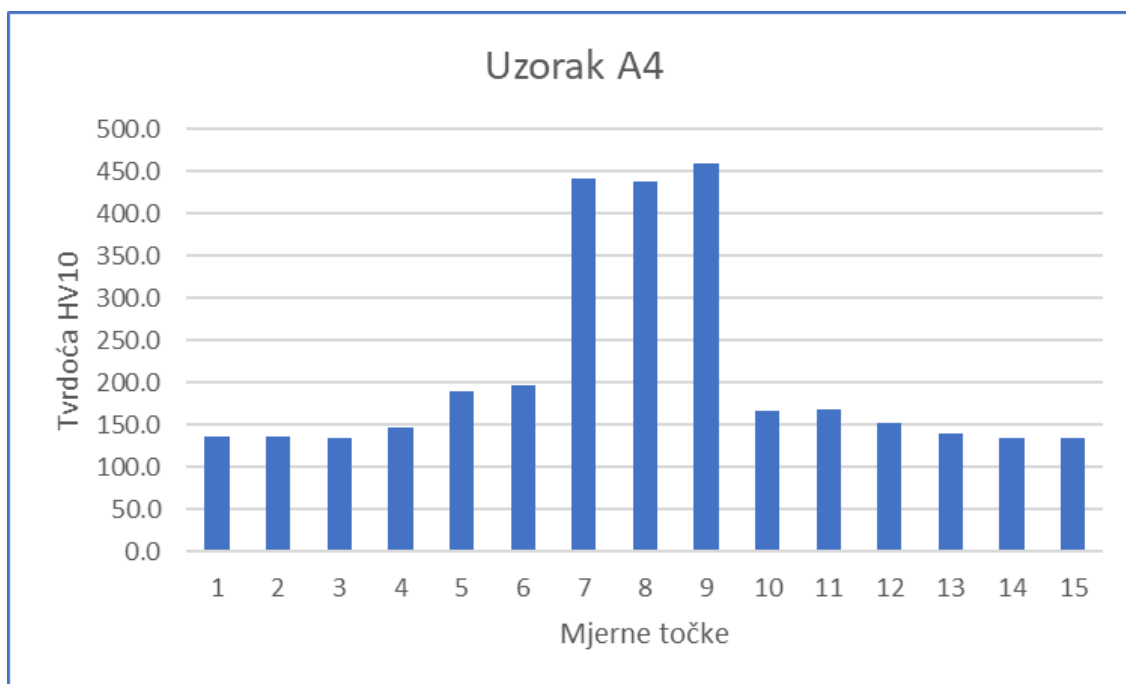
Uzorak A3		
Točka	Tvrdoća HV10	Područje mjerenja
1	136,9	OM
2	141,5	
3	134,0	
4	160,0	ZUT
5	164,0	
6	192,0	
7	380,0	MZ
8	421,0	
9	413,0	
10	179,0	ZUT
11	176,0	
12	160,0	
13	141,5	OM
14	148,0	
15	135,5	



Slika 48. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka A3

Tablica 18. Vrijednost tvrdoće uzorka A4

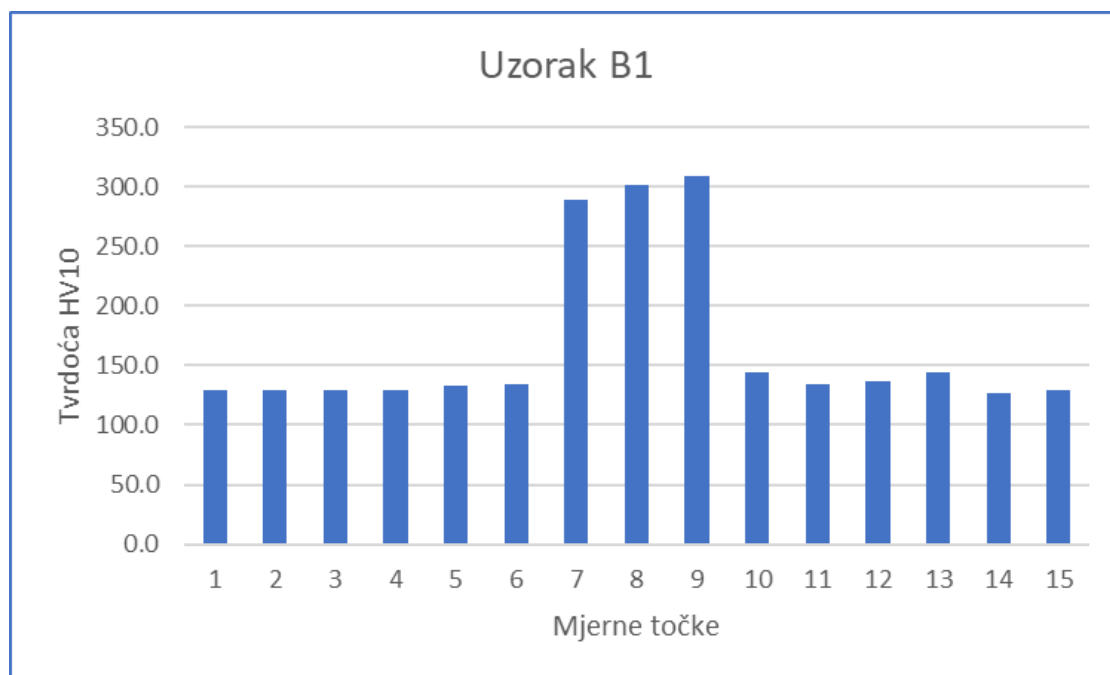
Uzorak A4		
Točka	Tvrdoća HV10	Područje mjerenja
1	136,9	OM
2	136,2	
3	134,0	
4	147,1	ZUT
5	189,0	
6	197,0	
7	442,0	MZ
8	437,0	
9	459,0	
10	167,0	ZUT
11	168,0	
12	153,0	
13	139,2	OM
14	135,0	
15	134,0	



Slika 49. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka A4

Tablica 19. Vrijednost tvrdoće uzorka B1

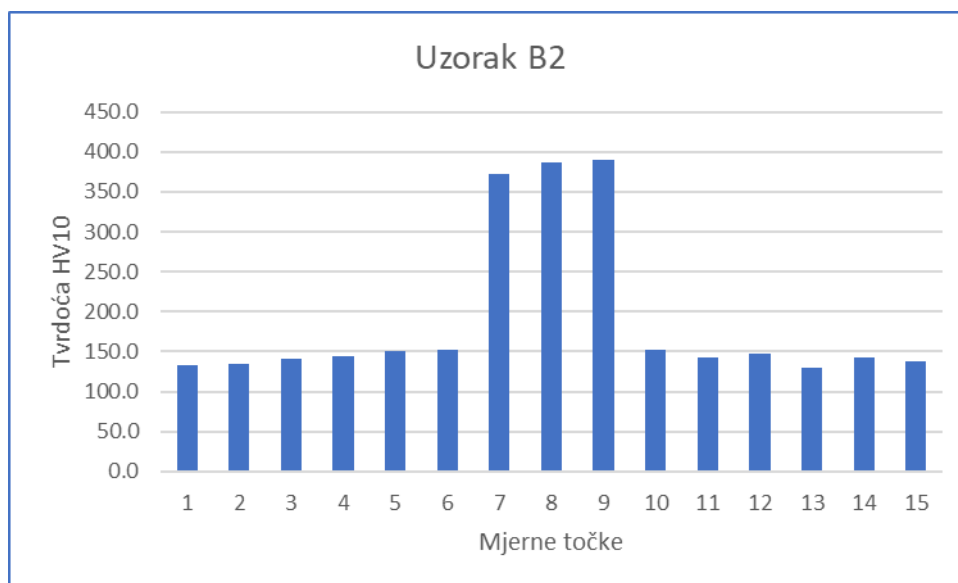
Uzorak B1		
Točka	Tvrdoća HV10	Područje mjerenja
1	129,8	OM
2	129,1	
3	129,1	
4	129,8	ZUT
5	133,3	
6	134,7	
7	289,0	MZ
8	302,0	
9	309,0	
10	143,9	ZUT
11	134,7	
12	136,2	
13	144,7	OM
14	126,4	
15	129,1	



Slika 50. Grafički prikaz kretanja tvrdoće za uzorak B1

Tablica 20. Vrijednost tvrdoće uzorka B2

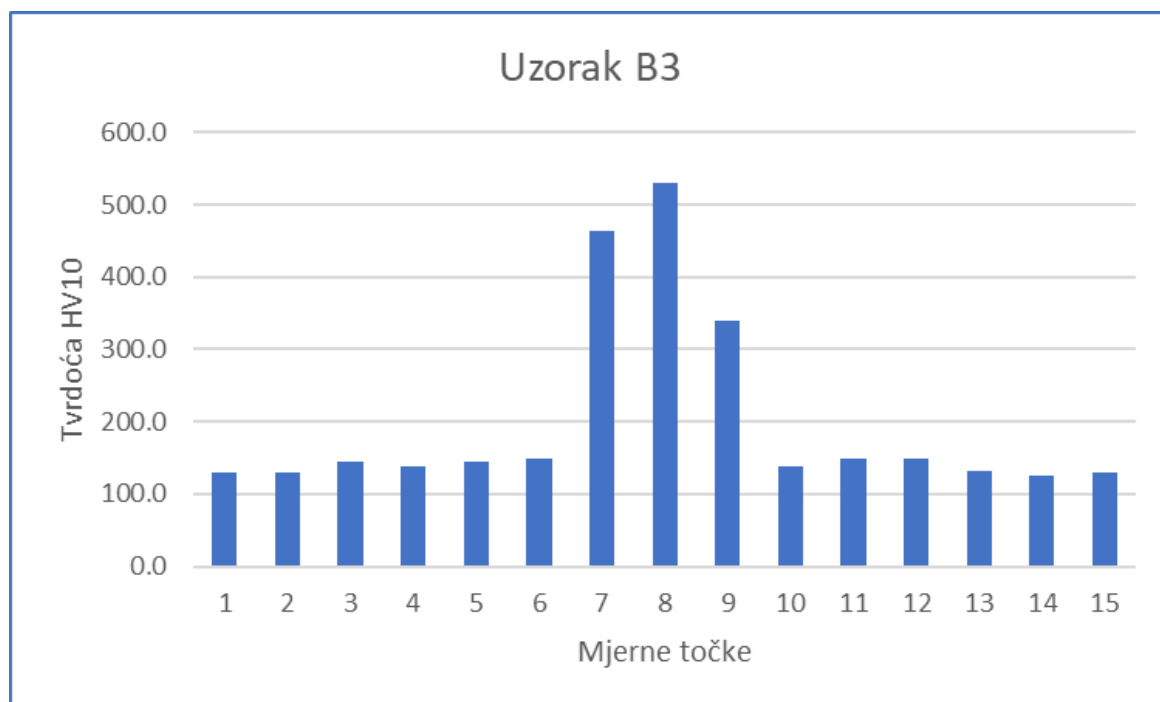
Uzorak B2		
Točka	Tvrdoća HV10	Područje mjerenja
1	133,0	OM
2	134,7	
3	140,7	
4	143,9	ZUT
5	151,4	
6	153,0	
7	373,0	MZ
8	387,0	
9	390,0	
10	152,0	ZUT
11	143,1	
12	147,1	
13	129,8	OM
14	143,1	
15	137,7	



Slika 51. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka B2

Tablica 21. Vrijednost tvrdoće uzorka B3

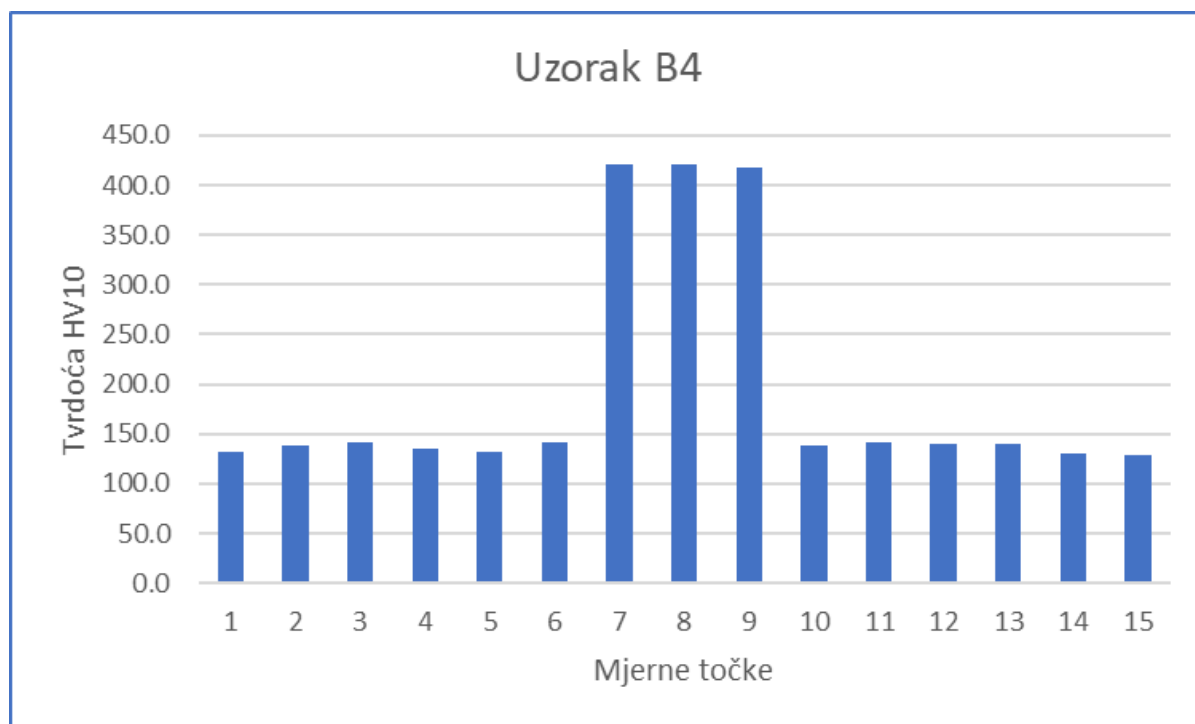
Uzorak B3		
Točka	Tvrdća HV10	Područje mjerenja
1	129,9	OM
2	130,5	
3	143,9	
4	139,2	ZUT
5	144,7	
6	148,8	
7	464,0	MZ
8	530,0	
9	339,0	
10	138,4	ZUT
11	148,0	
12	148,8	
13	131,2	OM
14	124,4	
15	130,5	



Slika 52. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka B3

Tablica 22. Vrijednost tvrdoće uzorka B4

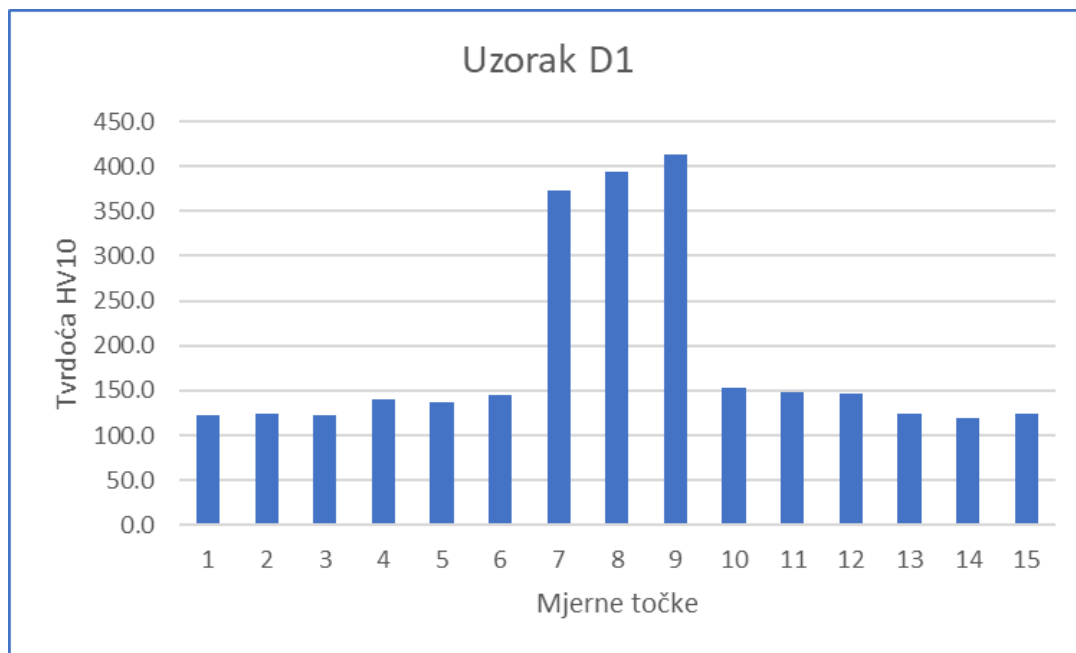
Uzorak B4		
Točka	Tvrdoća HV10	Područje mjerenja
1	132,6	OM
2	138,4	
3	141,5	
4	135,5	ZUT
5	131,9	
6	142,3	
7	421,0	MZ
8	421,0	
9	417,0	
10	138,4	ZUT
11	142,3	
12	139,2	
13	140,0	OM
14	130,5	
15	129,0	



Slika 53. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka B4

Tablica 23. Vrijednost tvrdoće uzorka D1

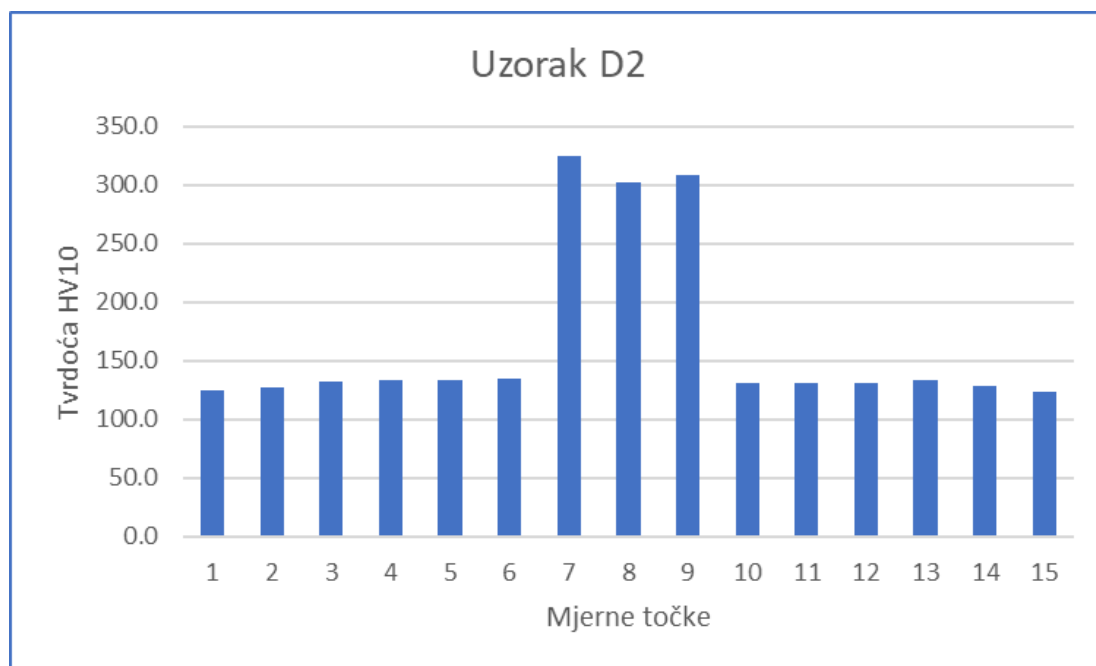
Uzorak D1		
Točka	Tvrdoća HV10	Područje mjerenja
1	121,9	OM
2	124,5	
3	122,6	
4	140,0	ZUT
5	137,7	
6	144,7	
7	373,0	MZ
8	394,0	
9	413,0	
10	153,0	ZUT
11	148,0	
12	147,1	
13	124,5	OM
14	118,9	
15	123,8	



Slika 54. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka D1

Tablica 24. Vrijednosti tvrdoće uzorka D2

Uzorak D2		
Točka	Tvrdoća HV10	Područje mjerenja
1	124,5	OM
2	127,7	
3	132,6	
4	134,0	ZUT
5	133,3	
6	134,7	
7	325,0	MZ
8	302,0	
9	309,0	
10	130,5	ZUT
11	131,2	
12	130,5	
13	134,0	OM
14	128,4	
15	123,2	

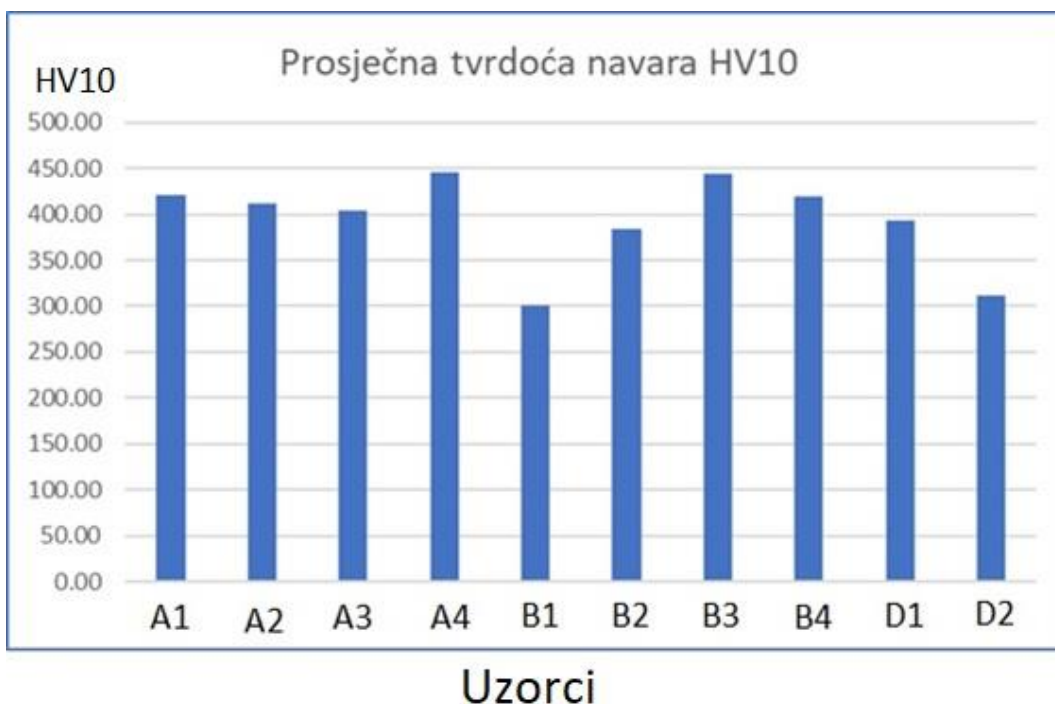


Slika 55. Grafički prikaz kretanja tvrdoće uzorka D2

U tablici 24. prikazane su prosječne vrijednosti tvrdoće metala navara odnosno stelita 12, a slika 56. prikazuje grafički odnos kretanja tvrdoće metala navara za sve uzorke. Maksimalna tvrdoća ostvarena je na uzorku A4 dok je najniža prosječna vrijednost na uzorku D2 koji je najduže podvrgnut unosu topline.

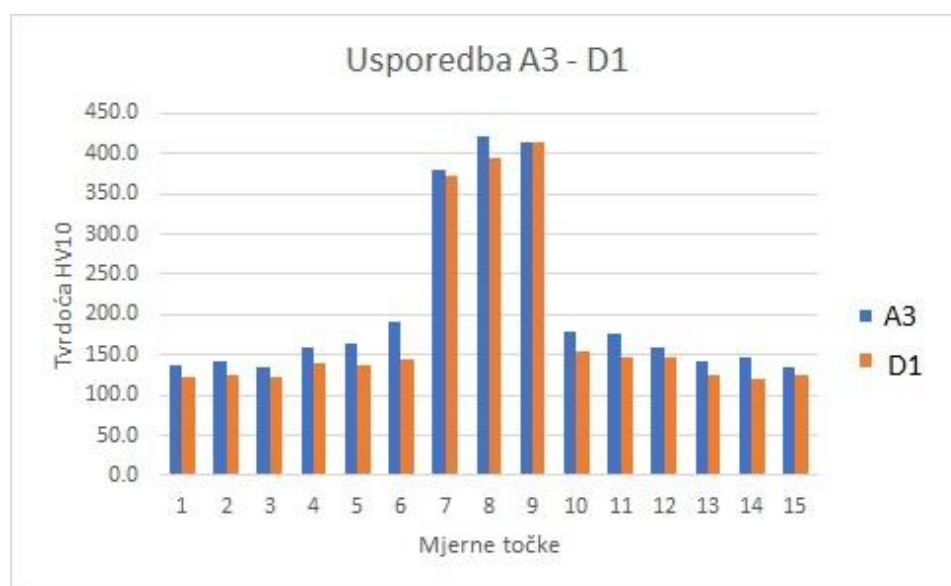
Tablica 25. Vrijednosti tvrdoće navara

Tvrdoća metala navara	
Uzorak	Prosječna tvrdoća HV10
A1	420,66
A2	412,33
A3	404,67
A4	446,00
B1	300,00
B2	383,33
B3	444,33
B4	419,67
D1	393,33
D2	312,00



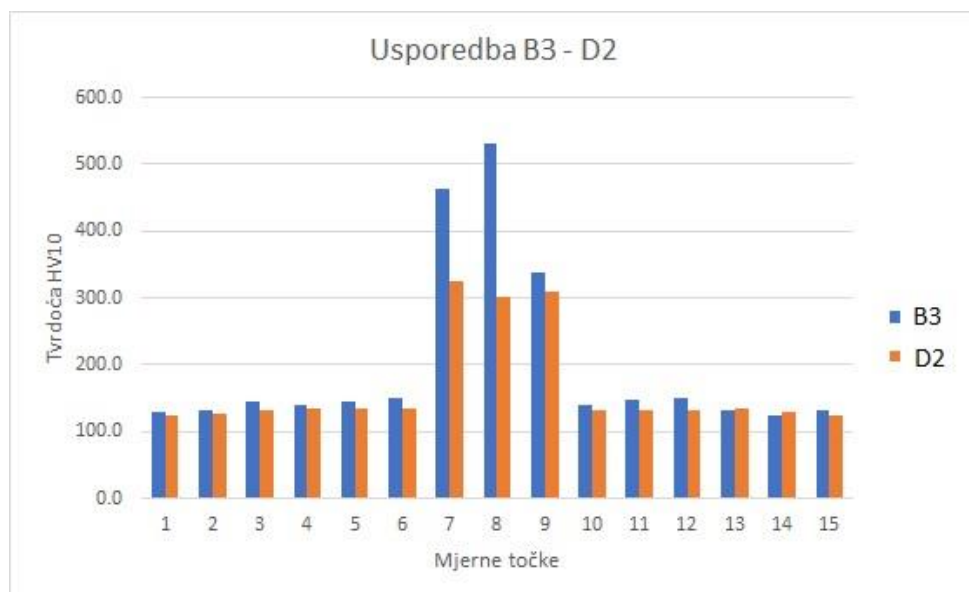
Slika 56. Grafički prikaz tvrdoće stelita po uzorcima

Zbog određivanja utjecaja toplinske obrade na svojstva navara stelita 12, na slikama 57. i 58. prikazani su usporedni prikazi kretanja tvrdoće za uzorke A3 i D1, odnosno B3 i D2.



Slika 57. Usporedba tvrdoće uzorka A3 prije i nakon toplinske obrade

Uzorak A3 nije predgrijan prije zavarivanja, te su iz tog razloga i tvrdoće nakon toplinske obrade uzorka D1 neznatno niže. Tvrdoća u zoni utjecaja topline, također ima niže vrijednosti što je povoljnije u pogledu redukcije zaostalih naprezanja.



Slika 58. Usporedba tvrdoće uzorka B3 prije i nakon toplinske obrade

Na slici 58. jasno je vidljiva znatna promjena tvrdoće metala navara u mjernim točkama 7 i 8. Uzorak B3 prethodno je predgrijan na temperaturu od 220 °C te se može zaključiti kako veći unos topline uz toplinsku obradu snižava vrijednosti tvrdoće.

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovoga rada bio je opisati postupak TIG tvrdog navarivanja te istražiti prednosti i nedostatke postupka. Tvrdna navarivanja provode se u prvom redu REL, EPP, laserskim i navarivanjem elektronskim snopom. TIG postupak navarivanja karakterizira mali postotak depozita, niski unos topline i postotak miješanja 2% - 20% što sprečava njegovu primjenu za navarivanja velikih površina. Primjena se ustalila za tvrdna navarivanja legura stelita na zube tračnih pila u industriji proizvodnje alata za pilansku industriju, tvrdna navarivanja u energetskim postrojenjima sjedišta ventila, te navarivanje alata za hladni rad.

Stelit je legura na bazi kobalta s legirnim elementim poput kroma, ugljika, volframa i željeza, odlične otpornosti na trošenje, te opću koroziju u slanoj vodi.

U eksperimentalnom dijelu rada navareni su uzorci od tvrde legure stelita 12 na nelegirani konstrukcijski čelik S235JR s različitim parametrima postupka. Struja navarivanja je na svim uzorcima iznosila 175A, uz korištenje istosmjerne i izmjenične struje. Zaštita procesa navarivanja provedena je u struji čistog argona 5.0 i mješavine H5 argona s 5% vodika. Dio uzoraka je prethodno predgrijan na temperaturu od 220 °C. Nakon navarivanja, provedena je i toplinska obrada u cilju određivanja zavarljivosti, korozijske otpornosti te utjecaja na tvrdoću.

Vizualnom kontrolom i kontrolom penetrantima nisu uočene površinske nepravilnosti na uzorcima, a analizom makrostrukture, izmjerene su geometrijske značajke navara i širina ZUT-a. Prema rezultatima analize makroizbrusaka, nije došlo do pojave naljepljivanja, te se može zaključiti o dobroj zavarljivosti legure stelita 12 na nelegirani čelik. Korozijskim ispitivanjem nije uočena pojava rupičaste korozije na uzorcima bez obzira na provedenu toplinsku obradu. Mjerenjem i usporedbom rezultata tvrdoće, ustanovljeno je da su uzorci nakon provedene toplinske obrade imali nižu tvrdoću navara, a najveća apsolutna tvrdoća izmjerena je na uzorku B3, koji je predgrijan i navaren istosmjernom strujom u zaštitni plina komercijalnog naziva H5 s 5% H₂ +95% Ar. Iako tvrdoća nije u direktnoj korelaciji s otpornošću na trošenje, parametri navarivanja uzorka B3 mogu se smatrati optimalnim. Daljnja ispitivanja na ovu temu mogu ići u smjeru triboloških i korozijskih ispitivanja.

LITERATURA

- [1] Filetin T, Grilec K. Postupci prevlačenja i modificiranja površina. Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju; 2004.
- [2] Gojić M, Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sisak, 2003.
- [3] Web: <http://www.eurosaj.ba/bs/article/39/fosfatiranje> pristupljeno 10.2021.
- [4] Stupnišek M, Matijević B, Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja metala, Zagreb 2009.
- [5] web:<https://meccanicavga.com/machining-services/rivestimenti-e-riporti/pacvd/> pristupljeno 10.2021.
- [6] Juraga I, Živčić M, Gracin M. Reparturno zavarivanje; Zagreb; 1994.
- [7] Web: <https://www.ezg.hr/elektrode.html#e17> , pristupljeno 10. 2021.
- [8] Web: <https://www.fluidpowerworld.com/anti-corrosion-laser-cladding-provides-extra-protection-when-cylinders-cant-fail/> pristupljeno 10.2021.
- [9] Web: <https://evobeam.eu/en/electron-beam/technology/cladding> , pristupljeno 10.2021.
- [10] Web: <https://metalwebnews.com/howto/anvil1/anvil2.html> pristupljeno 11.2021.
- [11] Goglia V, Strojevi i alati za obradu drveta , I.dio, Zagreb, 1994.
- [12] web: <https://www.tonertracnepile.hr/> , pristupljeno 10.2021.
- [13] web:<https://www.enginebuildermag.com/2016/03/valves-and-seats/> , pristupljeno 11.2021.
- [14] Web:<https://www.kennametal.com/fr/fr/products/metal-powders/stellite-alloys.html> pristupljeno 11.2021.
- [15] Šavar Š, Obrada odvajanjem čestica 2.dio, Zagreb; 1990.
- [16] Tirić T, Zaštitni plinovi pri TIG zavarivanju. [završni rad], Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [17] web: <https://www.messer.hr/plinovi-rezanje-zavarivanje>, pristupljeno 11.2021.
- [18] Kralj S, Kožuh Z, Garašić I, Automatizirano TIP TIG zavarivanje, Slavonski Brod, 2009.
- [19] HRN EN ISO 1011-1: 2009.
- [20] Garašić I. Podloge iz kolegija Postupci zavarivanja, 2017.
- [21] web: <http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/141/>, pristupljeno 11.2021.
- [22] web: <https://www.eurotehnika.hr/proizvod/magicwave-230i/> , pristupljeno 11.2021.

- [23] web: <https://www.sealforlife.com/brands/stopaq/> , pristupljeno: 11.2021.
- [24] Markučić D. Predavanja iz kolegija Osiguranje kvalitete zavarenih konstrukcija, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2020.
- [25] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček, L. Ćurković, Materijali I,

PRILOZI

I. CD-R disk