

MIG navarivanje općeg konstrukcijskog čelika s nehrđajućim čelikom

Zadavec, Benjamin

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:326820>

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

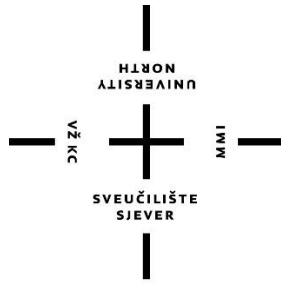
Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-24**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





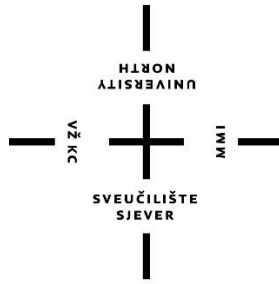
**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 431/PS/2024

**MIG navarivanje općeg konstrukcijskog čelika s
nehrđajućim čelikom**

Benjamin Zadravec, 0336052879

Varaždin, rujan 2024. godine



Sveučilište Sjever

Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 431/PS/2024

MIG navarivanje općeg konstrukcijskog čelika s nehrđajućim čelikom

Student

Benjamin Zadravec, 0336052879

Mentor

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj.

Varaždin, rujan 2024. godine

Predgovor

U skladu s člankom 8. *Pravilnika o završnom i diplomskom radu na studijskim programima Sveučilišta Sjever* izjavljujem da sam rad napisao samostalno, koristeći pomoć mentora doc.dr.sc. Matije Bušića, znanje stečeno tijekom studiranja te navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na uloženom trudu i strpljenju tijekom odrađivanja eksperimentalnog dijela ovog završnog rada. Njegovi savjeti i usmjerenja uvelike su mi pomogla u izradi završnog rada. Zahvaljujem mu što je osigurao materijale i omogućio korištenje opreme sveučilišta potrebne za izradu rada, bez koje ovaj rad ne bi mogao biti realiziran. Zahvaljujem svojim roditeljima na potpori tijekom prijediplomskog studiranja i mogućnosti završavanja studija u zadanom roku. Zahvalio bih i svim profesorima koji su kroz ovaj prijediplomski studij prenosili svoje znanje bez kojeg ovaj rad ne bi bio ostvariv.

Sažetak

Tema ovog završnog rada mogućnost je navarivanja slojeva otpornih na koroziju na opći konstrukcijski čelik MIG postupkom te utjecaj parametara jakosti struje navarivanja na ostvarivanje navedenog navarenog sloja. Završni rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu su detaljno opisani postupci navarivanja slojeva otpornih na trošenje i koroziju, korišteni dodatni materijali i njihova svojstva te karakterističnosti, prednosti i nedostaci postupka navarivanja. U eksperimentalnom dijelu, opisano je navarivanje slojeva nehrđajućeg čelika MIG postupkom na opći konstrukcijski čelik, opisana je korištena oprema, materijali i parametri te je detaljno opisan postupak izrade uzoraka iz navarenih slojeva koji su korišteni za ispitivanje makrostrukture. Na kraju rada prikazana je analiza mjerenih rezultata te je dan zaključak.

Ključne riječi: navarivanje slojeva otpornih na koroziju, nehrđajući čelik, MIG postupak navarivanja

Summary

The topic of this final paper is the possibility of cladding corrosion-resistant layers on structural steel with MIG cladding process and the influence of cladding current parameters on the realization of the clad layer. The final paper consists of a theoretical and an experimental part. The theoretical part describes in detail the procedures of cladding layers resistant to wear and corrosion, the additional materials used and their properties, as well as the characteristics, advantages and disadvantages of the cladding process. In the experimental part, the MIG cladding of structural steel with stainless steel is described, as well as the used equipment, materials, parameters and the detailed description of the process of making a samples from clad layers that were used for macro structure analysis. At the end of the paper, an analysis of the measured results is presented and a conclusion is given.

Keywords: corrosion-resistant layers cladding, stainless steel, MIG cladding

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Benjamin Zdravec

MATIČNI BROJ 0336052879

DATUM 20.08.2024.

KOLEGIJ Površinska obrada materijala

NASLOV RADA MIG navarivanje općeg konstrukcijskog čelika s nehrđajućim čelikom

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU MIG cladding of structural steel sheet with stainless steel

MENTOR dr.sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc. dr. sc. Boris Jalušić, predsjednik povjerenstva
2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
3. doc. dr. sc. Zlatko Botak, član povjerenstva
4. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, rezervni član povjerenstva
- 5.

Zadatak završnog rada

BROJ 431/PS/2024

OPIS

U završnom radu pristupnik treba na temelju literaturnih podataka proučiti i opisati metode zaštite od korozije općih konstrukcijskih čelika navarivanjem nehrđajućeg čelika. Navesti mehanizme trošenja materijala te detaljno proučiti njihovo djelovanje. Na temelju dostupnih podataka proučiti navarivanje s ciljem zaštite od trošenja i zaštite od djelovanja korozije. Istražiti dostupne dodatne materijale koji se koriste u navarivanju.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izvesti i opisati navarivanje sloja austenitnog nehrđajućeg čelika na opći konstrukcijski čelik MIG postupkom navarivanja. Opisati korištenu opremu i parametre postupka. Iz izrađenih navara izraditi ispitne uzorke te provesti makroanalizu poprečnog presjeka navarenih slojeva. Nakon provedenih ispitivanja donijeti zaključak o uspješnosti izvedenog postupka te korištenim parametrima i opremi. Donijeti vlastiti zaključak o proučavanoj tematici. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

28.08.2024.

POTPIS MENTORA

M. Bušić



Popis korištenih kratica

Al	aluminij
ASTM	American Society for Testing and Materials Američko društvo za ispitivanje i materijale
B	bor
BCC	Body Centered Cubic Lattice Prostorno centrirana kubična rešetka
C	ugljik
C ₂ H ₂	acetilen
C ₃ H ₈	propan
CNC	Computer Numerical Control Računalno numeričko upravljanje
Co	kobalt
Cr	krom
Cr ₂₃ C ₆	kromov karbid
Cu	bakar
DM	dodatni materijal
EPP	elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška
EPT	elektrolučno zavarivanje pod troskom
FCAW	Flux-Cored Arc Welding Elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom
Fe	željezo
Fe ₃₆ Cr ₁₂ Mo ₁₀	intermetalni spoj željeza, kroma i molibdena (χ faza)
FeCr	intermetalni spoj željeza i kroma (σ faza)
H ₂	molekula vodika
HB	tvrdoća po Brinellu
HRB	tvrdoća po Rockwellu (ispitivanje čeličnom kuglicom)
HRC	tvrdoća po Rockwellu (ispitivanje dijamantnim stošcem)
HV	tvrdoća po Vickersu

IIW	International Institute of Welding Međunarodni institut za zavarivanje
KV	ispitni uzorak s V zarezom (Udarni rad loma)
MAG	Metal Active Gas Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina
MIG	Metal Inert Gas Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
Mn	mangan
Mo	molibden
N	dušik
NaCl	natrijev klorid
Nb	niobij
Ni	nikal
O ₂	molekula kisika
OM, OM1, OM2	osnovni materijal
REL	ručno elektrolučno zavarivanje
SHIP	sredstvo za hlađenje i podmazivanje
Si	silicij
Sn	kositar
Ti	titanij
TIG	Tungsten Inert Gas Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
TM	tvrdi metal
V	vanadij
W	volfram
WC	volframov karbid
Zr	cirkonij

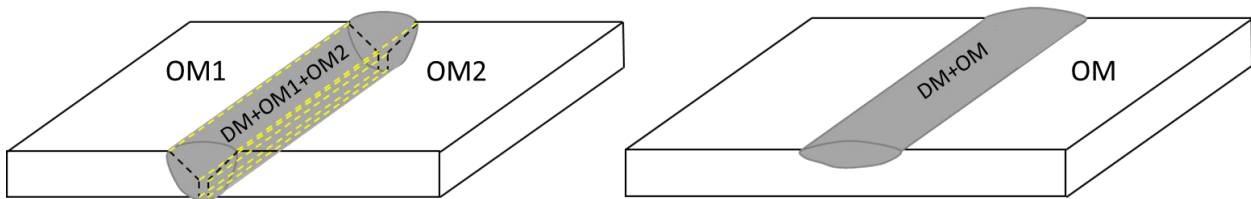
Sadržaj

1. Uvod.....	11
2. Podjela postupka navarivanja.....	12
2.1. Trošenje, tribosustav i mehanizmi trošenja	12
2.2. Navarivanje s ciljem dobivanja sloja otpornog na trošenje	17
2.2.1. Opis postupka	17
2.2.2. Pukotine nastale zbog skupljanja materijala	20
2.2.3. Temperatura predgrijavanja.....	20
2.2.4. Karakterizacijska ispitivanja kod hardfacing-a	23
2.2.5. Odabir odgovarajućeg dodatnog materijala za navarivanje s ciljem dobivanja navarenog sloja otpornog na trošenje.....	25
2.2.5.1. Legure na bazi željeza s manje od 20 % legiranih elemenata	26
2.2.5.2. Legure na bazi željeza s više od 20 % legiranih elemenata.....	28
2.2.5.3. Neželjezne legure, legure na bazi kobalta i nikla.....	29
2.2.5.4. Legure s volframovim karbidom.....	30
2.3. Navarivanje s ciljem dobivanja sloja otpornog na koroziju	31
2.3.1. Opis postupka	31
2.3.2. Pukotine nastale zbog skupljanja materijala, temperature predgrijavanja	32
2.3.2.1. Martenzitni nehrđajući čelici	32
2.3.2.2. Feritni nehrđajući čelici	32
2.3.2.3. Austenitni nehrđajući čelici	33
2.3.3. Odabir dodatnog materijala za navarivanje s ciljem dobivanja navarenog sloja otpornog na koroziju prema EN 14700 i tvrtki „Welding Alloys“	34
2.3.3.1. Legure na bazi željeza s manje od 20 % legiranih elemenata	35
2.3.3.2. Neželjezne legure, legure na bazi kobalta i nikla.....	35
2.4. Utjecaj pojedinog legirnog elementa u DM-u, odabir odgovarajućeg DM-a za odrađivanje navarivanja.....	36
2.5. Prijelazni (buffer) sloj.....	40
2.6. Miješanje OM-a i DM-a tijekom navarivanja, prednosti i nedostaci navarivanja.....	41
3. Eksperimentalni dio	44
3.1. MIG postupak zavarivanja / navarivanja	44
3.2. Korištena oprema.....	46
3.2.1. Izvor struje za navarivanje <i>Fronius TransSteel 3000 Pulse</i>	46
3.2.2. Automat za precizno vođenje pištolja <i>Promotech Rail Bull</i>	47

3.2.3.	Kontaktni termometar <i>SKF TKTL 20 ThermoLaser</i> s temperaturnom sondom <i>SKF TMDT 2-30</i>	49
3.2.4.	CNC obradni centar <i>Kitamura Mycenter-1</i>	50
3.2.5.	Uređaj za brušenje i poliranje <i>Metkon Forcipol IV Grinder & Polisher</i>	51
3.2.6.	Stereomikroskop <i>Olympus SZX10</i>	52
3.3.	Korišteni materijali	53
3.4.	Postupak MIG navarivanja	55
3.5.	Izrada ispitnih uzoraka.....	63
3.6.	Ispitivanje makrostrukture	68
4.	Zaključak.....	73
5.	Literatura.....	74
	Popis slika	78
	Popis tablica	81

1. Uvod

Navarivanje je postupak toplinskog prevlačenja površina osnovnog materijala (OM) nekim drugim dodatnim materijalom (DM) putem zavarivanja pri čemu je temperatura postupka viša od temperature tališta osnovnog materijala te temperature tališta dodatnog materijala, tj. materijala kojim se izvodi prevlačenje. Osnovna razlika između zavarivanja i navarivanja je ta što se zavarivanjem međusobno spajaju dva osnovna materijala uz primjenu ili bez dodatnog materijala u cilju dobivanja zavarenog spoja istih svojstava kao i osnovni materijal, dok se navarivanje izvodi zbog popune istrošenih površina ili za poboljšavanje površine na određenim strojnim dijelovima ili alatima. [1] Slikom 1 shematski su prikazani zavar i navar.



Slika 1 – Shematski prikaz zavarivanja (lijevo) i navarivanja (desno)

Oprema, tehnika rada, a u većini slučajeva i dodatni materijal slični su kao i kod zavarivanja. Navarivanje se najčešće izvodi elektrolučnim postupcima. Neki od primjera navarivanja su: [2]

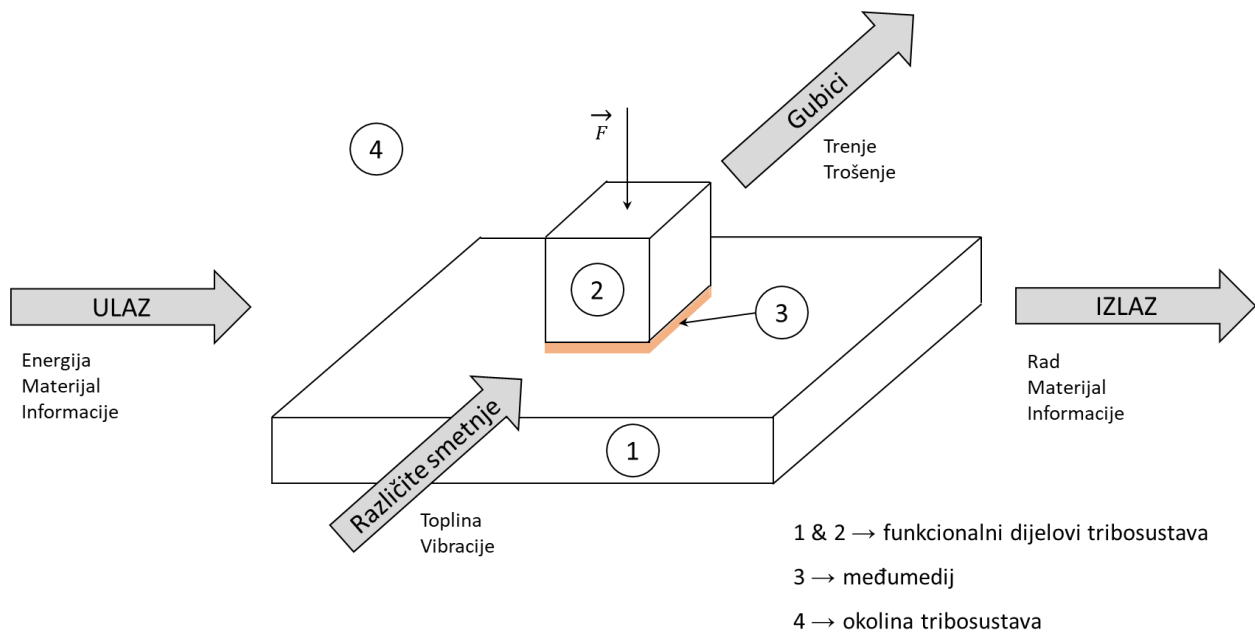
- Navarivanje praša tvrdih legura električnim lukom između radnog komada i netaljive grafitne ili volframove elektrode;
- Navarivanje žičanim i sinteriranim štapićastim elektrodama;
- Navarivanje plazmom;
- Indukcijsko navarivanje;
- Plinsko navarivanje (gorivi plin (acetilen C_2H_2 , propan C_3H_8 , vodik H_2) + kisik O_2);
- Aluminotermijsko navarivanje.

2. Podjela postupka navarivanja

Navarivanje se s obzirom na cilj dijeli na navarivanje s ciljem dobivanja navarenog sloja koji je otporan na trošenje (eng. hardfacing) te navarivanje s ciljem dobivanja navarenog sloja koji je otporan na koroziju (eng. cladding). [3]

2.1. Trošenje, tribosustav i mehanizmi trošenja

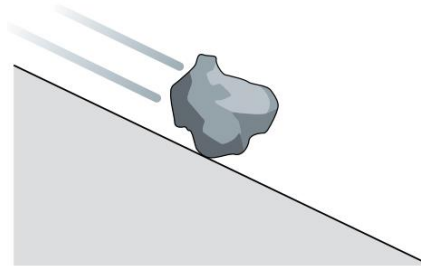
Trošenje je progresivni gubitak materijala s radnih površina tijela, uslijed dinamičkog kontakta s drugim tijelom ili fluidom. Sustavi u kojima se pojavljuju procesi trošenja nazivaju se tribosustavi (Slika 2) te obuhvaćaju sve sustave kod kojih postoji relativno gibanje između pojedinih dijelova. Mehanizmi trošenja su abrazija, adhezija, erozija, utjecaj kavitacije, umor površine, tribokorozija i dr. [4]



Slika 2 – Shematski prikaz tribosustava

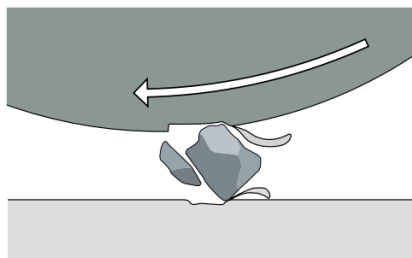
Abrazija nastaje uslijed prodiranja tvrdog materijala u površinu mekšeg stvarajući pritom brazde na površini te odvojene čestice mekšeg materijala. Abrazija se može podijeliti na:

- nisku i umjerenu abraziju (Slika 3) koja nastaje zbog klizanja mekših abrazivnih čestica po tvrđoj podlozi, pri čemu abrazivne čestice ne mijenjaju veličinu i ne raspadaju se;



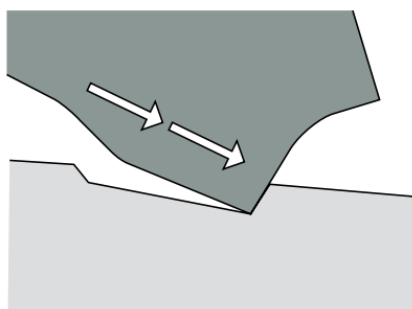
Slika 3 – Shematski prikaz niske abrazije [5]

- abraziju pod povećanim pritiskom (Slika 4) koja nastaje u slučaju gdje se abrazivne čestice sabijaju između dvije površine, što dovodi do usitnjavanja abrazivnih čestica; trošenje površina se u tom slučaju manifestira u obliku odvajanja čestica površine (eng. chipping), odvajanja tvrdih faza (npr. karbida, borida) ili pojave strukturnih deformacija;



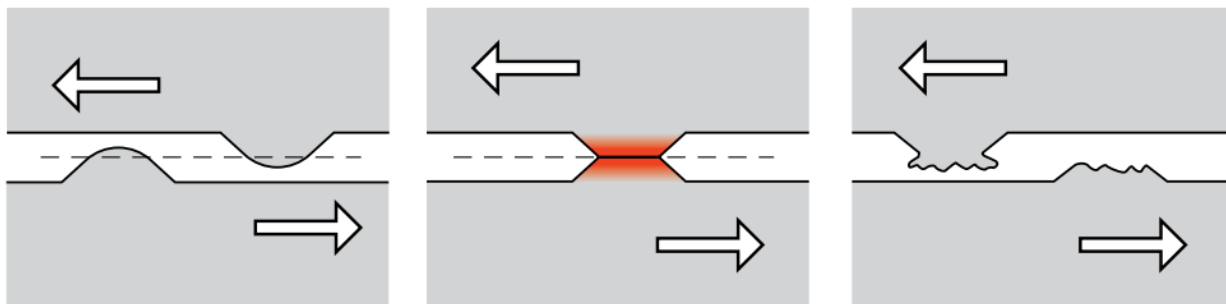
Slika 4 – Shematski prikaz abrazije pod povećanim pritiskom [5]

- povećanu abraziju / žlijebljenje (eng. gouging abrasion) (Slika 5) koja je kombinacija niske, umjerene i visoke abrazije sa udarcima (npr. čekići za drobilice); na površinama nastaju velike ogrebotine te odvajanje čestica površine, često i plastične deformacije.



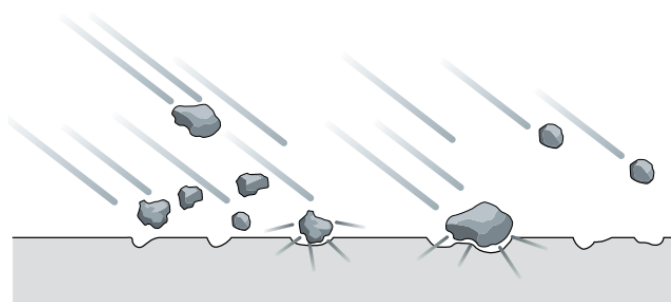
Slika 5 – Shematski prikaz povećane abrazije [5]

Adhezija (Slika 6) nastaje uslijed trenja dvaju tijela u dodiru pri čemu dolazi do razvijanja topline te stvaranja mikrozavarenih spojeva između neravnina površina koji se zatim otkidaju i ulaze u tribosustav. Adhezija se javlja na mikroskopskoj razini te nastala oštećenja nisu vidljiva golim okom. Brzina trošenja adhezijom ovisi o sili koja djeluje između površina tijela u dodiru, relativnoj brzini, temperaturi radnog okruženja, stanju površina, faktorima trenja površina te o materijalima tijela (u slučaju korištenja materijala s identičnim kristalografskim strukturama povećava se mogućnost pojave adhezije).



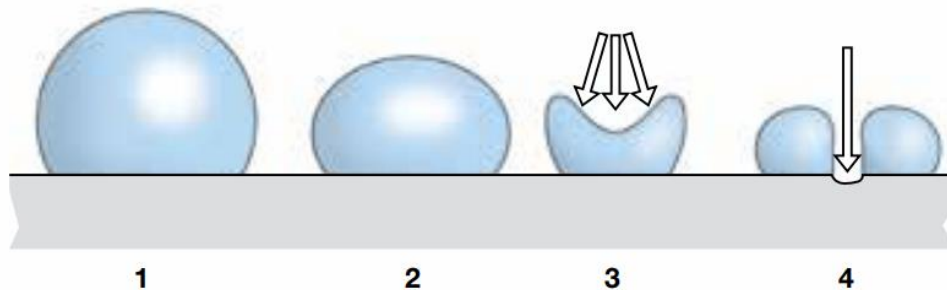
Slika 6 – Shematski prikaz adhezije (s lijeva na desno → sudar dviju neravnina, nastanak mikrozavarenog spoja, kidanje novonastalog mikrozavarenog spoja) [5]

Erozija (Slika 7) nastaje kad čvrste čestice ili kapljice tekućine udaraju u površinu velikom brzinom. Brzina trošenja ovisi o kutu udara i brzini vanjskih čestica te o svojstvima podloge. Pri malim kutovima udara ($\leq 30^\circ$) ostvaruje se mikrorezanje te količina trošenja ovisi samo o tvrdoći vanjskih čestica. Pri većim kutovima udara (30° do 90°) vanjske čestice se deformiraju te je moguće odvajanje čestica površine.



Slika 7 – Shematski prikaz erozije čvrstim česticama [5]

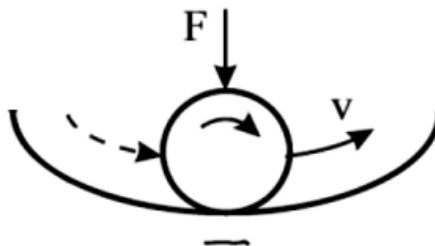
Kavitacija (Slika 8) nastaje na podlozi (posebno uz oštre rubove stijenki ili rubove uronjenog tijela) koja je u kontaktu s vrlo turbulentnom kapljevnom. Uzrok kavitacije materijala su implozije u blizini stijenki koje nastaju pri mjestimičnom smanjenju tlaka u kapljevini ispod kritičnog te stvaranja parnih mjehurića koji prelaze u područje višeg tlaka gdje para iz mjehurića prelazi natrag u kapljevnu (okolna kapljevina struji prema središtu mjehurića te lokalno nastaju vrlo visoki udarni tlakovi). Također uz tzv. kavitacijsku eroziju (eng. cavitation erosion) nastaju vibracije i buka. [6]



Slika 8 – Shematski prikaz oštećenja podloge nastala kavitacijom [5]

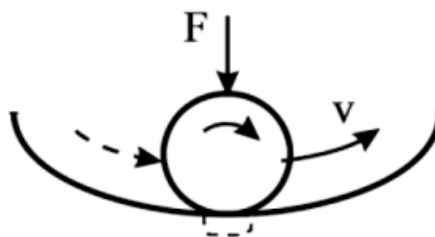
Umor površine nastaje uslijed cikličkih promjena naprezanja, a manifestira se kao mikropukotine koje kasnije dovode do odvajanje čestica s površine. Tipičan je za visoko opterećene površine u dodiru prilikom kotrljanja. [7] Proces umora površine sastoji se od sljedećih faza:

- Faza I (Slika 9) stvaranje mikropukotine (ispod površine);



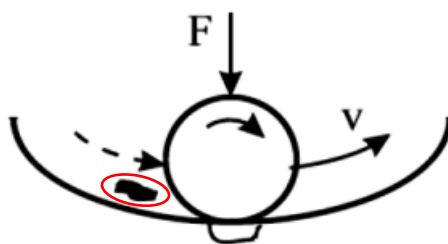
Slika 9 – Shematski prikaz prve faze umora površine [4]

- Faza II (Slika 10) propagacija mikropukotine;



Slika 10 – Shematski prikaz druge faze umora površine [4]

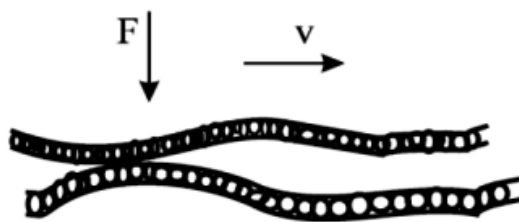
- Faza III (Slika 11) odvajanje čestice trošenja.



*Slika 11 – Shematski prikaz treće faze umora površine
(crvenom bojom označena odvojena čestica) [4]*

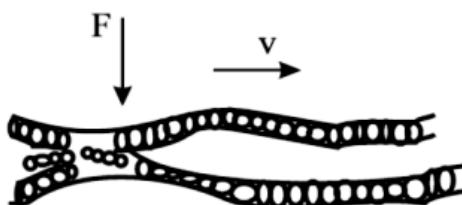
Tribokorozija nastaje uslijed klizanja ili kotrljanja triboelemenata u korozivskom okruženju. Tribokorozija se sastoji od sljedećih faza: [7]

- Faza I (Slika 12) stvaranje ili obnavljanje sloja produkata kemijske reakcije s okolinom;



Slika 12 – Shematski prikaz prve faze tribokorozije [4]

- Faza II (Slika 13) mjestimično razaranje sloja produkata kemijske reakcije.



Slika 13 – Shematski prikaz druge faze tribokorozije [4]

2.2. Navarivanje s ciljem dobivanja sloja otpornog na trošenje

2.2.1. Opis postupka

Navarivanje s ciljem dobivanja sloja otpornog na trošenje je deponiranje tvrdog dodatnog materijala na površinu osnovnog materijala. Može se podijeliti na preventivni postupak gdje se navarivanje izvodi na novom proizvodu (u većini slučajeva osnovni materijal proizvoda čini konstrukciju, a potrebna svojstva otpornosti na trošenje pruža navareni sloj) te reparaturni postupak gdje se odrađuje rekonstrukcija već korištenog i oštećenog proizvoda. Važna je kompatibilnost osnovnog materijala oštećenog proizvoda te dodatnog materijala koji će se koristiti za reparaturno navarivanje. Korištenjem navarivanja s ciljem dobivanja sloja otpornog na trošenje smanjuje se potreba za održavanjem, smanjuju se operativni troškovi i troškovi popravka ako je potreban te se produžuje vijek trajanja proizvoda. Kao što je navedeno u uvodu, navarivanje s ciljem dobivanja sloja otpornog na trošenje može se odrađivati s različitim elektrolučnim postupcima. U Tablici 1 navedeni su neki postupci elektrolučnog navarivanja te specifičnosti za pojedini postupak. [5]

Tablica 1 – Postupci elektrolučnog navarivanja te njihove specifičnosti [5]

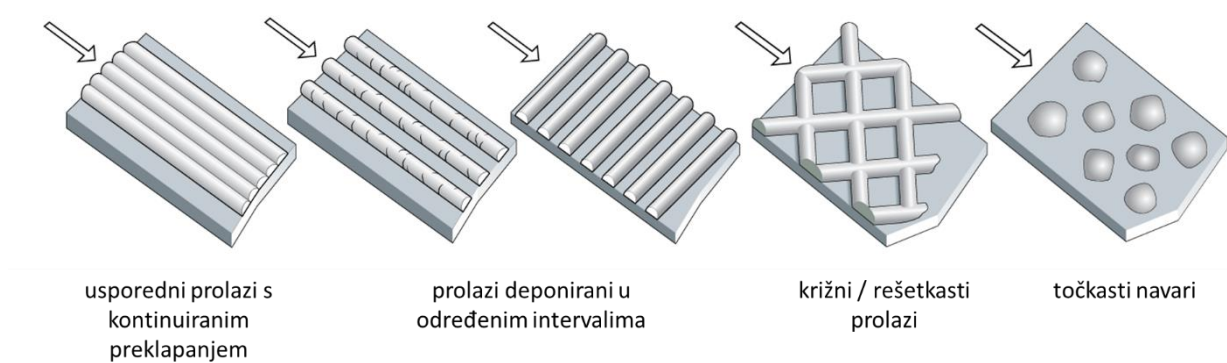
Postupak	Skraćenica postupka	Tip postupka	Zaštita taline	Količina deponiranog materijala [kg/h]
Zavarivanje TIG postupkom	TIG	ručni / automatski	Zaštitni plin	0,5 - 1,5
Zavarivanje ručnim elektrolučnim postupkom	REL	ručni	Troska	1 - 3
Zavarivanje MAG postupkom	MAG	poluautomatski / automatski	Zaštitni plin (aktivni)	3 - 10
Elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom	FCAW	poluautomatski / automatski	Troska ili bez zaštite	3 - 12
Zavarivanje pod troskom	EPT	automatski	Troska	5 - 20

Također važan parametar kod navarivanja s ciljem dobivanja sloja otpornog na trošenje je oblik (uzorak) navara. U slučaju trošenja niskom i umjerenom abrazijom, povoljnije je da površina navarenog sloja ima određene neravnine. Korišten uzorak navara u tim slučajevima ovisi o veličini i svojstvima abraziva. Nastoji se smanjiti relativno kretanje abrazivnih čestica na nekom radnom

predmetu (proizvodu) te potaknuti njihovo skupljanje u udubinama navarenog sloja koje će kao takve tvoriti barijeru između radnog predmeta i ostalih vanjskih abrazivnih čestica. Neki od korištenih uzoraka su:

- usporedni prolazi s kontinuiranim preklapanjem;
- prolazi deponirani u određenim intervalima;
- križni / rešetkasti prolazi;
- točkasti navari.

Gore navedeni uzorci prikazani su na Slici 14.



Slika 14 – Shematski prikaz uzoraka navara [5]

Usporedni prolazi s kontinuiranim preklapanjem (Slika 15) koriste se kako bi se spriječila povećana abrazija (žlijebljenje) te kontakt između vanjskih abrazivnih čestica i osnovnog materijala radnog predmeta. Međusobni preklop između prolaza je 50 % što osigurava optimalne karakteristike navarenog sloja (smanjeno miješanje dodatnog materijala; detaljnije u 2.6. Miješanje OM-a i DM-a tijekom navarivanja, prednosti i nedostaci navarivanja). U većini slučajeva su prolazi jednako orijentirani kao i smjer kretanja abrazivnih čestica te je time osigurano njihovo kontinuirano kretanje po sloju. [5]



Slika 15 – Usporedni prolazi s kontinuiranim preklapanjem

Prolazi deponirani u određenim intervalima koriste se u slučaju niske i umjerene abrazije bez udaraca. Razmak između prolaza ovisi o veličini abrazivnih čestica (kod povećane abrazije razmak između prolaza je manji). Orijehtacija prolaza ovisi o veličini abrazivnih čestica. U slučaju većih abrazivnih čestica, prolazi su orijentirani paralelno sa smjerom kretanja čestica, a kod onih srednjih ili malih veličina, prolazi su okomiti na smjer kretanja čestica te je važno da navareni prolazi nemaju pukotina. U mokrom okruženju može se formirati aglomeracija abrazivnih čestica te se one kao takve čvrsto fiksiraju (zaglave) između prolaza navara. U tom slučaju razmak između prolaza se može povećati, no važno je odabrati optimalan razmak (ograničiti dimenziju razmaka) kako bi se zadržala zaštitna svojstva otpornosti na trošenje. [5]

Točkasti navari koriste se u slučaju niske i umjerene abrazije te kad je osnovni materijal radnog predmeta osjetljiv na unos topline kod navarivanja. Navarivanje počinje u sredini radnog predmeta te se kreće prema van, time su ograničena naprezanja koja nastaju kod navarivanja i jednoliko raspoređena po cijelom radnom predmetu. Razmak između navara ovisi o veličini abrazivnih čestica (u slučaju manjih abrazivnih čestica, razmaci između navara su manji) [5]

Na Slici 16, na žlici za bager prikazani su prolazi deponirani u određenim intervalima te točkasti navari.



Slika 16 – Prolazi deponirani u određenim intervalima i točkasti navari navareni na žlicu za bager kao zaštita od trošenja [8]

Kod križnih / rešetkastih prolaza (Slika 17) pojedinačni prolazi orijentirani su pod kutovima od 30° do 90°. Ova vrsta uzorka koristi se u slučaju abrazije velikim i malim abrazivnim česticama (npr. smjesa pijeska, šljunka i većeg kamenja). Križni uzorak omogućava nakupljanje malih abrazivnih čestica (u ovom primjeru pijeska i sitnog šljunka) u međuprostorima rešetke te je time zaštićen osnovni materijal radnog predmeta od većih abrazivnih čestica (u ovom primjeru većeg

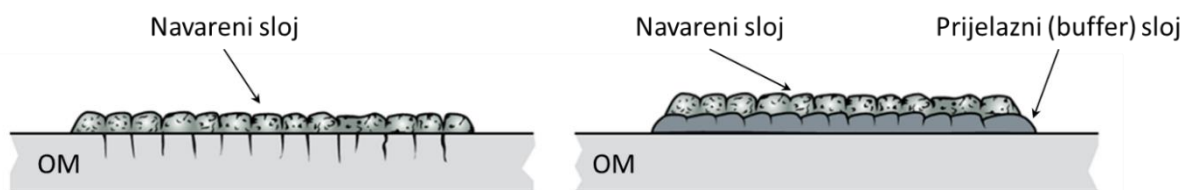
kamenja), tzv. samozaštita začepljenjem (eng. self-protection by clogging). Što je manja površina koja nema navareni sloj, time je bolja otpornost na trošenje malim abrazivnim česticama. [5]



Slika 17 – Križni / rešetkasti prolazi [9]

2.2.2. Pukotine nastale zbog skupljanja materijala

Pukotine nastaju zbog različitih koeficijenata toplinskog rastezanja OM-a i DM-a. Navareni slojevi koji sadrže tvrde faze (karbide, boride) posebno su skloni nastanku pukotina zbog skupljanja prilikom hlađenja. Moguća je pojava pukotina, no u nekim slučajevima ne utječe negativno na otpornost na trošenje. Ako na radni predmet djeluju udarna opterećenja, potrebno je spriječiti propagaciju pukotina na osnovni materijal, a to se postiže navarivanjem prijelaznog (eng. buffer) sloja (Slika 18) (detaljnije u 2.5. Prijelazni sloj). Uz prijelazni sloj, pukotine se mogu izbjeći adekvatnim predgrijavanjem OM-a te odgovarajućim brzinama ohlađivanja.



Slika 18 – Shematski prikaz pojave pukotina na navarenom sloju te njihova propagacija u osnovni materijal (lijevo) te sprječavanje propagacije pukotina primjenom prijelaznog sloja (desno) [5]

2.2.3. Temperatura predgrijavanja

Potreba za predgrijavanjem prije navarivanja ovisi o vrsti korištenog osnovnog materijala. Predgrijavanjem se postiže omekšavanje strukture na mjestu gdje je ono primijenjeno (smanjivanjem brzine ohlađivanja) te se smanjuju zaostala naprezanja nastala navarivanjem. Smanjenjem brzine ohlađivanja smanjuje se mogućnost pojave nepoželjnih struktura, povećava se difuzija vodika i ostalih plinova iz materijala. [5, 21, 47]

Za određivanje ispravne temperature predgrijavanja, važan je kemijski sastav osnovnog materijala te geometrija radnog predmeta (kod debljih radnih predmeta potrebno je predgrijavanje kako bi se ograničila brzina ohlađivanja te spriječilo nastajanje struktura s povećanom tvrdoćom). Kako ugljik i neki ostali elementi u čeliku određuju temperaturu predgrijavanja, prema preporuci Međunarodnog instituta za zavarivanje (IIW) računa se ekvivalent ugljika za brodograđevne i druge čelike povišene čvrstoće (postotak ugljika > 0,18 %) prema formuli [5, 21, 47]:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \leq 0,45\% \quad (1)$$

U Tablici 2 prikazane su približne vrijednosti temperatura predgrijavanja za određene osnovne materijale.

Tablica 2 – Približne vrijednosti temperatura predgrijavanja za određene osnovne materijale [5]

Ekvivalent ugljika	Zavarljivost	Predgrijavanje	Zagrijavanje nakon navarivanja
$C_e < 0,35$	dobra	lagano predgrijavanje	nije potrebno
$0,35 < C_e < 0,6$	zadovoljavajuća	150 °C do 250 °C	preporuča se
$C_e > 0,6$	vrlo loša	>250 °C	potrebno

Postoji više metoda izračunavanja temperature predgrijavanja [21]:

- Metoda Cottrel-a i Bradstreet-a;
- Metoda Itto-a i Bessyo-a;
- Metoda Seferijan-a.

Kao primjer je uzeta metoda Seferijan-a, gdje temperatura predgrijavanja ovisi o kemijskom ekvivalentu ugljika, tj. kemijskom sastavu osnovnog materijala te debljini osnovnog materijala koji se predgrijava [21]:

$$T_o = 350 \times \sqrt{[C]_i - 0,25} \quad (2)$$

Gdje je

- T_o → temperatura predgrijavanja [°C];
- $[C]_i$ → integralni ekvivalent ugljika [%].

Vrijednost integralnog ekvivalenta ugljika izračunava se prema formuli [47]:

$$[C]_i = [C]_e \times (1 + 0,005 \times \delta) \quad (3)$$

Gdje je

- $[C]_i$ → integralni ekvivalent ugljika [%];
- $[C]_e$ → ekvivalent ugljika kemijskog sastava [%];
- δ → debljina osnovnog materijala [mm].

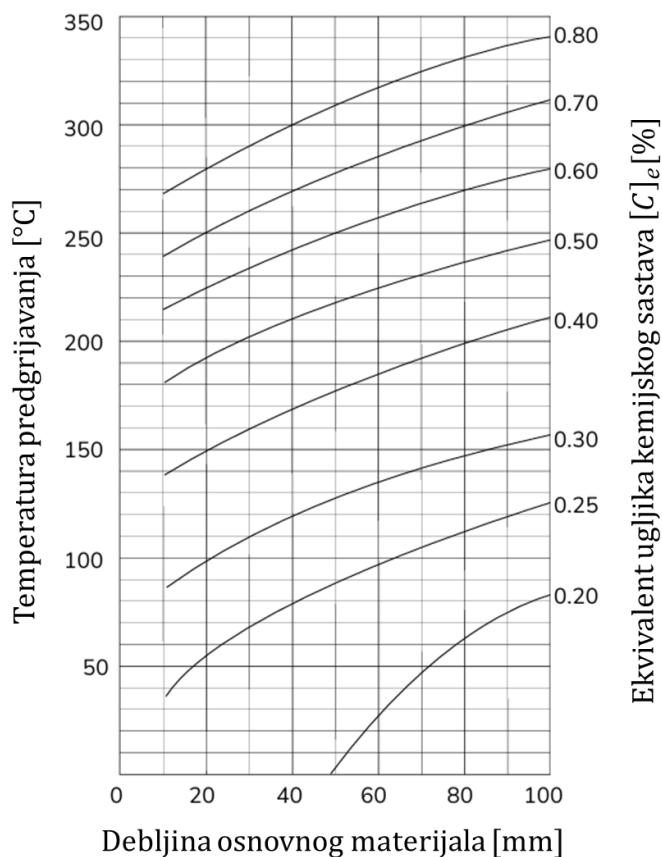
Vrijednost ekvivalenta ugljika kemijskog sastava izračunava se prema formuli [5]:

$$[C]_e = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 \times Mo}{90} \quad (4)$$

Gdje je

- $[C]_e$ → ekvivalent ugljika kemijskog sastava [%];
- C, Mn, Cr, Ni, Mo → postotak pojedinog elementa u čeliku.

Također je moguće odrediti temperaturu predgrijavanja iz Seferijan-ovog dijagrama na Slici 19.



Slika 19 – Seferijan-ov dijagram [5]

2.2.4. Karakterizacijska ispitivanja kod hardfacing-a

Prije početka navarivanja potrebno je utvrditi kemijski sastav osnovnog materijala. Ako kemijski sastav nije poznat, primjenjuje se metoda pozitivne identifikacije materijala ili spektrometrija. Za identifikaciju materijala u praksi se često koristi test magnetizma (Tablica 3) i test iskrenja (Slika 20).

Tablica 3 – Test magnetizma odabranih osnovnih materijala [5]

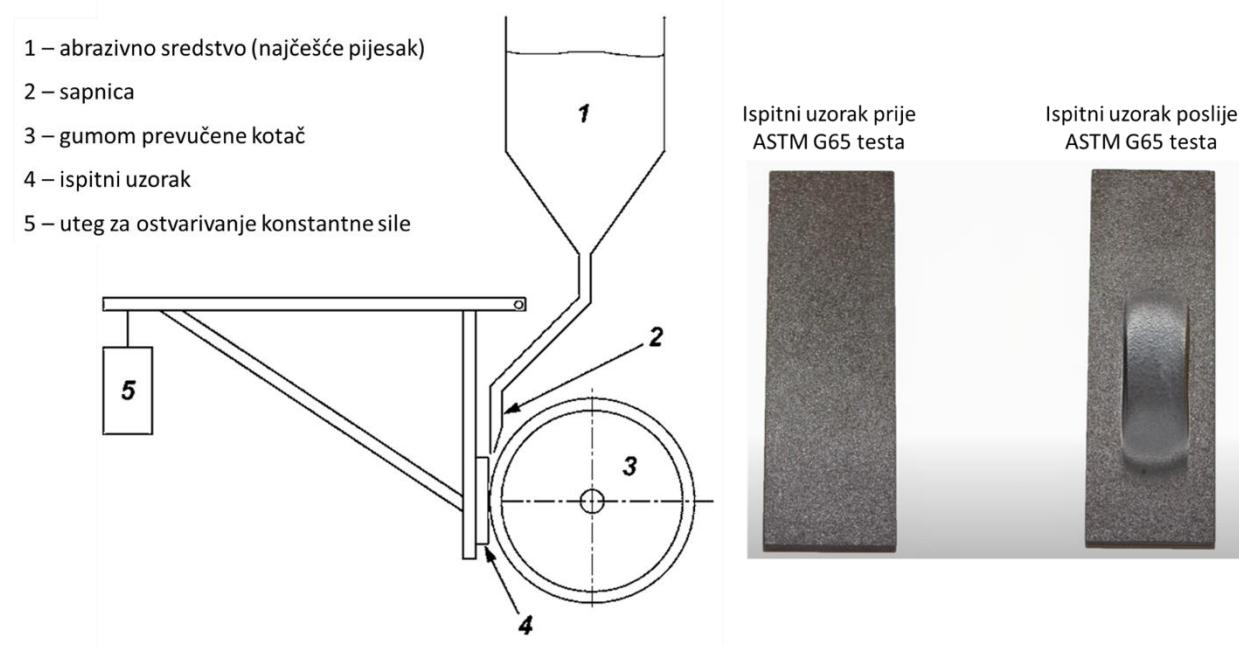
Nemagnetični	Blago magnetični	Visoko magnetični
Austenitni nehrđajući čelici Bakar Mjedi Bronce Aluminij	Nikal bakar legure Duplex nehrđajući čelici	Feritni nehrđajući čelici Ugljični čelici, nisko i visoko legirani čelici Lijevano željezo Legure na bazi nikla Legure na bazi kobalta



Slika 20 – Test iskrenja odabranih osnovnih materijala [5]

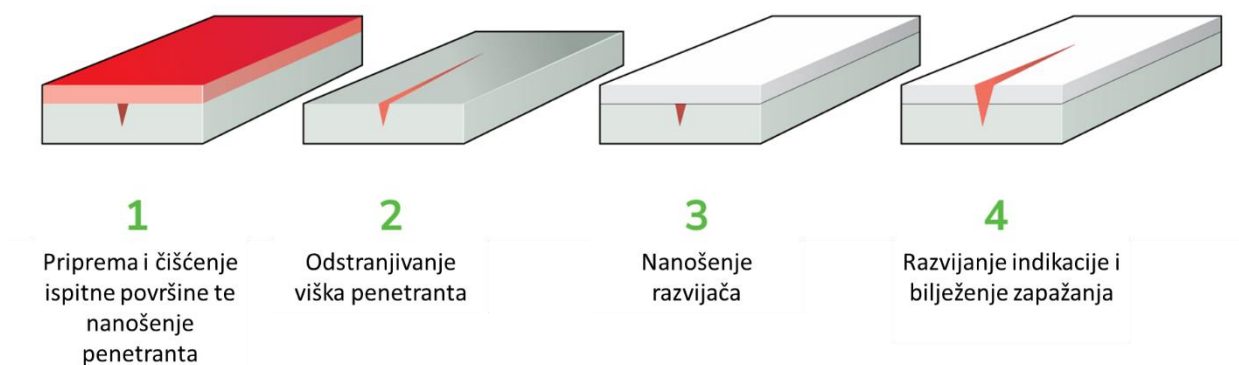
Često se odrađuju mjerenja tvrdoće nekim od postupaka: Brinellova metoda HB (za meke i srednje tvrde materijale), Rockwellova metoda (čelična kuglica HRB kod mjerenja tvrdoće mekših materijala, dijamantni stožac HRC kod mjerenja tvrdoće tvrdih materijala), Vickersova metoda HV, Mohs ljestvica i dr. [10]

Također se odrađuje testiranje na abrazijsko trošenje. ASTM G65 test [48] (Slika 21) je razorno ispitivanje za usporedbu otpornosti različitih navarenih slojeva otpornih na trošenje niskom i umjerenom abrazijom. Ispitni uzorak se stalnom silom pritišće na rotirajući kotač te se između njih pušta abrazivno sredstvo određenom brzinom. Ovakvo ispitivanje simulira za 30 minuta trošenje koje bi se u praksi dogodilo tijekom tisuću radnih sati nekog strojnog dijela na koji je navaren određeni sloj za zaštitu od trošenja. Ispitivanje završava izračunavanjem izgubljenog volumena prema čemu se, s obzirom na abrazivno trošenje u eksploataciji, bira odgovarajući materijal za navarivanje sloja otpornog na trošenje. [5]



Slika 21 – Shematski prikaz ASTM G65 testa (lijevo) [5] te uzorci prije i poslije (desno) [11]

Uz prethodno navedena ispitivanja, zbog pojave pukotina u osnovnom materijalu te materijalu navara koje nastaju zbog uvjeta navarivanja, izvodi se penetrantsko ispitivanje. Penetrantsko ispitivanje (Slika 22) jedno je od nerazornih površinskih ispitivanja čiji je cilj otkriti prema površini otvorene pukotine koje nisu vidljive golim okom.



Slika 22 – Shematski prikaz koraka penetrantskog ispitivanja [5]

2.2.5. Odabir odgovarajućeg dodatnog materijala za navarivanje s ciljem dobivanja navarenog sloja otpornog na trošenje

EN 14700 [49] je norma kojom je standardiziran dodatni materijal korišten za navarivanje s ciljem dobivanja navarenog sloja otpornog na trošenje. Dodatni materijali standardizirani su prema kemijskom sastavu te obliku u kojem dolaze. Sljedeće slovne oznake predstavljaju oblik u kojem dolazi dodatni materijal. [12]

- E – obložena elektroda;
- S – puna žica ili šipka;
- T – žica ili šipka s punjenom jezgrom;
- R – lijevana šipka;
- B – puna traka;
- C – sinterirana šipka, traka s punjenom jezgrom, sinterirana traka;
- P – metalni prah.

U Tablici 4 prikazani su simboli nekih legura korištenih kod navarivanja s ciljem dobivanja sloja otpornog na trošenje. Sljedećim oznakama označene su legure prikladne za određene uvjete rada. [12]

- g – otporne na trošenje abrazijom;
 - c – otporne na koroziju;
 - p – žilave legure;
 - s – zadržavanje ruba (otporne na tupljenje);
 - t – otporne na temperaturu;
 - z – otporne na taloženje kamenca;
-
- TM – tvrdi metal;
 - () – označava da se ne odnosi na sve legure.

Tablica 4 – Simboli i kemijski sastavi legura (DM-a) kod navarivanja prema EN 14700 [12]

Simboli legura	Uvjeti rada	Kemijski sastav [%]									
		C	Cr	Ni	Mn	Mo	W	V	Nb	ostali	Baza
Fe6	g, p, s	≤ 2,5	≤ 10	-	≤ 3	≤ 3	-	-	≤ 10	Ti	Fe
Fe8	g, p, t	0,2 - 2	5 - 18	-	0,3 - 3	≤ 4,5	≤ 2	≤ 2	≤ 10	Si, Ti	Fe
Fe13	g	≤ 1,5	≤ 0,4	≤ 4	0,5 - 3	≤ 4	-	-	-	B, Ti	Fe
Fe14	g, (c)	1,5 - 4,5	25 - 40	≤ 4	0,5 - 3	≤ 4	-	-	-	-	Fe
Fe15	g	4,5 - 5,5	20 - 40	≤ 4	0,5 - 3	≤ 2	-	-	≤ 10	B	Fe
Fe16	g, z	4 - 7,5	10 - 40	-	≤ 3	≤ 9	≤ 8	≤ 10	≤ 10	B, Co	Fe
Fe20	c, g, t, z	TM	-	-	-	-	-	-	-	-	Fe
Ni20	c, g, t, z	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Ni
Cr1	c, g	-	Baza	-	≤ 1	-	-	15- 30	-	Fe,B,Si,Zr	Cr

U nastavku je podjela dodatnih materijala za navarivanje s ciljem dobivanja navarenog sloja otpornog na trošenje prema britanskoj tvrtki „Welding Alloys“, vodećoj svjetskoj tvrtki koja proizvodi dodatni materijal za zavarivanje / navarivanje, automatizirane zavarivačke uređaje, te različite komponente s naglaskom na otpornost na trošenje. [14]

- Grupa 1 legure na bazi željeza s manje od 20 % legirnih elemenata;
- Grupa 2 legure na bazi željeza s više od 20 % legirnih elemenata;
- Grupa 3 neželjezne legure, legure na bazi kobalta i nikla;
- Grupa 4 legure s volframovim karbidom.

U sljedećim tablicama prikazane su legure i njihovi kemijski sastavi prema podjeli tvrtke „Welding Alloys“. Vrijednosti tvrdoće se odnose na tri navarena sloja DM-a.

2.2.5.1. Legure na bazi željeza s manje od 20 % legirnih elemenata

U Tablici 5 prikazani su niskolegirani čelici s maksimalno 0,2 % ugljika, maksimalne tvrdoće nakon navarivanja 250 HV. Najčešće se koriste u reparaturne svrhe ili kao prijelazni sloj. [5]

Tablica 5 – Kemijski sastav niskolegiranih čelika [5]

Trgovački naziv	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]
HARDFACE BUF	0,12	1,2	0,5	1,5	0,5	-
SPEEDARC X121T5-K4	0,07	1,4	0,5	0,55	0,4	2

U Tablici 6 prikazani su srednjolegirani čelici koji tijekom navarivanja deponiraju martenzitno-bainitnom strukturom. Vrijednosti tvrdoće se kreću od 250 HV do 700 HV. Uz malo kupovnu cijenu pružaju dobru otpornost na trošenje zbog prisutnosti karbidotvoraca (krom, molibden) te elementa koji rafiniraju strukturu (mangan koji pospješuje dezoksidaciju). Često se primjenjuju na alatima za zemljoradnju i agrikulturu. [5, 13, 15]

Tablica 6 – Kemijski sastav srednjolegiranih čelika [5]

Trgovački naziv	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	Tvrdoća	Struktura
ROBODUR K 250	0,1	1,5	0,7	1,5	0,2	250 HB	Bainit
ROBODUR K 450	0,4	1,5	0,7	2,5	0,5	450 HB	Martenzit
ROBODUR K CERAMIC	0,35	0,7	2,5	9,5	-	57 HRC	Martenzit
HARDFACE T	0,15	1,5	0,9	1,5	-	32 - 33 HRC	Bainit / martenzit
HARDFACE L	0,5	1,6	2,3	8,5	-	57 HRC	Martenzit

U Tablici 7 prikazani su alatni čelici s manje od 20 % legirnih elemenata. Najčešće su korišteni u izradi alata za kovanje ili se navaruju na takve alate. [5]

Tablica 7 – Kemijski sastav alatnih čelika s manje od 20 % legirnih elemenata [5]

Trgovački naziv	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ti [%]	W [%]	ostali	Tvrdoća
ROBOTOOL 46	0,2	1	0,6	5	4	0,3	-	-	42 - 45 HRC
ROBOTOOL 58	0,37	1,4	0,6	7	2,5	0,3	-	-	54 - 58 HRC
HARDFACE WLC	0,25	2	0,8	6,5	1,5	-	1,5	-	43 - 45 HRC
HARDFACE WMoLC	0,3	0,8	0,6	6,5	2	-	2	V 0,6	50 - 53 HRC
HARDFACE AR	1,1	0,4	0,25	5	7,6	-	2,2	V 1,1	60 - 63 HRC

U Tablici 8 prikazani su manganski čelici (austenitni čelici s 12% do 14% mangana). Tijekom rada postižu tvrdoću od 500 HV. Kod navarivanja na nelegirani ili niskolegirani čelik (OM) preporuča se korištenje austenitnog nehrđajućeg čelika kao prijelaznog sloja kako bi se spriječila pojava martenzitne strukture u zoni utjecaja topline. [5]

Tablica 8 – Kemijski sastav primjera manganskog čelika [5]

Trgovački naziv	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Tvrdoća nakon navarivanja	Tvrdoća tijekom rada
HARDFACE NM14	1	14	0,5	200 HB	46 HRC

2.2.5.2. Legure na bazi željeza s više od 20 % legirnih elemenata

U Tablici 9 prikazani su krom-manganski čelici (austenitni). Za razliku od manganskih čelika, mogu se navarivati na OM bez pojave neželjenih struktura. Često se koriste kao prijelazni sloj za navarivanje manganskih čelika. [5]

Tablica 9 – Kemijski sastav krom-manganskih čelika [5]

Trgovački naziv	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Tvrdoća nakon navarivanja	Tvrdoća tijekom rada
HARDFACE 19 9 6	0,1	6	0,5	19	9	180 HB	47 HRC
HARDFACE AP	0,4	16	0,5	14	-	240 HB	48 HRC

U Tablici 10 prikazani su alatni čelici s više od 20 % legirnih elemenata. Posjeduju svojstva slična svojstvima legura na bazi kobalta za navarivanje (zadržavaju svojstva i pri temperaturama 500°C do 600 °C). [5]

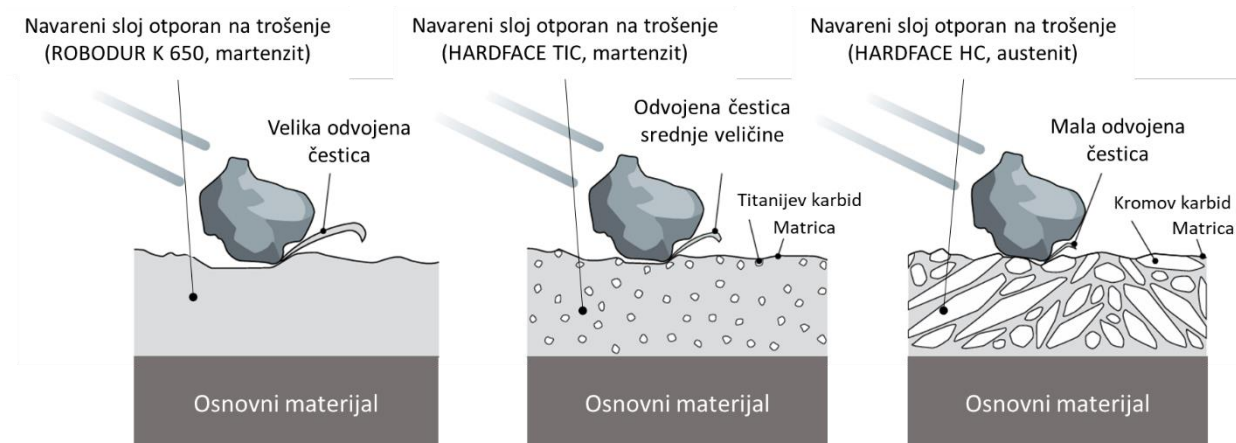
Tablica 10 – Kemijski sastav primjera alatnog čelika s više od 20 % legirnih elemenata [5]

Trgovački naziv	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Co [%]	Tvrdoća
HARDFACE DCO	0,15	0,4	0,7	14	2,5	0,5	12,5	47 HRC

U Tablici 11 prikazana su lijevana željeza sa sadržajem kroma. Sastoje se od tvrdih faza (karbida, borida) u martenzitnoj, bainitnoj ili austenitnoj matrici. Veličina tvrdih faza te njihova raspodjela u matrici (Slika 23) značajno utječu na otpornost pojedinim vrstama abrazije (npr. navareni slojevi s većim i gusto posloženim tvrdim fazama bit će otporniji, u usporedbi s onima gdje su tvrde faze manjih veličina) [5, 16]

Tablica 11 – Kemijski sastav lijevanih željeza sa sadržajem kroma [5]

Trgovački naziv	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Mo [%]	Nb [%]	ostali	Tvrdoća	Struktura matrice
HARDFACE HC	5	1,5	1,5	27	-	-	-	58 - 64 HRC	Austenit
HARDFACE CNV	5,5	0,5	1,5	22	5,5	6	W 2 V 1	65 HRC	Austenitno martenzitna
HARDFACE DIAMOND	> 5	1	1	> 10	-	6,5	V 6,5	60 - 65 HRC	Austenitno martenzitna
HARDFACE HC 333	3,5	0,2	1	32,5	0,5	-	-	60 HRC	Austenit
HARDFACE TIC	1,8	1,2	0,7	6,5	0,8	-	Ti 5 V 0,2	56 - 60 HRC	Martenzit
HARDFACE BN	0,5	2	1,3	-	-	-	B 4,5 Ni 2	64 HRC	Martenzit
HARDFACE BNC	2,5	2	0,6	11,5	-	5	B 2,2	64 - 68 HRC	Martenzit



Slika 23 – Shematski prikaz ovisnosti otpornosti na trošenje abrazijom o strukturi, veličini i raspodjeli tvrdih faza u matrici [5]

2.2.5.3. Neželjezne legure, legure na bazi kobalta i nikla

U Tablici 12 prikazane su legure na bazi kobalta. Uz otpornost na trošenje pružaju antikorozivna svojstva zbog prisutnosti velikog postotka kroma.

Tablica 12 – Kemijski sastav legura na bazi kobalta [5]

Trgovački naziv	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	W [%]	Fe [%]	ostali	Tvrdoća nakon navarivanja	Tvrdoća tijekom rada
STELLOY 25	0,15	1,5	1	20	14	4	Ni 9,5	210 HB	40 HRC
STELLOY 21	0,25	1	1	28	-	4	Ni 3 Mo 5,5	33 HRC	47 HRC
STELLOY 6	1,05	1	1	28,5	4,5	4	-	42 HRC	-
STELLOY 6HC	1,2	1	1	28,5	4,5	4	-	44 HRC	-
STELLOY 12	1,5	1	1	30	7,5	4	-	45 HRC	-
STELLOY 1	2,3	1	1	28,5	12	4	-	53 HRC	-

U Tablici 13 prikazane su legure na bazi nikla. Pružaju slabu otpornost abraziji pod povećanim pritiskom te žlijebljenju. Glavno svojstvo im je zadržavanje tvrdoće do 500 °C te otpornost na koroziju do 950 °C.

Tablica 13 – Kemijski sastav legura na bazi nikla [5]

Trgovački naziv	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	B [%]	Fe [%]	Tvrdoća nakon navarivanja
STELLOY 40	0,5	0,2	2	12,5	2,5	2,5	40 HRC
STELLOY 50	0,6	0,2	4	11,5	2,5	3,5	50 HRC
STELLOY 60	0,85	0,2	4	14,5	3	4,5	55 - 60 HRC

2.2.5.4. Legure s volframovim karbidom

U Tablici 14 prikazane su legure s volframovim karbidom u različitim matricama. DM najčešće dolazi u obliku žice s jezgrom punjenom zrcima volframovog karbida (100 µm do 250 µm) koja se tijekom navarivanja ne tale, već kao takva prelaze kroz električni luk i ulaze u kupku. Materijal obloge žice (nikal, nehrđajući ili ugljični čelik) stvara matricu navara. Važno je odabrati što manji unos topline, kako bi se osigurala dobra raspodjela volframovog karbida u matrici. Vrijednosti tvrdoće navedene u Tablici 14 odnose se na jedan navaren sloj DM-a. [5, 13]

Tablica 14 – Svojstva legura volframovog karbida u različitim matricama [5]

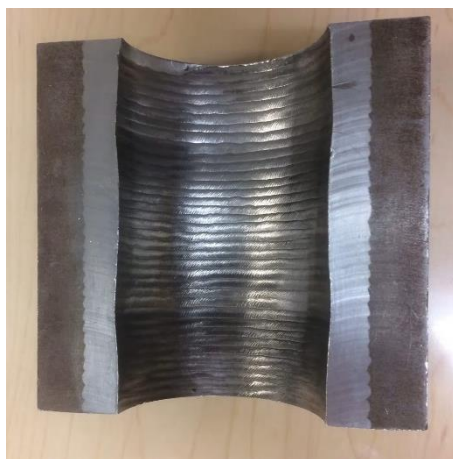
Trgovački naziv	Matrica	WC [%]	Tvrdoća	Tvrdoća karbida
HARDFACE NICARBW	Nikal	< 60	44 - 52 HRC	2000 - 2500 HV
HARDFACE STAINCARBW	Nehrdajući čelik	< 60	45 - 55 HRC	2000 - 2500 HV
HARDFACE STEELCARBW	Ugljični čelik	< 60	52 - 62 HRC	950 - 2000 HV

2.3. Navarivanje s ciljem dobivanja sloja otpornog na koroziju

2.3.1. Opis postupka

Uz sve navedene mehanizme trošenja u potpoglavlju 2.1. važno je navesti koroziju. Prema normi HRN EN ISO 8044 [50] „Korozija je fizikalno-kemijsko međudjelovanje metala i njegova okoliša koje uzrokuje promjenu upotrebnih svojstava metala te može dovesti do oštećenja funkcije metala, okoliša ili tehničkog sustava koji oni čine.“ [17] Jedan od načina zaštite metala od korozije je navarivanje s ciljem dobivanja sloja otpornog na koroziju. Kao i navarivanje s ciljem dobivanja sloja otpornog na trošenje, može se podijeliti na preventivni i reparaturni postupak, no najčešće se odrađuje preventivni postupak kako bi se na novom proizvodu relativno neplemenitog metala, slabe otpornosti na koroziju, navario sloj otporan na koroziju (npr. cjevovodi od ugljičnih čelika nisu otporni na agresivni okoliš u kojem se nalaze i medij koji može prolaziti kroz njih te se zbog toga navaruju slojevi otporni na koroziju koji štite OM od vanjskih utjecaja, dok ugljični čelik kao OM osigurava potrebna mehanička svojstva konstrukcije). Korištenjem navarivanja s ciljem dobivanja sloja otpornog na koroziju smanjuju se troškovi proizvodnje pojedinih novih proizvoda (moguće korištenje relativno jeftinog OM-a), a primjenom reparaturnog postupka produžuje se vijek trajanja proizvoda. Navarivanje s ciljem dobivanja sloja otpornog na koroziju se također može odrađivati s različitim elektrolučnim postupcima uz odgovarajuće parametre. [5, 18]

Za razliku od navarivanja s ciljem dobivanja sloja otpornog na trošenje gdje se mogu koristiti različiti uzorci navara, u ovom postupku moguća je primjena samo usporednih prolaza s kontinuiranim preklapanjem (Slika 24) čime se osigurava nepostojanje kontakta između okoline i OM-a.



Slika 24 – Uzdužni presjek cijevi na čijoj su unutrašnjoj stijenki vidljivi navareni usporedni prolazi s kontinuiranim preklapanjem [19]

2.3.2. Pukotine nastale zbog skupljanja materijala, temperature predgrijavanja

U slučaju navarivanja slojeva otpornih na koroziju, pukotine nisu dopuštene kako bi se osiguralo nepostojanje kontakta između okoline i OM-a. U nastavku su opisani postupci navarivanja nehrđajućih čelika. [5, 20, 21]

2.3.2.1. Martenzitni nehrđajući čelici

Područje navarivanja se predgrijava na temperaturu iznad martenzit-start linije kako bi zona taljena i zona utjecaja topline tijekom navarivanja imale strukturu austenita. Zbog velike prokaljivosti i pri sporom hlađenju te prethodnom predgrijavanju, austenit zone taljenja i zone utjecaja topline prelazi u martenzit. Cilj predgrijavanja u ovom slučaju je izbjegavanje krhke martenzitne strukture tijekom navarivanja, čime se povećava istežljivost, žilavost i difuzija vodika iz navara. [21]

Nakon navarivanja vrši se hlađenje ispod martenzit-finiš linije kako bi se struktura pretvorila u igličasti martenzit koji se kasnije popuštanjem (temperatura popuštanja ispod A1 linije) raspada i kao takav tvori žilavu strukturu. [21]

Kod martenzitnih čelika, ali i ostalih čelika s visokim sadržajem kroma na temperaturama iznad 457 °C dolazi do krhkosti zbog pojave intermetalnih spojeva:

- σ (sigma) faza, intermetalni spoj FeCr u kompleksnom omjeru, velike tvrdoće (1000 HV) i krhkosti, smanjuje otpor puzanju materijala pri sadržaju kroma iznad 20 %, pojavljuje se u temperaturnom intervalu od 600 °C do 830 °C (puzanje materijala je toplinski aktivirani, nepovratni proces, deformacije materijala koji nastaje u uvjetima konstantnog opterećenja tokom duljeg vremena na povišenoj temperaturi) [20, 22];
- χ (hi) faza, intermetalni spoj $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$, pojavljuje se kod čelika sa sadržajem molibdena oko 3,5 % pri dužem vremenu zagrijavanja na višim temperaturama; povećava krhkost [20].

2.3.2.2. Feritni nehrđajući čelici

Kod feritnih nehrđajućih čelika ne dolazi do faznih transformacija, tj. kod hlađenja ne dolazi do zakaljivanja zbog prisutnosti 12 % do 30 % kroma i ostalih elemenata (molibden, vanadij, niobij, aluminij) koji proširuju feritno područje te manjeg postotka ugljika (< 0,1 %). Iznad 900°C u materijalu zone utjecaja topline javlja se sklonost porastu zrna zbog ubrzane difuzije unutar BCC

kristalne rešetke. Zbog pogrubljenja zrna, pri sobnoj temperaturi, feritni nehrđajući čelik postaje krhak. Takva promjena je nepovratna, tj. nemoguće je toplinskom obradom vratiti materijal u sitnozrnatu strukturu zbog toga što ne dolazi do faznih transformacija prilikom zagrijavanja i hlađenja. Ova pojava se može spriječiti tako da dio OM-a na kojem se odrađuje navarivanje bude što kraće na temperaturama iznad 1150 °C. [20]

Predgrijavanje se u pravilu ne odrađuje, osim u slučaju visokog postotka kroma i ugljika (postotak ugljika > 0,25 %) temperaturom oko 200 °C. Nakon navarivanja provodi se žarenje na 750 °C do 850 °C uz brzo hlađenje kako bi se povećalo istezanje prijelazne zone te otpornost na interkristalnu koroziju. [21]

2.3.2.3. Austenitni nehrđajući čelici

Kod austenitnih nehrđajućih čelika također ne dolazi do faznih transformacija, zbog prisutnosti elemenata koji proširuju austenitno područje (nikal, mangan). Mogući problemi koji se pojavljuju: [17, 20, 21]

- Interkristalna korozija; pri temperaturama od 400 °C do 800 °C zbog difuzijskih procesa i velikog afiniteta ugljika prema kromu, na granicama zrna izlučuje se kromov karbid Cr_{23}C_6 koji u sebi sadrži više od 70 % kroma koji je u OM-u, u okruženju kromovog karbida nastaju područja s niskim udjelom kroma (ispod 12 % kroma) čime su nezadovoljeni uvjeti otpornosti na koroziju (min. 12 % kroma i monofazna struktura); sprječava se korištenjem čelika sa smanjenim udjelom ugljika te stabiliziranih čelika (legirani sa titanijem i niobijem) i dr.;
- Tople pukotine zbog segregacija (sulfida, fosfida) koji imaju nisku temperaturu tališta;
- Izlučivanje krhkih faza (σ faza, karbidi).

Predgrijavanje se najčešće ne odrađuje, osim kod debljih komada (100 °C do 150 °C), a u nekim slučajevima je zabranjeno. Potrebno je što brže hlađenje navara u temperaturnom intervalu od 850°C do 450 °C kako bi se smanjila mogućnost izlučivanja Cr_{23}C_6 na granicama zrna (često se preporuča hlađenje vodom). Temperatura prije navarivanja svakog prolaza se ograničava na najviše 100 °C kako bi se osiguralo brže hlađenje navara te izbjeglo stvaranje Cr_{23}C_6 . Moguća je primjena popuštanja naprežanja te gašenje (žarenje na 1050 °C do 1100 °C + naglo hlađenje u vodi) [20, 21]

2.3.3. Odabir dodatnog materijala za navarivanje s ciljem dobivanja navarenog sloja otpornog na koroziju prema EN 14700 i tvrtki „Welding Alloys“

U Tablici 15 prikazani su simboli nekih legura korištenih kod navarivanja s ciljem dobivanja sloja otpornog na koroziju. Sljedećim oznakama označene su legure prikladne za određene uvjete rada. [12]

- c – otporne na koroziju;
- g – otporne na trošenje abrazijom;
- p – žilave legure;
- s – zadržavanje ruba (otporne na tupljenje);
- t – otporne na temperaturu;
- z – otporne na taloženje kamenca;
- w – precipitacijski očvrsnute (homogenizacijsko žarenje + gašenje + umjetno ili prirodno dozrijevanje) [13];
- () – označava da se ne odnosi na sve legure.

Tablica 15 – Simboli i kemijski sastavi legura (DM-a) kod navarivanja prema EN 14700 [12]

Simboli legura	Uvjeti rada	Kemijski sastav [%]									
		C	Cr	Ni	Mn	Mo	W	V	Nb	ostali	Baza
Fe5	c,p,s,t,w	≤ 0,5	≤ 0,1		≤ 1	3 - 5	-	-	-	Co, Al	Fe
Fe7	c,p,t	≤ 0,2	4 - 30	≤ 6	≤ 3	≤ 2	-	≤ 1	≤ 1	Si	Fe
Fe11	c,n,z	≤ 0,3	18 - 31	8 - 20	≤ 3	≤ 4	-	-	≤ 1,5	Cu	Fe
Fe12	c,(n),z	≤ 0,08	17 - 26	9 - 26	0,5 - 3	≤ 4	-	-	≤ 1,5	-	Fe
Fe14	g,(c)	1,5 - 4,5	25 - 40	≤ 4	0,5 - 3	≤ 4	-	-	-	-	Fe
Fe20	c,g,t,z	TM	-	-	-	-	-	-	-	-	Fe
Ni1	c,p,t	≤ 0,6	15 - 30	Baza	0,3 - 1	≤ 6	≤ 2	≤ 1	-	Si,Fe,B	Ni
Ni3	c,p,t	1 - 3	1 - 15	Baza	0,3 - 1	≤ 6	≤ 2	≤ 1	-	Si,Fe,B	Ni
Ni20	c,g,t,z	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Ni
Co2	t,z,(c,s)	-	20 - 35	≤ 4	0,1 - 2	-	4 - 10	-	-	Fe	Co
Co3	t,z,(c,s)	-	20 - 35	≤ 4	≤ 2	≤ 1	6 - 14	-	-	Fe	Co
Cu1	c,(n)	-	-	≤ 6	≤ 15	-	-	-	-	Al,Fe,Sn	Cu
Al1	c,n	-	-	10 - 35	≤ 0,5	-	-	-	-	Cu, Si	Al
Cr1	c,g	-	Baza	-	≤ 1	-	-	15 - 30	-	Fe,B,Si,Zr	Cr

Podjela prema tvrtki „Welding Alloys“ također predlaže DM za dobivanje sloja otpornog na koroziju. Važno je naglasiti da tvrtka „Welding Alloys“ predlaže legure čije je primarno svojstvo otpornost na trošenje, no posjeduju i otpornost na koroziju. U sljedećim tablicama prikazane su legure i njihovi kemijski sastavi prema podjeli tvrtke „Welding Alloys“. Vrijednosti tvrdoće se odnose na tri navarena sloja DM-a.

2.3.3.1. Legure na bazi željeza s manje od 20 % legirnih elemenata

U Tablici 16 prikazani su martenzitni nehrđajući čelici. Dodatak dušika i kobalta povećava otpornost na visoke temperature i koroziju. Dušik smanjuje segregacije kromovih karbida na granicama zrna, dok kobalt povećava otpornost na visoke temperature. Kod navarivanja na niskolegirani ili srednjolegirani čelik (OM) preporuča se korištenje prijelaznog sloja s većim postotkom kroma (iznad 17 %) kako bi se spriječila pojava pukotina u eksploataciji. [5]

Tablica 16 – Kemijski sastav martenzitnih nehrđajućih čelika s manje od 20 % legirnih elemenata [5]

Trgovački naziv	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	N [%]	V [%]	W [%]	Co [%]	Tvrdoća
CHROMECORE 430	0,05	1	0,8	17,5	-	-	-	-	-	-	220 HB
CHROMECORE 414	0,05	1,2	1	13,5	4	0,5	-	-	-	-	40 HRC
CHROMECORE 434N	0,05	1,2	0,7	17	3,5	0,5	0,08	-	-	-	38 HRC
CHROMECORE 414N	0,05	1,2	0,8	14	3,5	1	0,07	-	-	-	42 HRC
CHROMECORE 434DN	0,05	1,2	0,8	16,5	3	0,5	0,08	0,5	0,8	2	40 HRC
CHROMECORE 414DN	0,05	1,2	0,8	13,5	4	0,5	0,07	0,5	0,8	2	42 HRC

2.3.3.2. Neželjezne legure, legure na bazi kobalta i nikla

Legure na bazi kobalta navedene u Tablici 12 te legure na bazi nikla navedene u Tablici 13 (stranica 30) koriste se i za navarivanje slojeva otpornih na koroziju. Bez obzira na OM, prije navarivanja legura na bazi kobalta, potrebno je predgrijavanje (350 °C) te nakon navarivanja sporo hlađenje kako bi se izbjegla pojava pukotina, koje dovode do gubitka otpornosti na koroziju. [5]

2.4. Utjecaj pojedinog legirnog elementa u DM-u, odabir odgovarajućeg DM-a za odrađivanje navarivanja

Ugljik je glavni element koji otvrdnjava i ojačava legure na bazi željeza. U kombinaciji s elementima karbidotvorcima (npr. krom, titanij, niobij, volfram) tvori tvrde karbide. Čvrstoća i tvrdoća legura se povećava s povećanjem udjela ugljika, dok se zavarljivost i strojna obradivost smanjuju. [5]

Mangan kao legirni element pročišćava čelik od kisika i sumpora (stvara okside koji izlaze u trosku). [5, 13]

Nikal kao legirni element ne tvori karbide, osigurava austenitnu strukturu pri sobnoj temperaturi (gamageni element), povišuje otpornost na opću koroziju feritnih čelika u medijima koji sadrže sumpornu kiselinu. Povećava čvrstoću i žilavost čelika te smanjuje otpornost na napetosnu koroziju (negativno). [5, 13]

Krom poboljšava otpornost na toplinu. Minimalni udio od oko 12 % kroma u leguri osigurava otpornost na koroziju (uz monofaznu strukturu kao drugi uvjet). Smanjuje toplinsku vodljivost legure te stvara karbide koji poboljšavaju otpornost na trošenje. [5]

Molibden povećava čvrstoću i otpornost na koroziju. Pruža otpornost na koroziju u morskoj atmosferi (otpornost na djelovanje natrijevog klorida NaCl). Kao legirni element u feritnim, austenitnim i dupleks čelicima povećava otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procjepu. [5, 13]

Niobij je snažan karbidotvorac. Kao legirni element u austenitnim nehrđajućim čelicima sprječava pojavu interkristalne korozije. Kao stabilizator se dodaje u vatrootporne austenitne čelike. [5]

Vanadij se kao karbidotvorac dodaje u legure kako bi se smanjila osjetljivost na popuštanje (otpornost na popuštanje je svojstvo materijala alata da zadrži visoku tvrdoću i svojstva s porastom temperature tj. na povišenoj radnoj temperaturi). Pročišćava i dezoksidira čelik te u minimalnom udjelu 0,1 % do 0,4 % povećava čvrstoću čelika, tvrdoću, otpornost na trošenje. [5, 13]

Volfram je snažan karbidotvorac (tvori vrlo tvrde karbide) te povećava otpornost na trošenje i popuštanje. [5, 13]

Titanij kao legirni element povećava otpornost na djelovanje kiselina, lako se veže s ugljikom (stvara karbid) te kisikom (dezoksidacija). Titanijev karbid se formira u malim česticama te se time povećava otpornost na vanjske udarce. [5, 13]

Kobalt kao legirni element ne tvori karbide, povećava otpornost na temperaturu usporavanjem rasta zrna. Dodaje se čelicima kako bi im se povećala tvrdoća, žilavost i otpornost na popuštanje. Pruža otpornost na koroziju i eroziju. [5, 13]

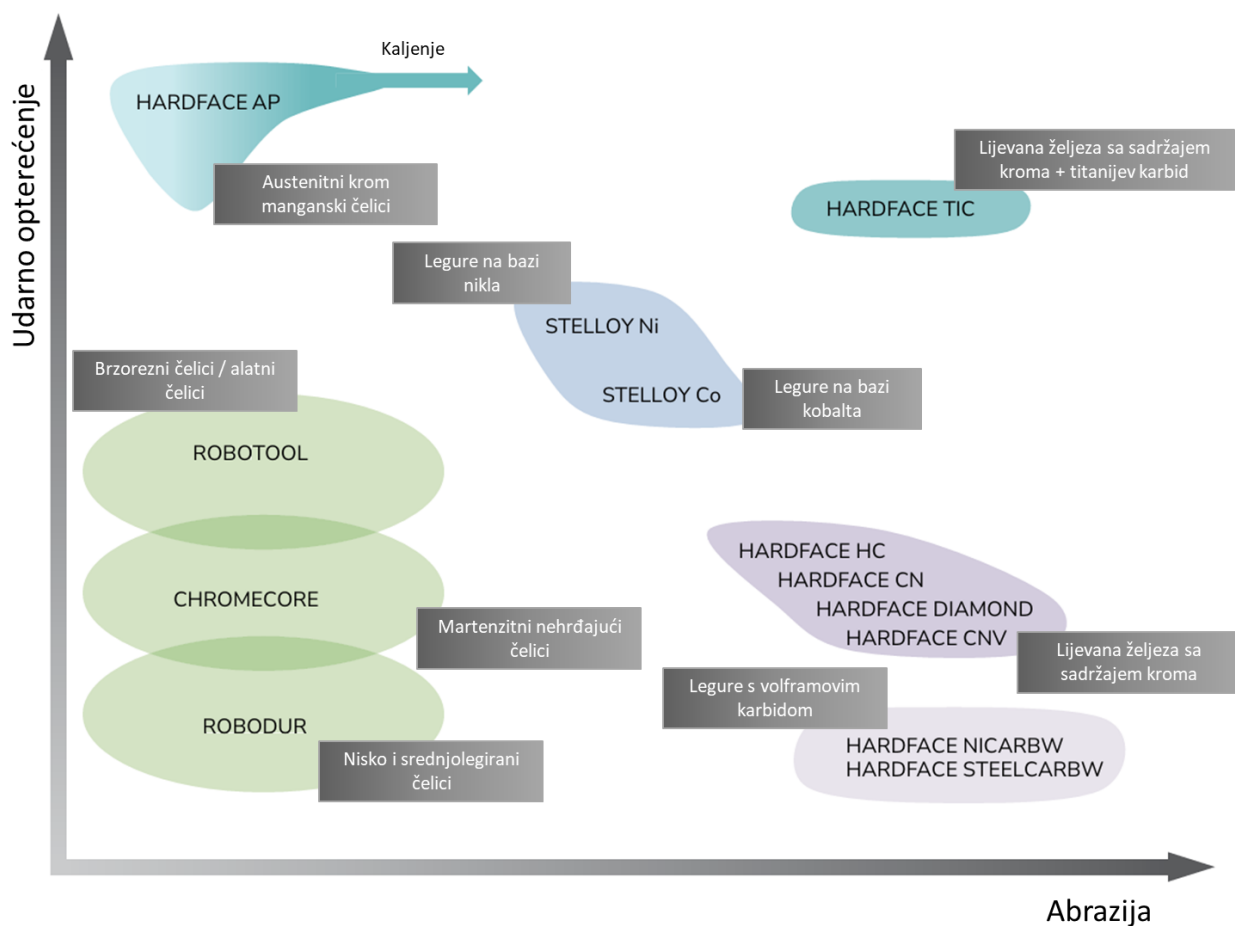
U Tablici 17 prikazani su utjecaji pojedinog legirnog elementa na odabrana svojstva važna za slojeve otporne na trošenje i koroziju. Tumačenje znakova u Tablici 17:

- „+“ → pozitivno djelovanje na određeno svojstvo;
- „-“ → negativno djelovanje na određeno svojstvo;
- „/“ → ne djeluje na određeno svojstvo.

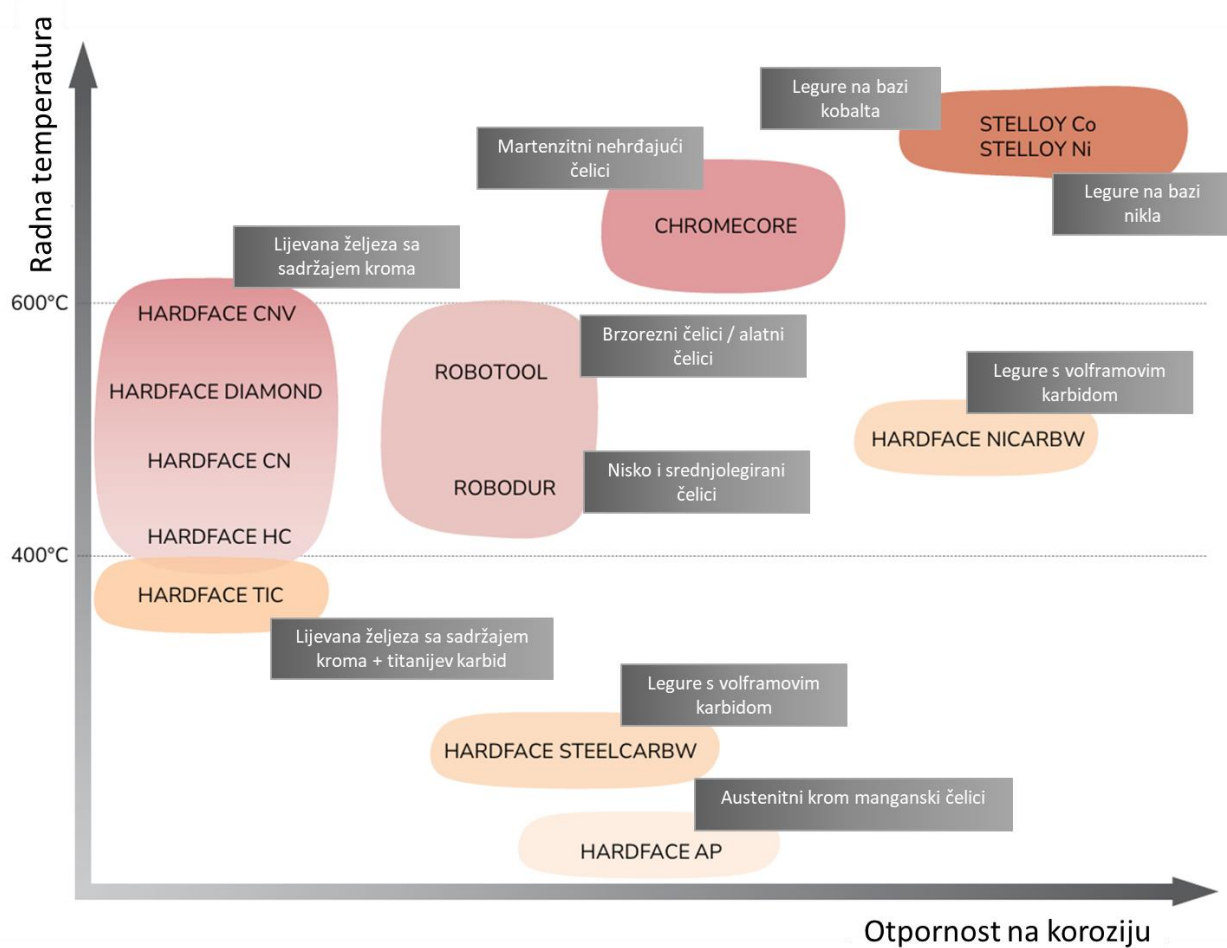
Tablica 17 – Utjecaji pojedinog legirnog elementa na odabrana svojstva važna za slojeve otporne na trošenje i koroziju [5]

Legirni element	Tvrdoća	Rad pri povišenim temperaturama	Otpornost na udarce	Duktilnost	Otpornost na koroziju
Ugljik	++++	++	-----	-----	--
Mangan	/	/	+++	+++	/
Nikal	/	++	++	++	+
Krom	++++	++	-----	---	++++
Molibden	++	+++	++	-	++
Niobij	++++	+++	+	---	+
Vanadij	+++	++	-	---	/
Volfram	++++	++++	--	-----	/
Titanij	+++	/	+++	-	+
Kobalt	++	++++	++	++	++++

Slikom 25 prikazan je odabir odgovarajućeg DM-a za odrađivanje navarivanja s obzirom na udarna opterećenja i trošenje abrazijom te Slikom 26 odabir s obzirom na radnu temperaturu i otpornost na koroziju prema tvrtki „Welding Alloys“. [5]



Slika 25 – Prikaz odabira DM-a za odrađivanje navarivanja s obzirom na udarna opterećenja i trošenje abrazijom [5]



Slika 26 – Prikaz odabira DM-a za odrađivanje navarivanja s obzirom na radnu temperaturu i otpornost na koroziju [5]

2.5. Prijelazni (buffer) sloj

Prijelazni (eng. buffer) sloj koristi se u postupku navarivanja kad je potrebno umanjiti nekompatibilnost između osnovnog materijala i navarenog sloja dodatnog materijala te kad se DM navaruje na nepoznati materijal. Prijelazni sloj osigurava dobru vezu između OM-a i DM-a te sprječava propagaciju pukotina nastalih zbog skupljanja dodatnog materijala na osnovni materijal, tj. stvara zaštitnu barijeru između OM-a i DM-a. Materijal prijelaznog sloja odabire se na način da najbolje odgovara OM-u i DM-u, u protivnom mogu nastati naprezanja koja uzrokuju prijevremeno propadanje navara. [3, 5]

Niskolegirani i srednjolegirani čelici se koriste kao prijelazni slojevi u slučaju relativno mekog OM-a (sprječavaju zgnječenje navarenog sloja u OM (Slika 27)). [5]



Slika 27 – Shematski prikaz zgnječenja navarenog sloja u OM (lijevo) te primjena prijelaznog sloja niskolegiranog ili srednjolegiranog čelika za sprječavanje zgnječenja (desno) [5]

Austenitni nehrđajući čelici su najčešći materijali prijelaznih slojeva. Apsorbiraju naprezanja nastala zbog skupljanja materijala te zamjenjuju predgrijavanje. [5]

Najčešće korišteni materijali prijelaznog sloja (austenitni nehrđajući čelici) prema tvrtki „Welding Alloys“ su: [5]

- TRI S 309 (0,03 % C, 1,8 % Mn, 0,8 % Si, 24 % Cr, 13 % Ni, 2,8 % Mo) [23];
- TRI S 312 (0,03 % C, 1,8 % Mn, 0,8 % Si, 29 % Cr, 9,5 % Ni, 0,4 % Mo) [24];
- HARDFACE 19 9 6 (0,1 % C, 6 % Mn, 0,5 % Si, 19 % Cr, 9 % Ni) [25];
- HARDFACE AP (0,4 % C, 14 % Mn, 0,6 % Si, 14,5 % Cr) [26].

2.6. Miješanje OM-a i DM-a tijekom navarivanja, prednosti i nedostaci navarivanja

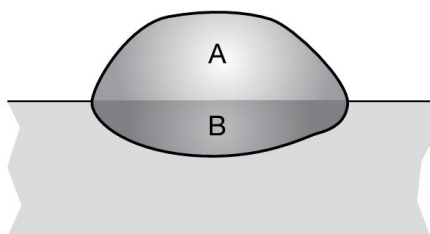
Kod navarivanja, osnovno je pravilo izabrati postupak koji daje najmanji stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala, tj. teži se što manjem razrjeđivanju dodatnog materijala zbog toga što miješanje utječe na kemijski sastav, tvrdoću i ukupnu kvalitetu navara. Stupanj miješanja OM-a i DM-a izračunava se prema formuli: [1, 5]

$$\text{stupanj miješanja [\%]} = \frac{B}{A + B} \times 100 \quad (5)$$

Gdje je

- B → površina poprečnog presjeka prolaza navara ispod površine OM-a [mm^2];
- A → površina poprečnog presjeka prolaza navara iznad površine OM-a [mm^2].

Slikom 28 prikazane su navedene površine korištene u izračunu stupnja miješanja OM-a i DM-a.



Slika 28 – Shematski prikaz površina korištenih u izračunu stupnja miješanja OM-a i DM-a [5]

Plinsko zavarivanje te zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina koriste se za navarivanje oštih rubova i malih površina, srednje površine se navaruju ručnim elektro-lučnim postupkom, a velike površine zavarivanjem u atmosferi inertnog plina (MIG) i aktivnog plina (MAG). Plazma, laser i zavarivanje elektronskim snopom pogodni su za najmanje površine zbog visoke gustoće energije (npr. navarivanje bridova reznih alata). [1] Slikom 29 prikazane su vrijednosti stupnja miješanja osnovnog i dodatnog materijala za pojedini postupak navarivanja.

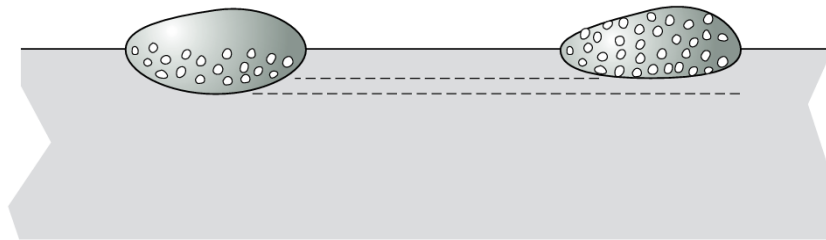
1-20 %	20-35 %	2-20 %	10-30 %	30-40 % (5-20 %)
Plinsko zavarivanje	REL	TIG	MIG / MAG	EPP žica (EPP traka)

Slika 29 – Shematski prikaz vrijednosti stupnja miješanja OM-a i DM-a za pojedini postupak navarivanja [1]

Stupanj miješanja ovisi o količini rastaljenog OM-a, dok ona ovisi o samom postupku navarivanja i korištenim parametrima (jakost struje, brzina navarivanja i dr.). Kvaliteta navarenog sloja u pravilu se pogoršava proporcionalno s miješanjem OM-a i DM-a. Što je manja toplinska vodljivost OM-a (sporije odvodi toplinu), time je veće miješanje. Također, ako je temperatura taljenja DM-a niža od temperature taljenja OM-a, miješanje je manje (u obrnutom slučaju veće). [1, 3, 5]

Kod navarivanja legura s visokim stupnjem miješanja OM-a i DM-a, nužno je navarivanje odraditi u više slojeva. Najveće miješanje je u prvom sloju te se svakim sljedećim slojem smanjuje, tj. svaki sljedeći sloj se sve više približava sastavu DM-a (npr. navarivanje čelika s 25 % kroma i 13 % nikla na ugljični čelik, dobiva se prvi sloj približnog sastava 18 % kroma i 9 % nikla). [1, 3]

U slučaju veće specifične težine legirnih elemenata u DM-u, veće je i njihovo slijeganje u donje slojeve navara (tonu u kupku). Preporuča se višeslojno navarivanje takvih legura (npr. legure s volframovim karbidom (Slika 30)). [1, 3, 5]



Slika 30 – Shematski prikaz potonuća volframovog karbida dublje u kupku (lijevo) te uspješno raspoređivanje po matrici (desno) [5]

Prednosti postupka navarivanja u usporedbi s drugim postupcima obrade površine su: [1]

- Djelomično rastaljeno stanje osnovnog materijala osigurava bolju metaluršku vezu navarenog sloja i osnovnog materijala;
- Mogućnost nanošenja navarenih slojeva veće debljine (najčešće 1 mm do 10 mm, čak i do 20 mm);
- Mogućnost nanošenja višestrukih slojeva;
- Mogućnost navarivanja na bilo koji metalni materijal;
- Mogućnost postizanja selektivnih navarenih slojeva određenih svojstava ovisno o potrebama (npr. radni komad mora na jednom dijelu biti otporan na koroziju jer se nalazi u agresivnoj atmosferi, a na drugom otporan na trošenje jer je u okruženju djelovanja abrazivnih čestica);
- Postupak je vrlo učinkovit.

Nedostaci postupka navarivanja u usporedbi s drugim postupcima obrade površine su: [1]

- Relativno velika deformacija obrađivanih predmeta zbog visokog unosa topline;
- Otežano nanošenje navarenog sloja na dijelove složenog oblika;
- Potrebna je priprema površine prije navarivanja te dodatna obrada nakon navarivanja, ako je nužna točna geometrija obrađivane površine.

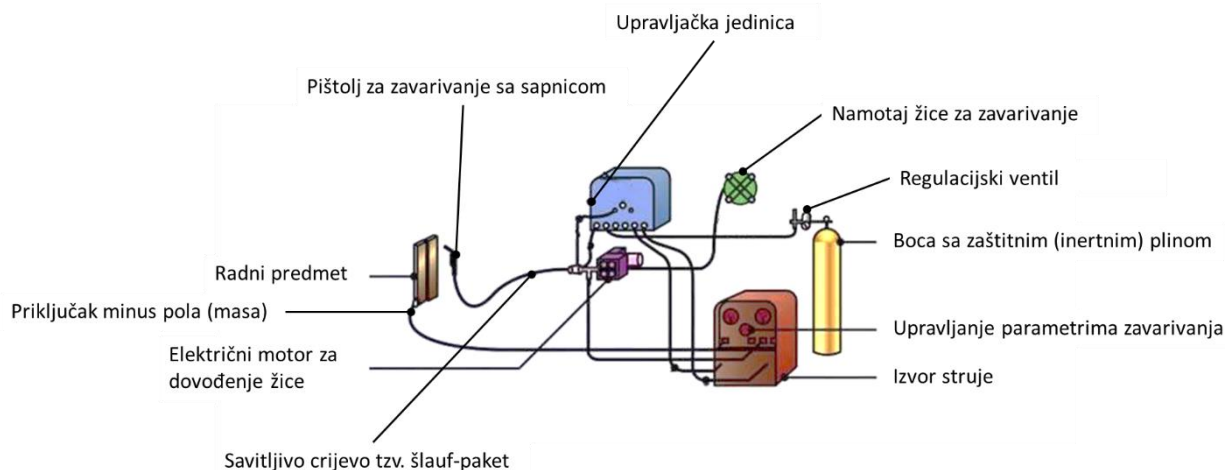
3. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio završnog rada proveden je u svrhu istraživanja mogućnosti navarivanja nehrđajućeg čelika na opći konstrukcijski čelik (navarivanje s ciljem dobivanja sloja otpornog na koroziju, eng. cladding) te odrediti uspješnost navarenih uzoraka s različitim jakostima struje za navarivanje. Eksperimentalni dio rada proveden je u laboratorijima Sveučilišta Sjever u Varaždinu.

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je odrediti utjecaj jakosti struje navarivanja na uspješnost dobivanja spoja između OM-a i DM-a te ostvariti navareni sloj otporan na koroziju. MIG postupkom zavarivanja izrađena su dva odvojena navarena sloja na ploči općeg konstrukcijskog čelika S235JR kao OM-a. Svaki sloj se sastoji od 7 usporednih prolaza s kontinuiranim preklapanjem. Iz navarenog sloja su se nakon glodanja izrezala dva uzorka koja su zatim prošla faze obrade površine potrebne za ispitivanje. Pripremljeni uzorci korišteni su za ispitivanje makrostrukture navarenog sloja te određenih geometrijskih karakteristika svakog prolaza kao što su širina pojedinog prolaza, te dubina prolaza mjerena od vrha obrađenog navara.

3.1. MIG postupak zavarivanja / navarivanja

Naziv MIG dolazi od engleskog izraza Metal Inert Gas (Metal inertni plin), a predstavlja elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina. Slikom 31 prikazan je sustav za MIG zavarivanje.



Slika 31 – Shematski prikaz sustava za MIG zavarivanje [27]

Kod MIG postupka zavarivanja metalna elektroda, koja je ujedno i dodatni materijal, se potiskuje kroz kontaktnu vodilicu koja je najčešće spojena na plus pol izvora struje, prema osnovnom materijalu, tj. radnom predmetu (koji je u tom slučaju spojen na minus pol) te se uspostavlja električni luk kratkim spojem. Električni luk se održava između taljive elektrode, tj. žice za zavarivanje i osnovnog materijala. Žica za zavarivanje se s koluta pomoću automatskog sustava

za dovođenje kontinuirano dovodi na mjesto zavarivanja / navarivanja gdje se tali u električnom luku uz zaštitu inertnog plina (plin izlazi iz plinske boce namještenim protokom) i prenosi u rastaljenu kupku na osnovnom materijalu. [28, 29]

Osnovni parametri MIG zavarivanja su [28, 29]:

- Napon zavarivanja; tijekom zavarivanja se orijentacijski kreće od 16 V do 26 V;
- Jakost struje zavarivanja; tijekom zavarivanja se orijentacijski kreće od 30 A do 600 A, ovisno o promjeru žice za zavarivanje;
- Brzina zavarivanja; ovisno o korištenoj tehnici zavarivanja, promjeru žice za zavarivanje i parametrima zavarivanja se orijentacijski kreće od 20 cm/min do 50 cm/min;
- Napon praznog hoda najčešće iznosi 60 V.

Uz osnovne parametre, na kvalitetu zavarenog / navarenog sloja MIG postupkom značajno utječu [29]:

- Promjer korištene žice za zavarivanje (kod konstantne jakosti struje tanja žica daje veći učinak taljenja i penetraciju u odnosu na deblju žicu, deblja žica daje širi zavar / navar);
- Duljina slobodnog kraja žice (duljina žice od izlaza iz kontaktne vodilice do početka električnog luka, u pravilu iznosi 13 puta promjer žice zavarivanja / navarivanja, no ne više od 20 mm);
- Količina zaštitnog plina, tj. protok plina (ovisi o promjeru žice, jakosti struje zavarivanja / navarivanja i uvjetima zavarivanja / navarivanja; orijentacijska vrijednost protoka plina iznosi 10 puta promjer žice zavarivanja / navarivanja).

Kod zavarivanja MIG postupkom, ovisno o polaritetu elektrode, jakosti struje i napona zavarivanja / navarivanja, vrsti zaštitnog plina, kemijskom sastavu DM-a te karakteristikama izvora struje, pojavljuju se sljedeći oblici prijenosa metala [28, 29]:

- Prijenos materijala slobodnim letom; rastaljena kapljica s vrha elektrode (žice za zavarivanje, tj. DM-a) prenosi se slobodnim letom kroz električni luk na OM;
 - Štrcajući luk (eng. Spray Arc);
 - Pulsirajući luk (eng. Puls Arc);
 - Prijenos strujama visoke gustoće (eng. Rotating Spray Arc).
- Prijenos premošćivanjem; rastaljena kapljica dolazi u fizički kontakt s OM-om, prilikom čega nastaje kratki spoj.
 - Kratki spoj (eng. Short Arc);
 - Mješoviti luk (eng. Mix Arc).

3.2. Korištena oprema

U eksperimentu, kao izvor struje za navarivanje korišten je *Fronius TransSteel 3000 Pulse* [30]. Za postizanje konstantne brzine navarivanja i linijskog vođenja korišten je *Promotech Rail Bull* automat za precizno vođenje pištolja [31]. Za mjerenje temperature prije svakog prolaza korišten je kontaktni termometar *SKF TKTL 20* [32] s temperaturnom sondom *SKF TMDT 2-30* [33]. Za poravnavanje površine navara korišten je CNC obradni centar *Kitamura Mycenter-I* [34] i glodalo s izmjenjivim pločicama *ISCAR HM390 -10* promjera 40 mm [35]. Uzorci su izrezani strojnom tračnom pilom. Za pripremu površine uzoraka korišten je uređaj za brušenje i poliranje *Metkon Forcipol IV Grinder & Polisher* [36], a za nagrizanje 19 % klorovodična kiselina, voda, bakrena pločica, baterija od 9 V, Petrijeva zdjelica, laboratorijska čaša, pol kleme i podesiva kliješta. Makrostruktura uzoraka ispitana je stereomikroskopom *Olympus SZX10* [37] pomoću računalnog programa *OLYMPUS Stream Essentials 2.5.2* [38]. U nastavku su navedene karakteristike opreme i dodatnog materijala korištenih u eksperimentu.

3.2.1. Izvor struje za navarivanje *Fronius TransSteel 3000 Pulse*

Fronius TransSteel 3000 Pulse je impulsni uređaj za zavarivanje s integriranim dodavačem žice. Kompaktan je, mobilan i fleksibilan zahvaljujući invertorskoj tehnologiji. Posjeduje mogućnost zavarivanja REL, MIG, MAG i TIG postupkom. Pogodan je za zavarivanje različitih vrsta materijal [30, 39, 40]. Slikom 32 prikazan je izvor struje za navarivanje *Fronius TransSteel 3000 Pulse* korišten u eksperimentu.



Slika 32 – Izvor struje za navarivanje *Fronius TransSteel 3000 Pulse*

U Tablici 18 prikazane su osnovne karakteristike *Fronius TransSteel 3000 Pulse* izvora struje za zavarivanje. Navedene karakteristike vrijede i za navarivanje.

Tablica 18 – Osnovne karakteristike *Fronius TransSteel 3000 Pulse* izvora struje za zavarivanje [30, 39]

Napon napajanja	380 V / 400 V
Tolerancija napona napajanja	-10 % / + 15 %
Minimalna jakost struje zavarivanja	10 A
Maksimalna jakost struje zavarivanja	300 A
Mrežni osigurač	35 A
Intermitencija kod jakosti struje 300 A (vrijeme ciklusa 10 min, pri 40 °C)	40 %
Intermitencija kod jakosti struje 280 A (vrijeme ciklusa 10 min, pri 40 °C)	60 %
Intermitencija kod jakosti struje 240 A (vrijeme ciklusa 10 min, pri 40 °C)	100 %
Radni napon	14,5 V – 29 V
Napon praznog hoda	59 V
Duljina	747 mm
Širina	300 mm
Visina	497 mm
Masa	36 kg
Stupanj zaštite	IP23

3.2.2. Automat za precizno vođenje pištolja *Promotech Rail Bull*

Promotech Rail Bull (Slika 33) je automat za precizno vođenje pištolja dizajniran za zavarivanje sučeonih i kutnih zavora. Moguće je zavarivanje u položajima PA (ravno), PB (horizontalno vertikalno), PC (horizontalno), PD (nadglavno horizontalno-vertikalno), PE (nadglavno), PF (vertikalno gore) i PG (vertikalno dolje). *Rail Bull* se kreće duž krute ili polufleksibilne tračnice na feromagnetskim i neferomagnetskim materijalima pomoću zupčaste letve i zupčanika po tračnicama koje su pričvršćene na ravne ili zakrivljene površine pomoću različitih magnetskih ili vakuumskih jedinica.



Slika 33 – Automat za precizno vođenje pištolja Promotech Rail Bull [31]

Osnovne karakteristike automata za precizno vođenje pištolja *Promotech Rail Bull* [31]:

- Kompaktan, lagan dizajn s izdržljivim kućištem od lijevanog aluminija;
- Napajanje 115 – 230 V, 50 – 60 Hz ili 42 V, 50 – 60 Hz;
- Mehanizam držača pištolja za brzo stezanje, promjera pištolja 16–22 mm (do 35 mm);
- Višenamjenski LED zaslon s prikazanim parametrima procesa;
- Konstantnim unosom topline smanjuju se izobličenja;
- Automatsko uključivanje/isključivanje istovremeno pali električni luk i pokreće kretanje;
- Sustav upravljanja koristi elektromotor s enkoderom te povratnom vezom o položaju;
- Poboljšava radno okruženje (operator nije u atmosferi povišene temperature i mogućih štetnih para).

3.2.3. Kontaktni termometar *SKF TKTL 20 ThermoLaser* s temperaturnom sondom *SKF TMDT 2-30*

SKF TKTL 20 ThermoLaser je napredni termometar koji kombinira fleksibilnost infracrvenog termometra i mogućnosti kontaktnog termometra. Omogućava mjerenje temperature dijelova u pokretu, reflektirajućih površina i temperature mjesta s kojima je, zbog sigurnosnih razloga i/ili moguće kontaminacije, ograničen ili zabranjen kontakt. [32] S termometrom u setu dolazi temperaturna sonda *SKF TMDT 2-30*, termopar tipa K, prikladna za mjerenje temperature tvrdih površina kao što su ležajevi, kućišta ležajeva, blokovi motora s unutarnjim izgaranjem i dr. [33] Slikom 34 prikazan je kontaktni termometar *SKF TKTL 20 ThermoLaser* s temperaturnom sondom *SKF TMDT 2-30*.



Slika 34 – Kontaktni termometar SKF TKTL 20 ThermoLaser s priključenom temperaturnom sondom SKF TMDT 2-30 [32]

Neke od karakteristika kontaktnog termometra *SKF TKTL 20 ThermoLaser* s temperaturnom sondom *SKF TMDT 2-30* [41]:

- Raspon mjerenja temperatura pomoću infracrvenog senzora od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $625\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Raspon mjerenja temperatura pomoću temperaturne sonde od $-64\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperaturna sonda *SKF TMDT 2-30* može mjeriti temperaturu do $900\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- Na *SKF TKTL 20 ThermoLaser* se mogu spojiti sve temperaturne sonde proizvođača *SKF*.

3.2.4. CNC obradni centar *Kitamura Mycenter-1*

CNC obradni centar *Kitamura Mycenter-1* (Slika 35) je vertikalni glodači obradni centar sljedećih karakteristika [34]:

- Hod po X osi 485 mm;
- Hod po Y osi 330 mm;
- Hod po Z osi 405 mm;
- Brzina kretanja po X osi 20 m/min;
- Brzina kretanja po Y osi 20 m/min;
- Brzina kretanja po Z osi 12 m/min;
- Maksimalna brzina vrtnje glavnog vretena 13000 min⁻¹;
- Snaga motora glavnog vretena 5,5 kW;
- Spremište za 16 alata;
- Vanjske dimenzije (duljina × širina × visina) 2660 mm × 1980 mm × 2030 mm;
- Masa 2100 kg;



Slika 35 – CNC obradni centar *Kitamura Mycenter-1* [34]

U navedenom CNC obradnom centru korišteno je glodalo s izmjenjivim trokutnim pločicama *ISCAR HM390 -10* (Slika 36) promjera 40 mm iz linije glodala *HELIQMILL 390*. [35]



*Slika 36 – Glodalo s izmjenjivim trokutnim pločicama
ISCAR HM390 -10 promjera 40 mm*

Pogodno je za obradu čelika i lijevanih željeza te teško rezljivih materijala. Najčešće se koristi za grubu i poluzavršnu obradu. Otvori za SHIP za svaki umetak osiguravaju kvalitetno hlađenje i čišćenje oštrica. [35]

3.2.5. Uređaj za brušenje i poliranje *Metkon Forcipol 1V Grinder & Polisher*

Metkon Forcipol 1V Grinder & Polisher (Slika 37) je uređaj za ručno ili automatsko brušenje i poliranje. Raspon brzine vrtnje rotirajuće ploče 50 do 600 min⁻¹. Posjeduje mogućnost dovođenja kontrolirane količine vode na obradak. [42]



*Slika 37 – Uređaj za brušenje i poliranje *Metkon Forcipol 1V Grinder & Polisher* [36]*

3.2.6. Stereomikroskop *Olympus SZX10*

Stereomikroskop *Olympus SZX10* (Slika 38) je fleksibilan alat za različita istraživanja. Galilejev optički sustav minimizira izobličenja slike. Raspon povećanja od $6,3\times$ do $63\times$ s $1\times$ objektivom te povećanje do $123\times$ s $2\times$ objektivom. Može biti opremljen s trinokularnom cijevi te *Olympus DP* serijom digitalnih kamera za snimanje slika visoke razlučivosti. [37]



Slika 38 – Stereomikroskop *Olympus SZX10* [37]

Računalni programa *OLYMPUS Stream Essentials 2.5.2* pruža jednostavno sučelje koje vodi kroz proces inspekcije, od prikupljanja slika, kvantitativnih mjerenja i analiza, do izvješćivanja i arhiviranja podataka. Prilagođen svim korisnicima bez obzira na iskustvo. [43]

3.3. Korišteni materijali

Kao osnovni materijal korištena je ploča od općeg konstrukcijskog čelika S235JR dimenzija (duljina × širina × debljina) 250 mm × 150 mm × 12 mm. Površina na kojoj se odrađivalo navarivanje je prethodno kutnom brusilicom očišćena od opće korozije i ostalih nečistoća te dovedena do metalnog sjaja (Slika 39).



Slika 39 – Ploča od općeg konstrukcijskog čelika S235JR obrađena kutnom brusilicom

Kao dodatni materijal korištena je puna žica za zavarivanje ER 308 LSi Ø 1 mm (prema normi EN ISO 14343-A [51] oznaka G 19 9 LSi) proizvođača *Castolin Eutectic*. ER 308 LSi je žica od austenitnog nehrđajućeg čelika za zavarivanje MIG / MAG postupkom, otpornog na interkristalnu koroziju do 350 °C, vatrootpornog do 800 °C u zraku ili oksidirajućim plinovima izgaranja. Primjenjuje se kod zavarivanja spremnika, cijevi i opreme od nestabiliziranih ili stabiliziranih krom-nikal čelika otpornih na koroziju korištenih u prehrambenoj i farmaceutskoj industriji. U Tablici 19 prikazan je kemijski sastav, a u Tablici 20 mehanička svojstva nakon zavarivanja žice ER 308 LSi. Kemijski sastav i mehanička svojstva vrijede uz primjenu zaštitnog plina M13 prema normi EN ISO 14175 [52] (Inoxline X2, argon + 0,5 do 3 % kisika) tijekom zavarivanja. [44]

Tablica 19 – Kemijski sastav žice za zavarivanje ER 308 LSi [44]

ER 308 LSi	C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]
žica za zavarivanje	0,01	1,9	0,7	20	9,5

Tablica 20 – Mehanička svojstva žice za zavarivanje ER 308 LSi [44]

Mehanička svojstva nakon zavarivanja	
Granica tečenja $R_{p0,2}$	450 [MPa]
Vlačna čvrstoća R_m	570 [MPa]
Istezanje A5	38 [%]
Udarni rad loma KV, 20 °C	100 [J]

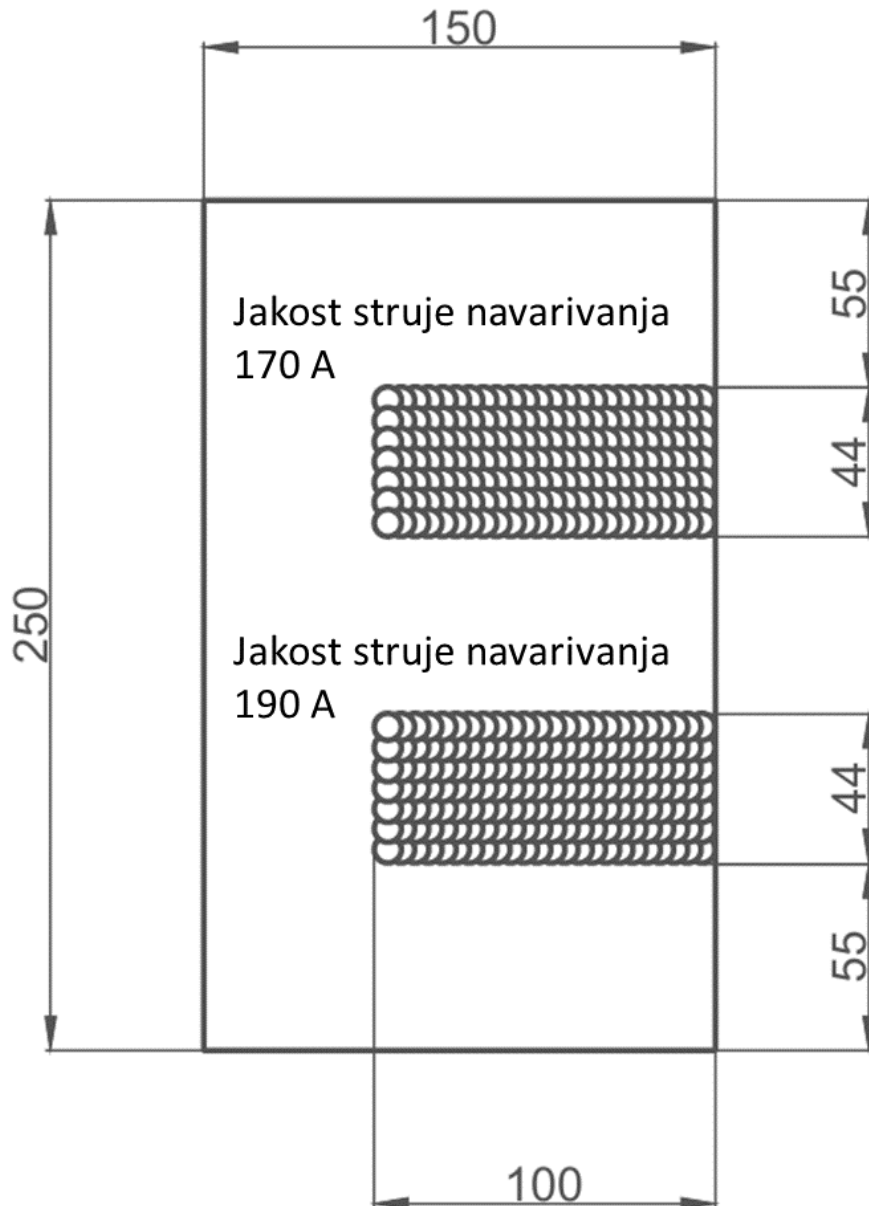
Kao zaštitni plin za navarivanje, korišten je Argon 4.8, proizvođača Messer (Slika 40). Argon 4.8 je inertan plin čistoće 99,998 % koji je uz mnoge druge primjene (spektrometrija, izolacija kod dvostrukog ostakljivanja, medicina i dr.) idealan zaštitni plin za MIG i TIG zavarivanje, zbog inertnosti pri vrlo visokim temperaturama. Prema normi EN 1089-3 [53] vrat boce argona je tamno zelene boje RAL 6001 (vidljivo na Slici 40). [45]



Slika 40 – Oznaka na plinskoj boci Argona 4.8 korištenog u postupku navarivanja

3.4. Postupak MIG navarivanja

U ovom dijelu završnog rada opisan je postupak navarivanja dva odvojena sloja nehrđajućeg čelika na ploču općeg konstrukcijskog čelika postupkom MIG navarivanja. Slikom 41 prikazane su dimenzije osnovnog materijala te približne pozicije navarenih slojeva (170 A i 190 A).



Slika 41 – Skica dimenzija osnovnog materijala te približnih pozicija navarenih slojeva

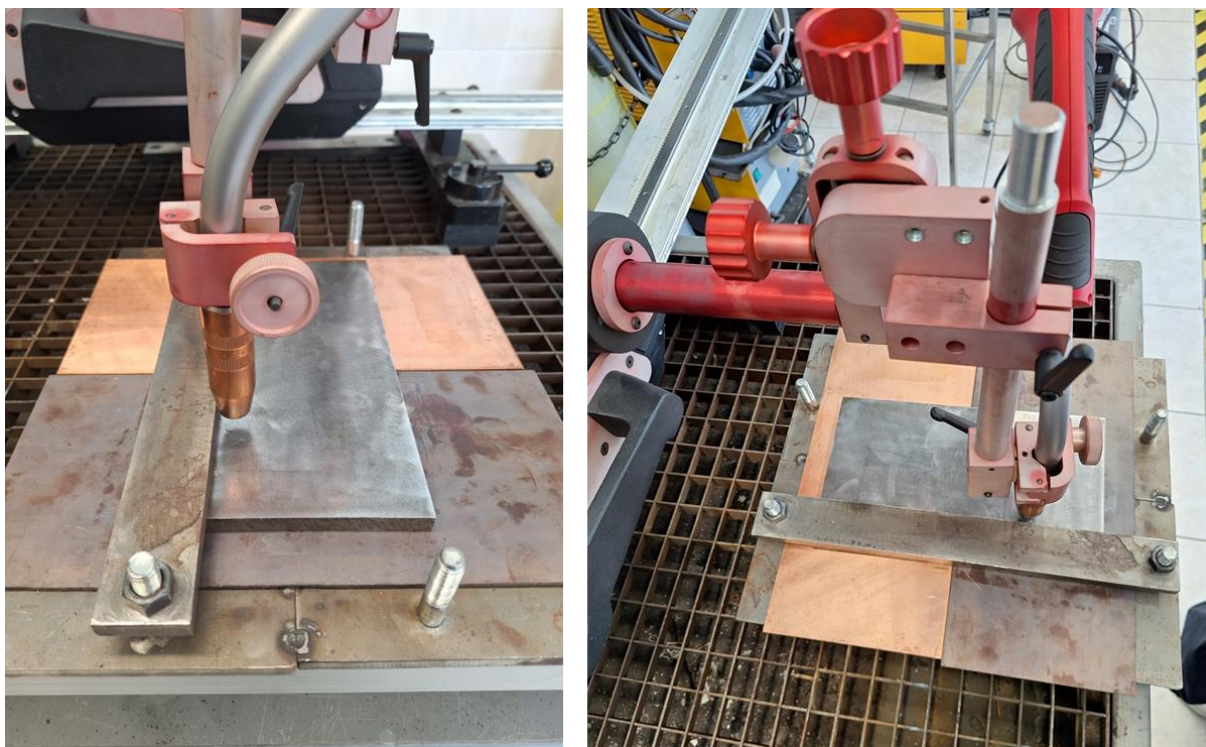
Očišćena ploča općeg konstrukcijskog čelika S235JR debljine 12 mm, dimenzija 250 mm × 150 mm pričvršćena je za radni stol pomoću jedne stezne naprave kako bi se smanjile deformacije koje nastaju tijekom navarivanja. Ispod ploče osnovnog materijala postavljene su dvije bakrene ploče u svrhu bržeg odvođenja topline.

Prijenos dodatnog materijala vršen je kratkim spojem. Parametri zavarivanja uneseni su u sustav. Najprije je definiran dodatni materijal, promjer korištene žice za navarivanje te vrsta zaštitnog plina. Slikom 42 prikazani su definirani parametri navarivanja u sustavu izvora struje za navarivanje.



Slika 42 – Definirani parametri navarivanja u sustavu izvora struje za navarivanje

Za navarivanje oba sloja (170 A i 190 A) korišten je zaštitni plin Argon 4.8 protoka 17 l/min. Nakon podešavanja parametara navarivanja i pričvršćivanja ploče za radni stol, provedeno je pozicioniranje pištolja za navarivanje. Pištolj za navarivanje je smješten u držač automata za precizno vođenje pištolja *Promotech Rail Bull*. Pištolj je postavljen okomito u odnosu na ploču osnovnog materijala. Udaljenost od vrha sapnice pištolja za navarivanje do ploče OM-a iznosila je 12 mm. Slikom 43 prikazana je ploča OM-a pričvršćena za radni stol te pištolj postavljen u držač automata za precizno vođenje pištolja *Promotech Rail Bull*.



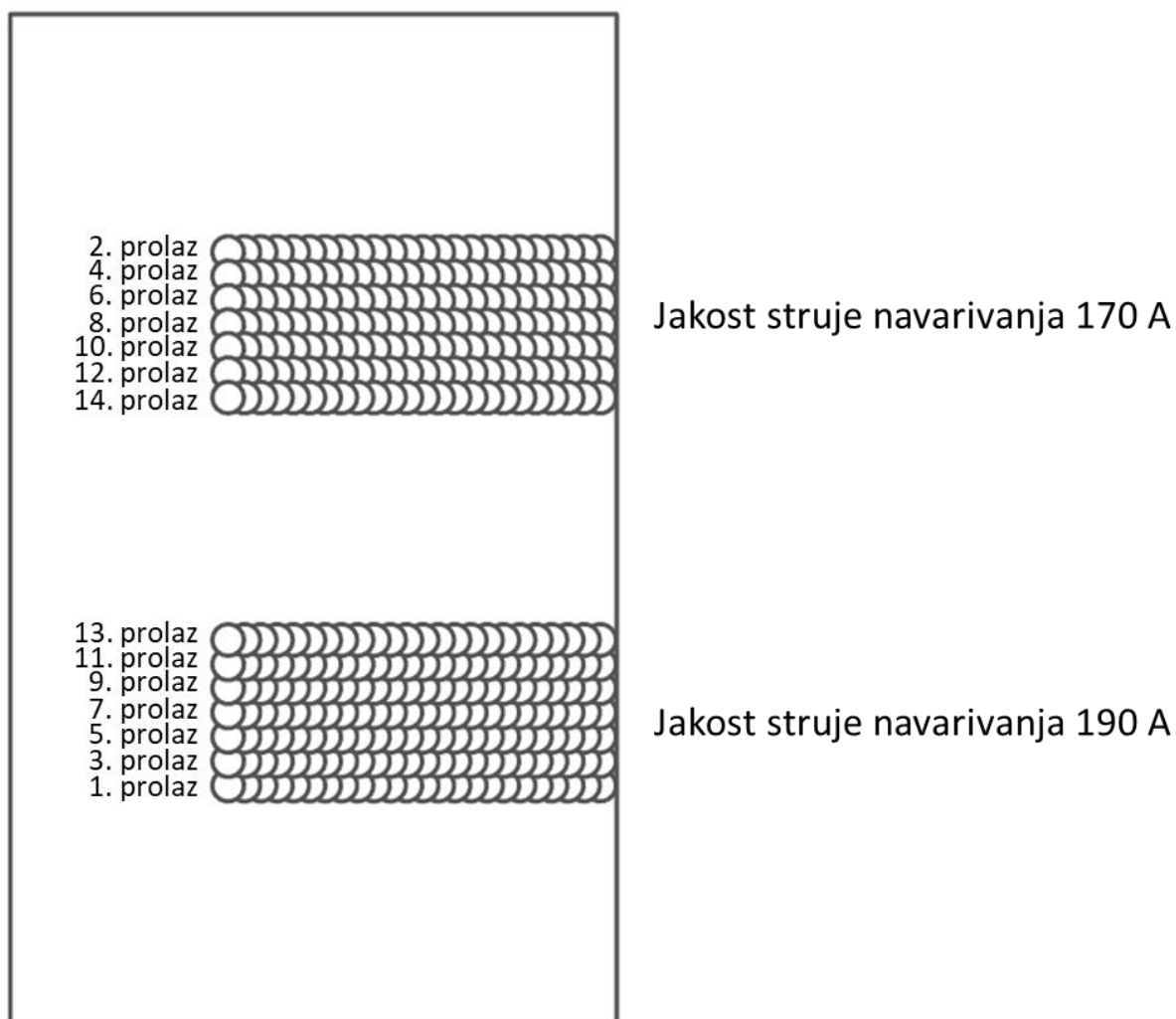
Slika 43 – Prikaz ploče OM-a pričvršćene za radni stol te pištolja za navarivanje postavljenog u držač automata za precizno vođenje pištolja Promotech Rail Bull

Za postizanje kratkog spoja između žice za navarivanje i ploče OM-a, radni stol je pol klemom povezan na izvor struje za navarivanje. U automat za precizno vođenje pištolja *Promotech Rail Bull* uneseni su parametri brzine navarivanja od 30 cm/min te pozicija navarivanja prvog prolaza (Slika 44).



Slika 44 – Brzina navarivanja i pozicija navarivanja prvog prolaza uneseni u automat za precizno vođenje pištolja Promotech Rail Bull

Za dobivanje usporednih prolaza s kontinuiranim preklapanjem, promjena distance iznosila je 10 jedinica. Kako bi se smanjile deformacije zbog višeprolaznog navarivanja, prolazi su navarivani redosljedom prikazanim na Slici 45. Svih 14 prolaza navareno je neutralnom tehnikom i konstantnom brzinom navarivanja od 30 cm/min.



Slika 45 – Redosljed navarivanja prolaza

Nakon navarenog prvog prolaza, prije svakog sljedećeg su čeličnom četkom očišćene nečistoće i metalni oksidi s površine te je mjerena temperatura prije svakog prolaza kontaktnim termometrom *SKF TKTL 20* s temperaturnom sondom *SKF TMDT 2-30*. Hlađenje, tj. prijenos topline se odvijao kondukcijom kroz materijal, konvekcijom kroz zrak te zračenjem. Temperatura prije početka sljedećeg prolaza nije smjela prelaziti preporučenih 100 °C.

U Tablici 21 prikazane su vrijednosti jakosti struje navarivanja, pozicije pištolja za navarivanje te temperature prije pojedinog prolaza.

Tablica 21 – Parametri navarivanja koji se mijenjaju za svaki prolaz

Redni broj prolaza	Pozicija pištolja za navarivanje	Jakost struje navarivanja [A]	Temperatura prije pojedinog prolaza [°C]
1. prolaz	100	190	22
2. prolaz	– 100	170	27
3. prolaz	90	190	36,3
4. prolaz	– 90	170	39
5. prolaz	80	190	42
6. prolaz	– 80	170	-
7. prolaz	70	190	-
8. prolaz	– 70	170	59,6
9. prolaz	60	190	55
10. prolaz	– 60	170	81
11. prolaz	50	190	47
12. prolaz	– 50	170	-
13. prolaz	40	190	-
14. prolaz	– 40	170	80

Sljedećim slikama prikazana su odabrana mjerenja temperatura prije navarivanja prolaza. Slikom 46 prikazano je mjerenje temperature prije trećeg prolaza, a Slikom 47 mjerenje temperature prije osmog prolaza.

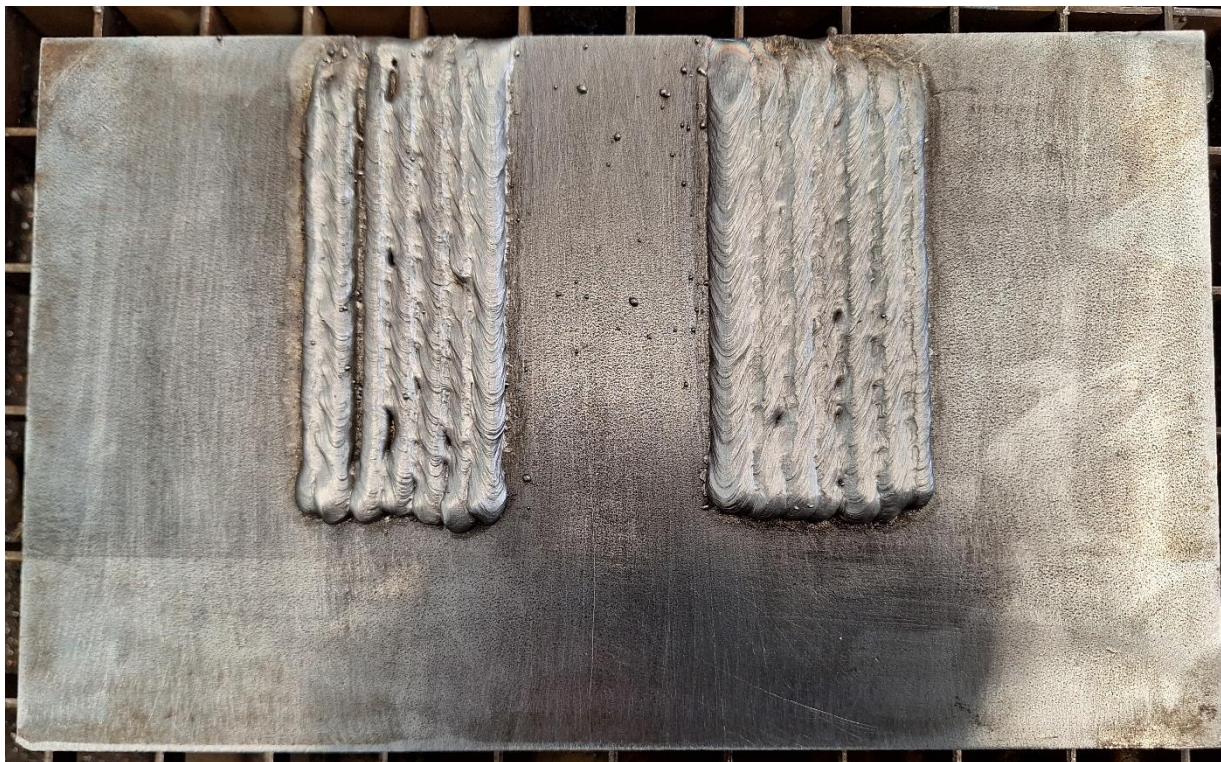


Slika 46 – Mjerenje temperature prije trećeg prolaza



Slika 47 – Mjerenje temperature prije osmog prolaza

Ohlađeni navareni slojevi prikazani su Slikom 48. Duljina pojedinog navarenog sloja iznosila je približno 100 mm, širina približno 44 mm te visina navarenog sloja približno 5 mm.



Slika 48 – Ohlađeni navareni sloj dobiven s jakosti struje navarivanja 170 A (lijevo) te sloj dobiven s jakosti struje navarivanja 190 A (desno)

Iz Slike 48 je vidljivo da kod jakosti struje navarivanja 170 A nije došlo do preklopa između četvrtog i šestog prolaza (približna širina početnog navara u slučaju jakosti struje 170 A iznosila je 5 mm), dok je sloj navaren s jakosti struje navarivanja 190 A odrađen zadovoljavajuće (približna širina početnog prolaza u slučaju jakosti struje 190 A iznosila je 8 mm te međusobni preklop između prolaza približno 50 %) Slikom 49 prikazan je detaljan pogled na sloj navaren s jakosti struje navarivanja 170 A i 190 A. U oba slučaja početak prolaza je širi od ostatka zbog uspostave električnog luka kratkim spoje, tj. jakost struje je u tom trenutku bila viša u odnosu na definiranu te je došlo do bržeg taljenja DM-a u odnosu na ostatak prolaza. Na krajevima prolaza došlo je do „bježanja“ taline zbog prekida električnog luka te se visina prolaza smanjuje s njegovim završetkom.



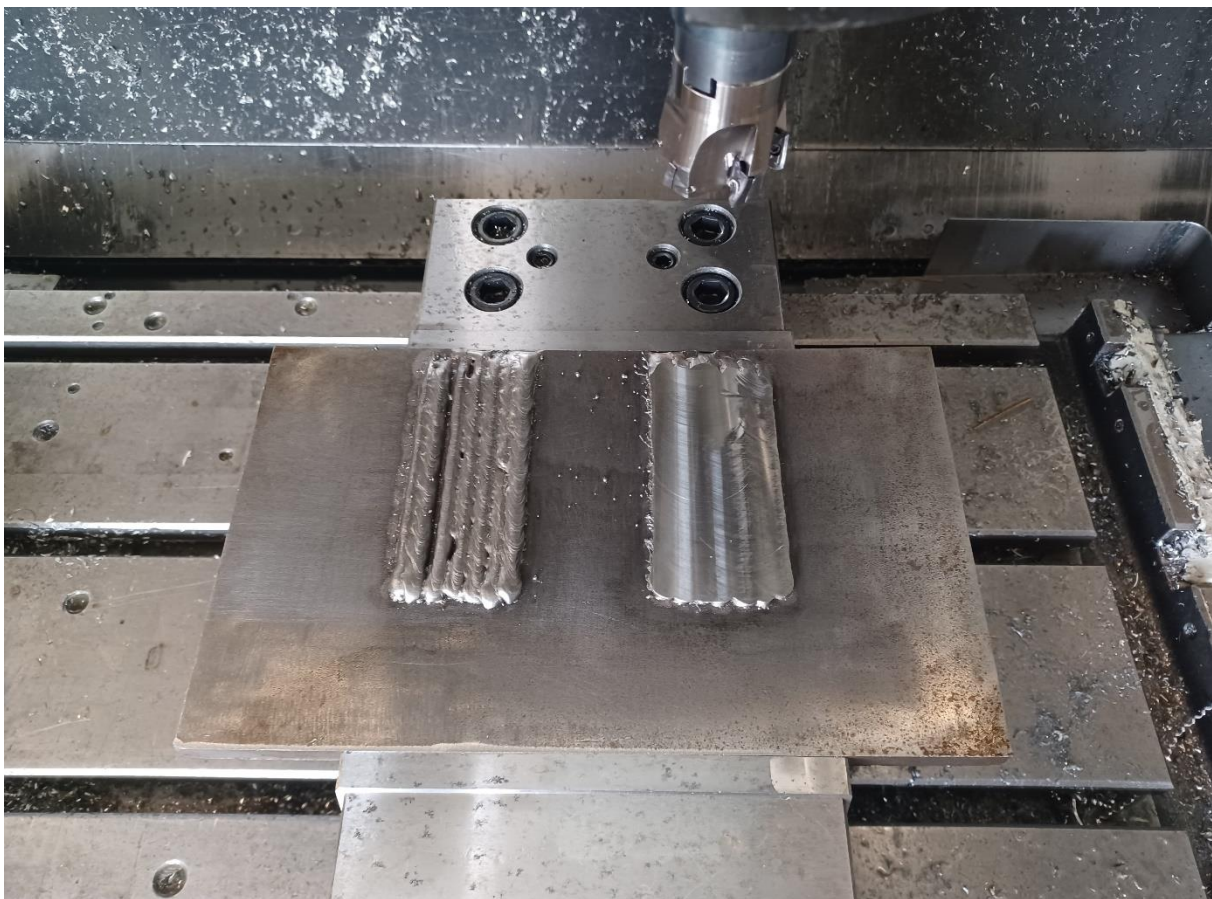
Slika 49 – Detaljni pogled sloja nehrđajućeg čelika navarenog s jakosti struje navarivanja 170 A (gore) i sloja navarenog s jakosti struje navarivanja 190 A (dolje)

3.5. Izrada ispitnih uzoraka

U svrhu ispitivanja makrostrukture, iz svakog navarenog sloja bilo je potrebno izuzeti dva uzorka, no zbog nedovoljnog preklapanja prolaza navarenih s jakosti struje 170 A, isti su odbačeni iz ispitivanja te su izuzeta samo dva uzorka iz sloja navarenog s jakosti struje 190 A. Najprije je obradom odvajanja čestica odrađeno poravnavanje površine navarenog sloja u CNC obradnom centru *Kitamura Mycenter-1* glodalom s izmjenjivim pločicama *ISCAR HM390 -10 Ø 40 mm*. Korišteni parametri glodanja bili su:

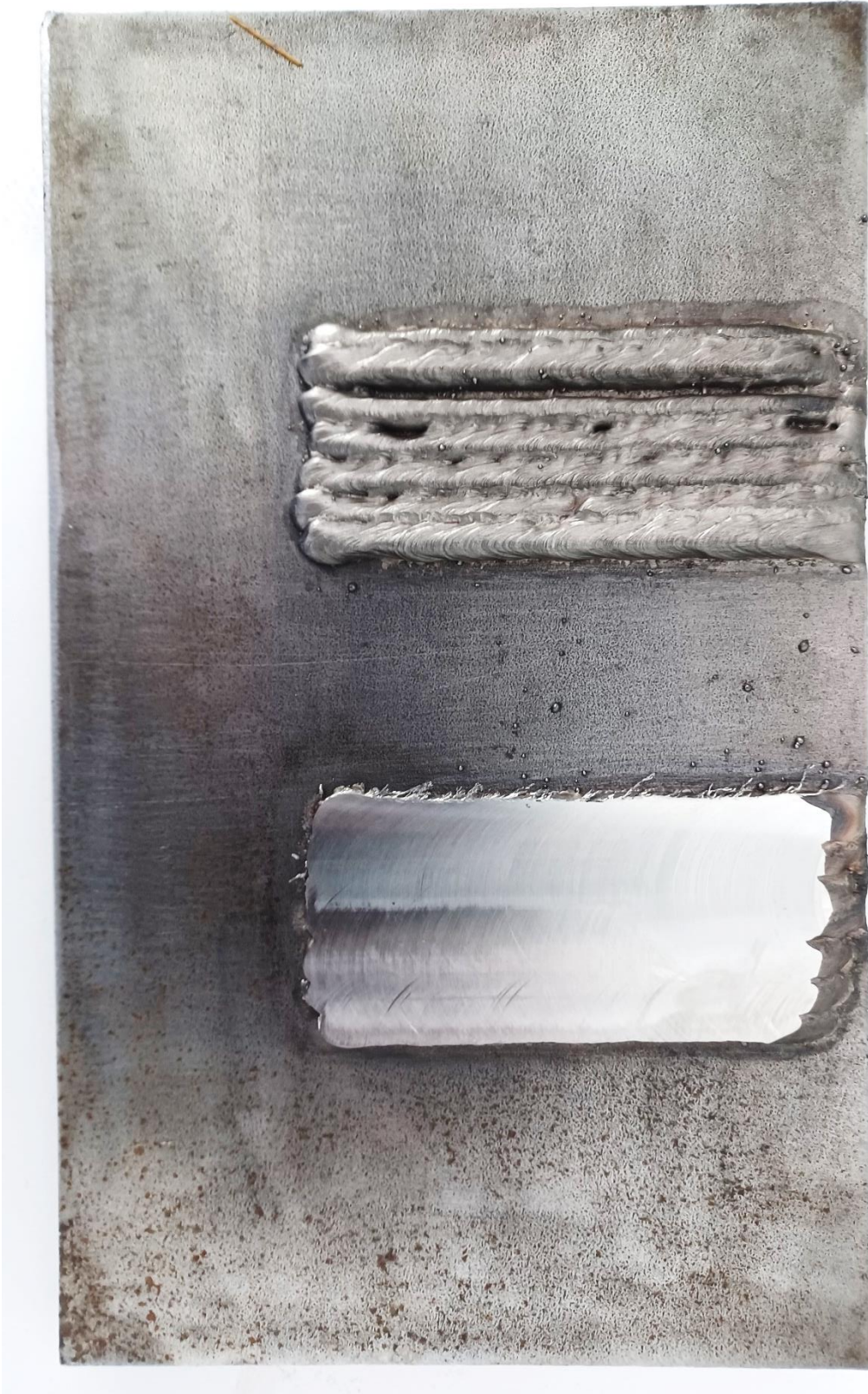
- Brzina rotacije alata 2000 min^{-1} ;
- Posmak $f = 120 \text{ mm/min}$;
- Dubina zahvata $a_p = 0,5 \text{ mm}$, ukupno je obrađeno $2,5 \text{ mm}$ u dubinu do ravne površine.

Slikom 50 prikazano je poravnavanje površine navarenog sloja. Nakon glodanja uzorci su izrezani strojnom tračnom pilom.



Slika 50 – Poravnavanje površine sloja navarenog s jakosti struje 190 A na CNC obradnom centru *Kitamura Mycenter-1*, glodalom s izmjenjivim pločicama *ISCAR HM390 -10 Ø 40 mm*

Slikom 51 prikazan je OM s obrađenim navarenim slojem nehrđajućeg čelika spreman za izrezivanje uzoraka na strojnoj tračnoj pili.



Slika 51 – OM s obrađenim navarenim slojem nehrđajućeg čelika prije izrezivanja uzoraka na strojnoj tračnoj pili

Samo jedna bočna strana izrezanih uzoraka je brušena na uređaju za brušenje i poliranje *Metkon Forcipol IV Grinder & Polisher* primjenom brusnih papira različitih granulacija od grublje prema finijoj. Redoslijed korištenja brusnih papira bio je sljedeći:

- 1. korak brusni papir P120;
- 2. korak brusni papir P180;
- 3. korak brusni papir P240;
- 4. korak brusni papir P400;
- 5. korak brusni papir P600;
- 6. korak brusni papir P1000.

Brušenje površine uzoraka primjenom ručnog pritiska trajalo je približno jedan sat i 30 minuta. Najviše vremena je utrošeno na grubo brušenje brusnim papirom P120 kako bi se uklonile sve neravnine nastale rezanjem uzoraka na tračnoj pili. Za hlađenje uzoraka tijekom brušenja korištena je voda. Slikom 52 prikazani su uzorci nakon završetka brušenja.

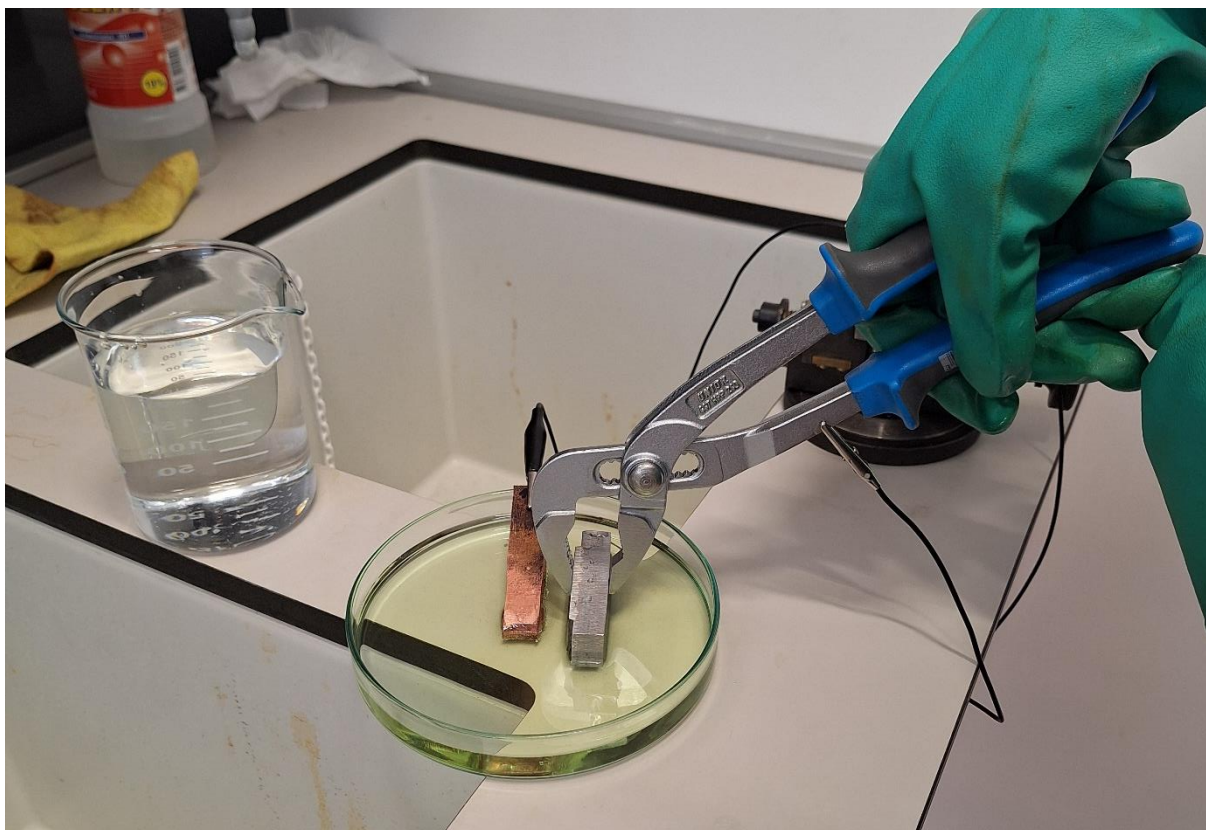


Slika 52 – Uzorci iz sloja navarenog s jakosti struje navarivanja 190 A nakon završetka brušenja

Nakon završetka postupka brušenja, slijedio je postupak elektrokemijskog nagrivanja, odnosno izazivanja strukture ispitnog uzorka za makrostrukturna ispitivanja. Pribor korišten za elektrokemijsko nagrivanje uzorka:

- 19 % klorovodična (solna) kiselina;
- Bakrena pločica;
- Baterija od 9 V;
- Petrijeva zdjelica;
- Laboratorijska čaša;
- Pol kleme;
- Podesiva kliješta;
- Mali škripac za prihvatač baterije.

Slikom 53 prikazano je elektrokemijsko nagrivanje brušene površine uzorka.



Slika 53 – Postupak elektrokemijskog nagrivanja brušene površine uzorka

Pozitivni (+) pol baterije povezan je s ispitnim uzorkom čija se površina nagriva, a minus (–) pol povezan je s bakrenom pločicom. Vrijeme izazivanja strukture površine uzorka iznosilo je otprilike 90 sekundi nakon čega je uzorak stavljen u vodu. U kontaktu s vodom došlo je do prekida reakcije te je uzorak lagano obrisan ubrusom. Time je završena izrada ispitnih uzoraka te su isti bili spremni za ispitivanje makrostrukture (Slika 54).

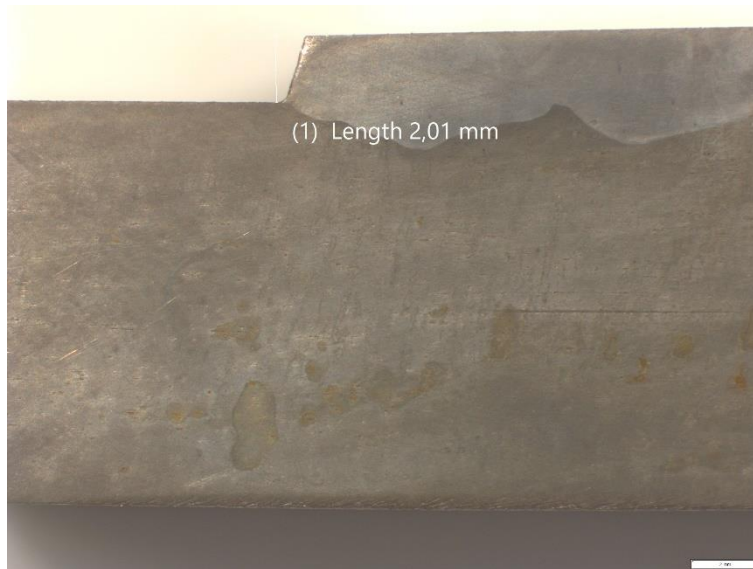


Slika 54 – Uzorci spremni za ispitivanje makrostrukture, prvi uzorak (gore) i drugi uzorak (dolje)

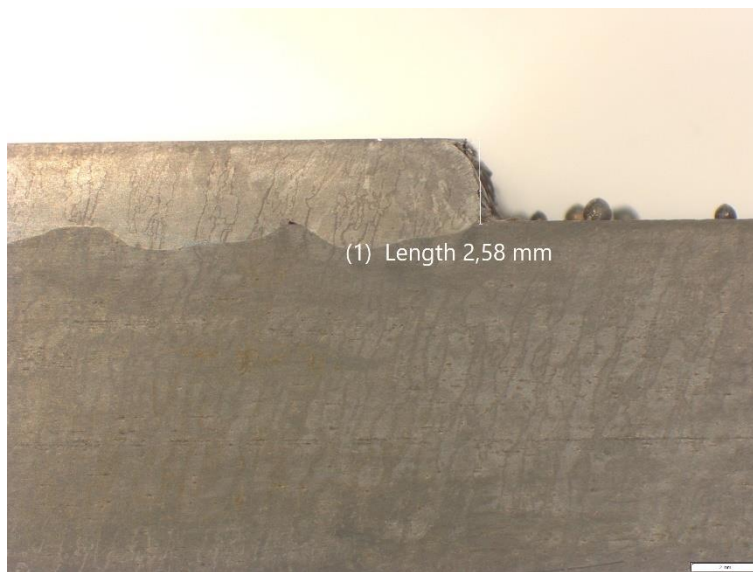
Prvi uzorak prikazan na Slici 54 je odbačen zbog pojave sive mrlje u gornjem desnom kutu (izlazak nečistoća iz pora) te je za ispitivanje makrostrukture korišten samo drugi uzorak.

3.6. Ispitivanje makrostrukture

Nakon sušenja površine uzorka, odrađeno je ispitivanje makrostrukture na istoj, stereomikroskopom *Olympus SZX10*, povećanje $0,8 \times 10$, a pomoću računalnog programa *OLYMPUS Stream Essentials 2.5.2* omogućena je izrada i obrada slika ispitnog uzorka. Slikom 55 i 56 prikazana su mjerenja visina obrađenog navarenog sloja mjerena od gornje površine OM-a. Vidljivo je da visine nisu jednake zbog toga što je došlo do deformacije OM-a kao posljedica visokog unosa topline tijekom navarivanja.

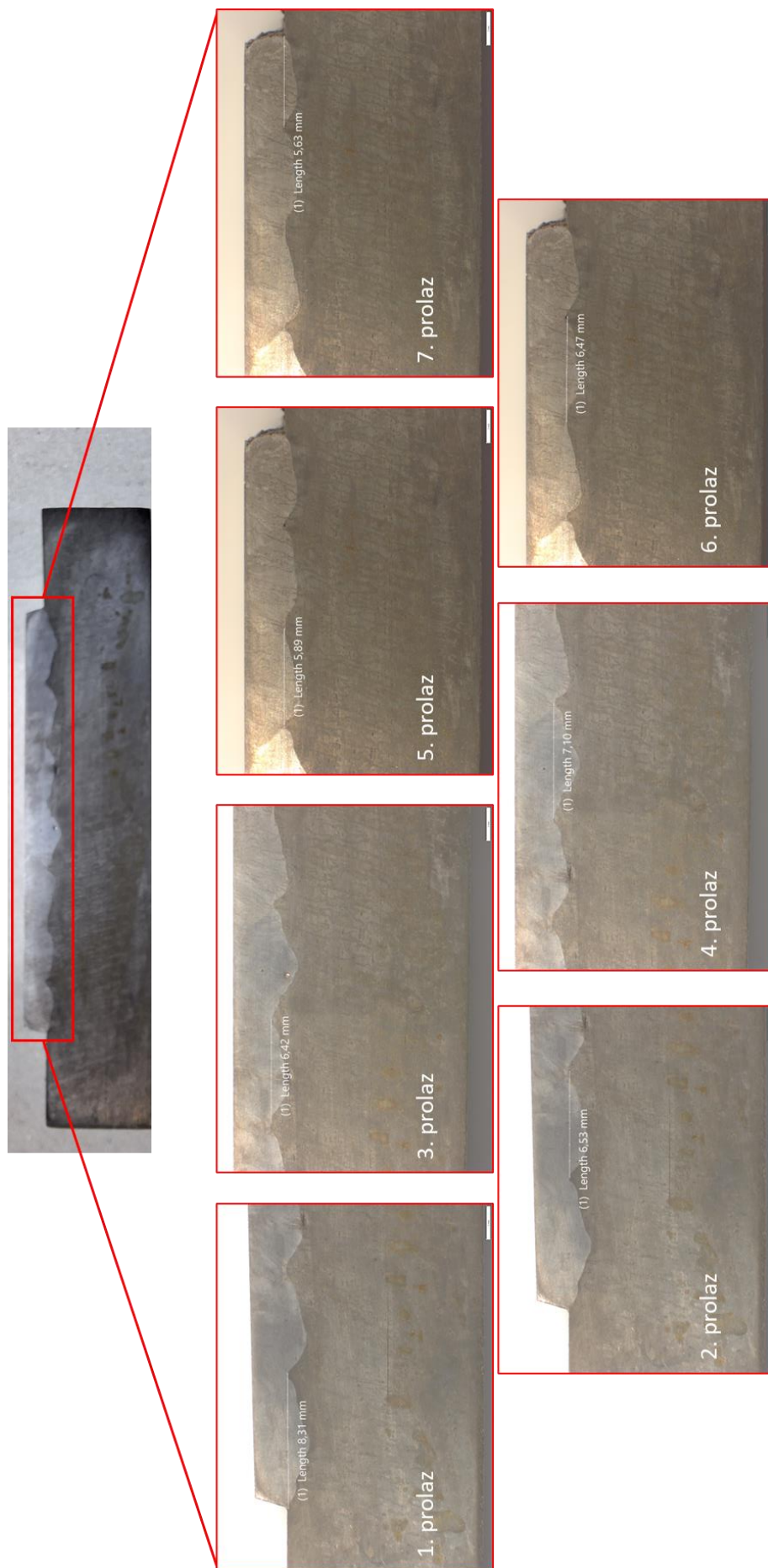


Slika 55 – Mjerenje visine obrađenog navarenog sloja s lijeve strane



Slika 56 – Mjerenje visine obrađenog navarenog sloja s desne strane

Slikom 57 prikazana su mjerenja pojedine širine navarenog prolaza.



Slika 57 – Mjerenja pojedine širine navarenog prolaza

U Tablici 22 prikazane su širine navarenih prolaza. Vrijednosti su zaokružene na jednu decimalu zbog toga što su bočna mjesta početka i završetka prolaza bila približno određivana. U sljedećoj tablici prolazi više nisu označeni prema redosljedu navarivanja prikazanom na Slici 45, već su označeni prema redosljedu pojavljivanja na sloju navarenom s jakosti struje navarivanja 190 A.

Tablica 22 – Vrijednosti širine pojedinog navarenog prolaza

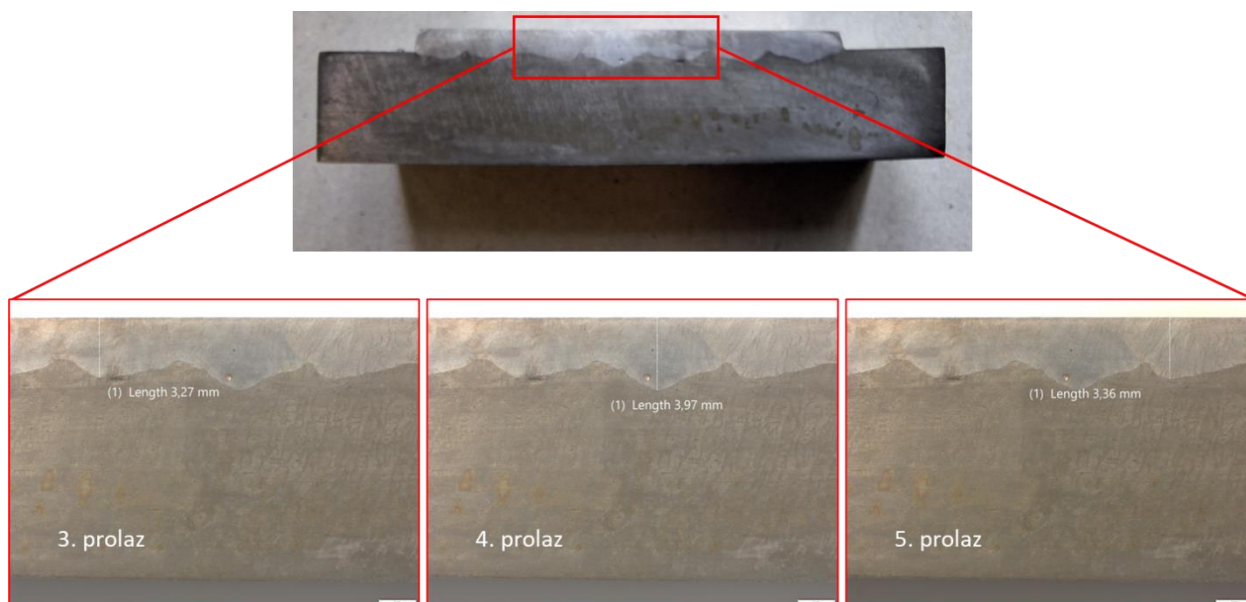
Redni broj prolaza prema redosljedu prikazanom na Slici 45	Redni broj prolaza prema redosljedu pojavljivanja na sloju navarenom s jakosti struje 190 A	Širina prolaza [mm]
1. prolaz	1. prolaz	8,3
3. prolaz	2. prolaz	6,5
5. prolaz	3. prolaz	6,4
7. prolaz	4. prolaz	7,1
9. prolaz	5. prolaz	5,9
11. prolaz	6. prolaz	6,5
13. prolaz	7. prolaz	5,6

Iz podataka navedenih u Tablici 22 može se odrediti minimalna i maksimalna širina navarenog prolaza te izračunati srednja vrijednost, što je prikazano u Tablici 23.

Tablica 23 – Vrijednosti minimalne i maksimalne širine navarenih prolaza te srednja vrijednost širine

Podaci za prolaze navarene s jakosti struje navarivanja 190 A	
Minimalna širina navarenog prolaza	5,6 mm
Maksimalna širina navarenog prolaza	8,3 mm
Zbroj širina navarenih prolaza	46,3 mm
Srednja vrijednost širine navarenih prolaza	6,6 mm

Također je mjerena dubina trećeg, četvrtog i petog prolaza od vrha obrađenog navarenog sloja (Slika 58).



Slika 58 – Mjerenje dubine odabranih navarenih prolaza

U Tablici 24 prikazane su dubine odabranih navarenih prolaza. Vrijednosti su zaokružene na jednu decimalu zbog toga što je najdublja točka navarenog prolaza približno određena.

Tablica 24 – Vrijednosti dubine odabranih navarenih prolaza

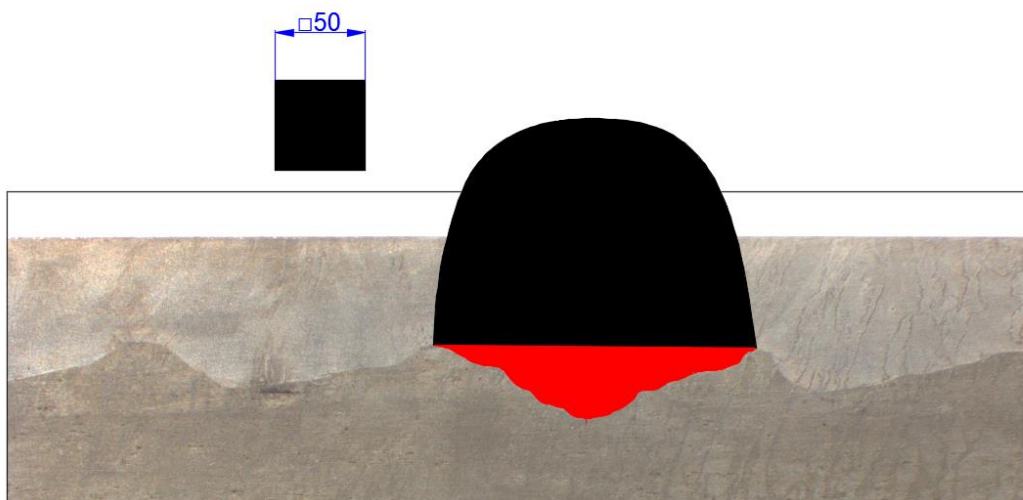
Redni broj prolaza prema redosljedu pojavljivanja na sloju navarenom s jakosti struje 190 A	Dubina prolaza [mm]
3. prolaz	3,3
4. prolaz	4
5. prolaz	3,4

Iz podataka navedenih u Tablici 24 može se odrediti minimalna i maksimalna dubina navarenog prolaza te izračunati srednja vrijednost, što je prikazano u Tablici 25.

Tablica 25 – Vrijednosti minimalne i maksimalne dubine odabranih navarenih prolaza te srednja vrijednost dubine

Podaci za prolaze navarene s jakosti struje navarivanja 190 A	
Minimalna dubina navarenog prolaza	3,3 mm
Maksimalna dubina navarenog prolaza	4 mm
Zbroj dubina navarenih prolaza	10,7 mm
Srednja vrijednost dubine navarenih prolaza	3,6 mm

Pomoću programa Autodesk AutoCAD 2022 (Slika 59) određene su približne vrijednosti površine poprečnog presjeka navara ispod površine OM-a (na Slici 59 crvena površina) te površine poprečnog presjeka navara iznad površine OM-a (na Slici 59 crna površina) koje se upotrebljavaju u izračunavanju stupnja miješanja OM-a i DM-a.



Slika 59 – Površine korištene u izračunu stupnja miješanja OM-a i DM-a (AutoCAD 2022)

Crvena površina (B) iznosi približno 3630 jedinica kvadratnih, a crna površina (A) iznosi približno 18700 jedinica kvadratnih. Prema već navedenoj formuli (5), stupanj miješanja OM-a i DM-a iznosi:

$$\text{stupanj miješanja [\%]} = \frac{B}{A + B} \times 100 = \frac{3630}{18700 + 3630} \times 100 = 16,256 \% \approx 16 \%$$

Navedeni rezultat odgovara rasponu stupnja miješanja 10 % do 30 % kod navarivanja MIG / MAG postupkom.

4. Zaključak

Kao što je već navedeno, cilj eksperimentalnog dijela rada bio je odrediti utjecaj jakosti struje navarivanja na uspješnost dobivanja spoja između OM-a i DM-a te ostvariti navareni sloj otporan na koroziju. U tu svrhu, MIG postupkom uz primjenu Argona 4.8 kao zaštitnog inertnog plina navarena su dva odvojena sloja nehrđajućeg čelika na ploči općeg konstrukcijskog čelika, nakon čega su se iz sloja navarenog s jakosti struje navarivanja 190 A pripremila dva uzorka koja su korištena za ispitivanje makrostrukture navarenog sloja te za mjerenje širine i dubine pojedinih prolaza.

Sloj navaren s jakosti struje 170 A je odbačen u procesu glodanja zbog nemogućće izrade uzoraka potrebnih za ispitivanje makrostrukture. Također, prolazi u navedenom sloju nisu ostvarili preklop te takav navaren sloj nije u mogućnosti pružiti OM-u otpornost na koroziju.

Ispitivanjem makrostrukture uzoraka, gdje je korištena jakost struje navarivanja 190 A, uočeno je postojanje veze između osnovnog i dodatnog materijala. Na četvrtom prolazu uočena je pogreška (Slika 60) iz skupine 200 - šupljine i poroznosti [46] prema normi HRN EN ISO 6520-1:2008. [54]



Slika 60 – Pogreška na četvrtom prolazu navarenog sloja (označena crvenom bojom)

Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti da je s jakosti struje navarivanja 190 A na opći konstrukcijski čelik kao osnovni materijal uspješno navaren sloj nehrđajućeg čelika otporan na koroziju, uz relativno mali stupanj miješanja OM-a i DM-a te je ostvaren minimalni utjecaj na kemijski sastav, tvrdoću i ukupnu kvalitetu navara.

5. Literatura

- [1] M. Gojić: Površinska obrada materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [2] I. Esih: Osnove površinske zaštite, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [3] Sveučilište Sjever, Predavanja iz kolegija Površinska obrada materijala – Navarivanje, oblaganje, doc. dr. sc. Matija Bušić, dostupno 20.06.2024.
- [4] Sveučilište Sjever, Vježbe iz kolegija Materijali II – Vježba 7: Tribologija, dostupno 20.06.2024.
- [5] https://www.welding-alloys.com/wp-content/uploads/2021/12/Fundamentals_of_hardfacing_A5.pdf, dostupno 20.06.2024.
- [6] <https://enciklopedija.hr/clanak/kavitacija>, dostupno 20.06.2024.
- [7] Sveučilište Sjever, Vježbe iz kolegija Tehnologija II – Tehnologija prerade polimera – podloge za vježbe 2023-2024, izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić, dostupno 20.06.2024.
- [8] <https://metallurgicalexpertise.wordpress.com/2020/09/15/hardfacing-complete/>, dostupno 22.06.2024.
- [9] https://www.reddit.com/r/Welding/comments/iz4kye/buildup_and_some_hardface/, dostupno 22.06.2024.
- [10] Sveučilište Sjever, Predavanja iz kolegija Materijali II – Ispitivanje tvrdoće, ostala ispitivanja, dostupno 20.06.2024.
- [11] <https://youtu.be/L0FzxKiFCuE?si=9MHFAbDuO7vL547V>, dostupno 25.06.2024.
- [12] https://www.hilco-welding.com/media/download/file/3/e/3e_classification_en_14700.pdf, dostupno 25.06.2024.
- [13] Sveučilište Sjever, Predavanja iz kolegija Materijali II – Podloge za predavanja - 2021_2022, izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić, dostupno 20.06.2024.
- [14] <https://www.welding-alloys.com/company/what-we-do/>, dostupno 20.06.2024.

- [15] Inženjerski priručnik IP4, Proizvodno strojarstvo, prvi svezak Materijali. 2013. Ur. Mulc, Andrija; Taboršak, Dragutin; Budin, Ivan. Školska knjiga. Zagreb.
- [16] J. Luzer, A. Spinčić: Enciklopedijski brodstrojarski rječnik englesko-hrvatski, Školska knjiga, Zagreb, 2013.
- [17] Sveučilište Sjever, Predavanja iz kolegija Tehnologija III – Korozija i zaštita II, dostupno 29.06.2024.
- [18] <https://resources.arcmachines.com/understanding-the-basics-of-the-stainless-steel-cladding-process-ami/>, dostupno 29.06.2024.
- [19] <https://resources.arcmachines.com/pipe-cladding-methods-choosing-a-weld-overlay-process-ami/>, dostupno 29.06.2024.
- [20] Sveučilište Sjever, Predavanja iz kolegija Tehnologija III – 04_zavarljivost_čelika, dostupno 29.06.2024.
- [21] Sveučilište Sjever, Predavanja iz kolegija Tehnologija III – Zavarljivost II, dostupno 29.06.2024.
- [22] Sveučilište Sjever, Predavanja iz kolegija Materijali I – ispitivanje_materijala_1_dio, dostupno 30.06.2024.
- [23] <https://www.welding-alloys.com/product/tri-s-309lmo-o/>, dostupno 02.07.2024.
- [24] <https://www.welding-alloys.com/product/tri-s-312-o/>, dostupno 02.07.2024.
- [25] <https://www.welding-alloys.com/product/hardface-19-9-6-o/>, dostupno 02.07.2024.
- [26] <https://www.welding-alloys.com/product/hardface-ap-o/>, dostupno 02.07.2024.
- [27] https://www.researchgate.net/figure/a-MIG-Welding-Process-b-MIG-welding-hardware-block-diagram_fig3_357078481, dostupno 03.07.2024.
- [28] Sveučilište Sjever, Predavanja iz kolegija Tehnike spajanja – Zavarivanje i srodni postupci II, dostupno 03.07.2024.
- [29] M. Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.

- [30] <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/migmag/transsteel/transsteel-compact/transsteel-3000-c-pulse>, dostupno 10.07.2024.
- [31] https://www.promotech.eu/en/wp-content/uploads/Rail-Bull_Track-Welding-Tractor-with-Oscillator_21.02.pdf, dostupno 10.07.2024.
- [32] <https://www.reliabilitydirectstore.com/TKTL-20-ThermoLaser-p/skf-ktl%2020.htm>, dostupno 10.07.2024.
- [33] <https://www.skf.com/sg/productinfo/productid-TMDT%202-30>, dostupno 10.07.2024.
- [34] <https://www.glomacht.com/listings/3529749-used-kitamura-mycenter-1-vertical-machining-center-1992>, dostupno 10.07.2024.
- [35] <https://www.iscar.com/products.aspx/countryid/1/productid/8076>, dostupno 10.07.2024.
- [36] https://faculty.ozyegin.edu.tr/gbbasim/files/2016/09/IMG_9970-e1473401203134.jpg, dostupno 10.07.2024.
- [37] <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscopes/stereo/szx10/>, dostupno 10.07.2024.
- [38] [https://www.olympus-ims.com/en/downloads/detail/?0\[downloads\]\[id\]=276829751](https://www.olympus-ims.com/en/downloads/detail/?0[downloads][id]=276829751), dostupno 10.07.2024.
- [39] <https://metal-kovis.hr/shop/cijena/transsteel-3000c-pulse-g-fronius>, dostupno 10.07.2024.
- [40] Sveučilište Sjever, Predavanja iz kolegija Tehnologija III – Izvori energije za zavarivanje II, dostupno 10.07.2024.
- [41] <https://set-bjelovar.hr/images/uploads/skf-termometar-ktl-20.pdf>, dostupno 09.07.2024.
- [42] M. Blažona: Utjecaj parametara navarivanja na svojstva izratka pri aditivnoj proizvodnji MIG/MAG tehnologijom, diplomski rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2023.
- [43] https://www.eisenbros.co.il/wp-content/uploads/2023/01/Stream_Brochure_DIN_A4_V2.5.2_2022_07_Web-1.pdf, dostupno 10.07.2024.

- [44] <https://www.magmaweld.com/mi-308lsi-uo>, dostupno 10.07.2024.
- [45] <https://www.messer.hr/argon>, dostupno 15.07.2024.
- [46] Sveučilište Sjever, Predavanja iz kolegija Tehnologija III – TEH_3_P2_M, doc. dr. sc. Matija Bušić, dostupno 17.07.2024.
- [47] Sveučilište Sjever, Predavanja iz kolegija Tehnologija III – Zavarljivost I, dostupno 29.06.2024.
- [48] ASTM G65-16(2021) Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus (Standardna ispitna metoda za mjerenje abrazije pomoću aparature sa suhim pijeskom / gumiranim kotačićem), <https://www.astm.org/g0065-16r21.html>, dostupno 08.08.2024.
- [49] HRN EN 14700:2014 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje -- Dodatni materijali za tvrdo navarivanje, <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+14700%3A2014#>, dostupno 08.08.2024.
- [50] HRN EN ISO 8044:2020 Korozija metala i legura -- Rječnik, <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+ISO+8044%3A2020>, dostupno 08.08.2024.
- [51] HRN EN ISO 14343:2017 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje -- Žičane elektrode, trakaste elektrode, žice i šipke za elektrolučno zavarivanje nehrđajućih i vatrootpornih čelika – Razredba, <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+ISO+14343%3A2017>, dostupno 07.09.2024.
- [52] HRN EN ISO 14175:2008 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje -- Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke, <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+ISO+14175%3A2008>, dostupno 07.09.2024.
- [53] HRN EN 1089-3:2012 Prenosive plinske boce -- Označivanje plinskih boca (osim UNP) - - 3. dio: Označivanje bojom, <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+1089-3%3A2012>, dostupno 07.09.2024.
- [54] HRN EN ISO 6520-1:2008 Zavarivanje i srodni procesi -- Razredba geometrijskih nepravilnosti u metalnim materijalima -- 1. dio: Zavarivanje taljenjem, <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+ISO+6520-1%3A2008>, dostupno 08.08.2024.

Popis slika

Slika 1 – Shematski prikaz zavara (lijevo) i navara (desno)	11
Slika 2 – Shematski prikaz tribosustava	12
Slika 3 – Shematski prikaz niske abrazije [5].....	13
Slika 4 – Shematski prikaz abrazije pod povećanim pritiskom [5]	13
Slika 5 – Shematski prikaz povećane abrazije [5].....	13
Slika 6 – Shematski prikaz adhezije (s lijeva na desno → sudar dviju neravnina, nastanak mikrozavarenog spoja, kidanje novonastalog mikrozavarenog spoja) [5]	14
Slika 7 – Shematski prikaz erozije čvrstim česticama [5]	14
Slika 8 – Shematski prikaz oštećenja podloge nastala kavitacijom [5]	15
Slika 9 – Shematski prikaz prve faze umora površine [4]	15
Slika 10 – Shematski prikaz druge faze umora površine [4]	15
Slika 11 – Shematski prikaz treće faze umora površine (crvenom bojom označena odvojena čestica) [4]	16
Slika 12 – Shematski prikaz prve faze tribokorozije [4]	16
Slika 13 – Shematski prikaz druge faze tribokorozije [4]	16
Slika 14 – Shematski prikaz uzoraka navara [5]	18
Slika 15 – Usporedni prolazi s kontinuiranim preklapanjem	18
Slika 16 – Prolazi deponirani u određenim intervalima i točkasti navari navareni na žlicu za bager kao zaštita od trošenja [8]	19
Slika 17 – Križni / rešetkasti prolazi [9].....	20
Slika 18 – Shematski prikaz pojave pukotina na navarenom sloju te njihova propagacija u osnovni materijal (lijevo) te sprječavanje propagacije pukotina primjenom prijelaznog sloja (desno) [5].....	20
Slika 19 – Seferijan-ov dijagram [5]	22
Slika 20 – Test iskrenja odabranih osnovnih materijala [5].....	23
Slika 21 – Shematski prikaz ASTM G65 testa (lijevo) [5] te uzorci prije i poslije (desno) [11] ..	24
Slika 22 – Shematski prikaz koraka penetrantskog ispitivanja [5].....	24
Slika 23 – Shematski prikaz ovisnosti otpornosti na trošenje abrazijom o strukturi, veličini i raspodjeli tvrdih faza u matrici [5]	29
Slika 24 – Uzdužni presjek cijevi na čijoj su unutrašnjoj stijenci vidljivi navareni usporedni prolazi s kontinuiranim preklapanjem [19].....	31
Slika 25 – Prikaz odabira DM-a za odrađivanje navarivanja s obzirom na udarna opterećenja i trošenje abrazijom [5].....	38

Slika 26 – Prikaz odabira DM-a za odrađivanje navarivanja s obzirom na radnu temperaturu i otpornost na koroziju [5]	39
Slika 27 – Shematski prikaz zgnječenja navarenog sloja u OM (lijevo) te primjena prijelaznog sloja niskolegiranog ili srednjolegiranog čelika za sprječavanje zgnječenja (desno) [5]	40
Slika 28 – Shematski prikaz površina korištenih u izračunu stupnja miješanja OM-a i DM-a [5]	41
Slika 29 – Shematski prikaz vrijednosti stupnja miješanja OM-a i DM-a za pojedini postupak navarivanja [1]	41
Slika 30 – Shematski prikaz potonuća volframovog karbida dublje u kupku (lijevo) te uspješno raspoređivanje po matrici (desno) [5]	42
Slika 31 – Shematski prikaz sustava za MIG zavarivanje [27]	44
Slika 32 – Izvor struje za navarivanje Fronius TransSteel 3000 Pulse	46
Slika 33 – Automat za precizno vođenje pištolja Promotech Rail Bull [31]	48
Slika 34 – Kontaktni termometar SKF TKTL 20 ThermoLaser s priključenom temperaturnom sondom SKF TMDT 2-30 [32]	49
Slika 35 – CNC obradni centar Kitamura Mycenter-1 [34]	50
Slika 36 – Glodalo s izmjenjivim trokutnim pločicama ISCAR HM390 -10 promjera 40 mm	51
Slika 37 – Uređaj za brušenje i poliranje Metkon Forcipol 1V Grinder & Polisher [36]	51
Slika 38 – Stereomikroskop Olympus SZX10 [37]	52
Slika 39 – Ploča od općeg konstrukcijskog čelika S235JR obrađena kutnom brusilicom	53
Slika 40 – Oznaka na plinskoj boci Argona 4.8 korištenog u postupku navarivanja	54
Slika 41 – Skica dimenzija osnovnog materijala te približnih pozicija navarenih slojeva	55
Slika 42 – Definirani parametri navarivanja u sustavu izvora struje za navarivanje	56
Slika 43 – Prikaz ploče OM-a pričvršćene za radni stol te pištolja za navarivanje postavljenog u držač automata za precizno vođenje pištolja Promotech Rail Bull	57
Slika 44 – Brzina navarivanja i pozicija navarivanja prvog prolaza uneseni u automat za precizno vođenje pištolja Promotech Rail Bull	57
Slika 45 – Redoslijed navarivanja prolaza	58
Slika 46 – Mjerenje temperature prije trećeg prolaza	60
Slika 47 – Mjerenje temperature prije osmog prolaza	60
Slika 48 – Ohlađeni navareni sloj dobiven s jakosti struje navarivanja 170 A (lijevo) te sloj dobiven s jakosti struje navarivanja 190 A (desno)	61
Slika 49 – Detaljni pogled sloja nehrđajućeg čelika navarenog s jakosti struje navarivanja 170 A (gore) i sloja navarenog s jakosti struje navarivanja 190 A (dolje)	62

Slika 50 – Poravnavanje površine sloja navarenog s jakosti struje 190 A na CNC obradnom centru Kitamura Mycenter-1, glodalom s izmjenjivim pločicama ISCAR HM390 -10 Ø 40 mm	63
Slika 51 – OM s obrađenim navarenim slojem nehrđajućeg čelika prije izrezivanja uzoraka na strojnoj tračnoj pili.....	64
Slika 52 – Uzorci iz sloja navarenog s jakosti struje navarivanja 190 A nakon završetka brušenja	65
Slika 53 – Postupak elektrokemijskog nagrivanja brušene površine uzoraka	66
Slika 54 – Uzorci spremni za ispitivanje makrostrukture, prvi uzorak (gore) i drugi uzorak (dolje)	67
Slika 55 – Mjerenje visine obrađenog navarenog sloja s lijeve strane	68
Slika 56 – Mjerenje visine obrađenog navarenog sloja s desne strane.....	68
Slika 57 – Mjerenja pojedine širine navarenog prolaza	69
Slika 58 – Mjerenje dubine odabranih navarenih prolaza	71
Slika 59 – Površine korištene u izračunu stupnja miješanja OM-a i DM-a (AutoCAD 2022)	72
Slika 60 – Pogreška na četvrtom prolazu navarenog sloja (označena crvenom bojom)	73

Popis tablica

Tablica 1 – Postupci elektrolučnog navarivanja te njihove specifičnosti [5]	17
Tablica 2 – Približne vrijednosti temperatura predgrijavanja za određene osnovne materijale [5]	21
Tablica 3 – Test magnetizma odabranih osnovnih materijala [5]	23
Tablica 4 – Simboli i kemijski sastavi legura (DM-a) kod navarivanja prema EN 14700 [12]	26
Tablica 5 – Kemijski sastav niskolegiranih čelika [5]	26
Tablica 6 – Kemijski sastav srednjolegiranih čelika [5]	27
Tablica 7 – Kemijski sastav alatnih čelika s manje od 20 % legiranih elemenata [5].....	27
Tablica 8 – Kemijski sastav primjera manganskog čelika [5]	28
Tablica 9 – Kemijski sastav krom-manganskih čelika [5].....	28
Tablica 10 – Kemijski sastav primjera alatnog čelika s više od 20 % legiranih elemenata [5].....	28
Tablica 11 – Kemijski sastav lijevanih željeza sa sadržajem kroma [5].....	29
Tablica 12 – Kemijski sastav legura na bazi kobalta [5]	30
Tablica 13 – Kemijski sastav legura na bazi nikla [5]	30
Tablica 14 – Svojstva legura volframovog karbida u različitim matricama [5]	30
Tablica 15 – Simboli i kemijski sastavi legura (DM-a) kod navarivanja prema EN 14700 [12] ..	34
Tablica 16 – Kemijski sastav martenzitnih nehrđajućih čelika s manje od 20 % legiranih elemenata [5]	35
Tablica 17 – Utjecaji pojedinog legirnog elementa na odabrana svojstva važna za slojeve otporne na trošenje i koroziju [5].....	37
Tablica 18 – Osnovne karakteristike Fronius TransSteel 3000 Pulse izvora struje za zavarivanje [30, 39].....	47
Tablica 19 – Kemijski sastav žice za zavarivanje ER 308 LSi [44]	53
Tablica 20 – Mehanička svojstva žice za zavarivanje ER 308 LSi [44].....	54
Tablica 21 – Parametri navarivanja koji se mijenjaju za svaki prolaz.....	59
Tablica 22 – Vrijednosti širine pojedinog navarenog prolaza.....	70
Tablica 23 – Vrijednosti minimalne i maksimalne širine navarenih prolaza te srednja vrijednost širine	70
Tablica 24 – Vrijednosti dubine odabranih navarenih prolaza	71
Tablica 25 – Vrijednosti minimalne i maksimalne dubine odabranih navarenih prolaza te srednja vrijednost dubine	72



IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim privjajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Benjamin Zadravec (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom MIG navarivanje općeg konstrukcijskog čelika s nehrđajućim čelikom (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Benjamin Zadravec
(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.