

Abrazijska otpornost navara od aluminijske bronce

Jonjić, Josipa

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:537317>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josipa Jonjić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Studentica:

Josipa Jonjić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem svojoj mentorici prof. dr. sc. Veri Rede, asistentici Heleni Lukšić i laborantu Ivanu Vovku na uloženom vremenu, pomoći i savjetima tijekom izrade ovoga rada.

Posebno hvala mojoj obitelji i prijateljicama na velikoj podršci tijekom studija.

Josipa Jonjić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Studentica: **Josipa Jonjić**

JMBAG: **0035222919**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Abrazijska otpornost navara od aluminijske bronce**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Abrasion resistance of the aluminum bronze overlay**

Opis zadatka:


Bakrove legure posjeduju izvrsna električna i toplinska svojstva, jako dobru duktilnost te otpornost na koroziju u atmosferskim uvjetima i u morskom okruženju. U nedostatke im se može ubrojiti visoka cijena, visoko talište i otežano zavarivanje. Neke bakrove legure koriste se za dijelove čija je površina tijekom eksploatacije izložena tribološkim i korozivnim oštećenjima. Takva oštećenja mogu se prevenirati ili sanirati postupcima navarivanja slojeva koji su otporniji od osnovnog materijala.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je ispitati abrazijsku otpornost navarenog sloja od aluminijske bronce oznake CuAl8Ni2Fe2 i usporediti je s abrazijskom otpornošću osnovnog materijala od legure CuNiAl. Ispitivanje abrazijske otpornosti provesti na uređaju Taber abrader.

Dobivene rezultate analizirati i na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke o kvaliteti navarenog spoja.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.


Zadatak zadala: 
Prof. dr. sc. Vera Rede

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. BAKAR I BAKROVE LEGURE.....	3
2.1. Povijest bakra i bakrovih legura.....	3
2.2. Svojstva bakra	3
2.3. Nelegirani bakar	5
2.4. Niskolegirani bakar	6
2.5. Bakrove legure	6
2.5.1. Mjedi	7
2.5.1.1. Hladno gnječene α -mjedi	8
2.5.1.2. Toplo gnječene ($\alpha+\beta$)-mjedi	8
2.5.2. Bronce	8
2.5.2.1. Kositrena bronca	8
2.5.2.2. Crveni lijev.....	9
2.5.2.3. Olovne i olovno-kositrene bronce.....	9
2.5.2.4. Berilijeva bronca.....	9
2.5.2.5. Manganska i silicijeva bronca.....	9
2.5.2.6. Legure bakra s niklom	9
2.6. Primjena bakra i bakrovih legura	10
3. ALUMINIJEVA BRONCA	12
4. NAVARIVANJE	14
5. EKSPERIMENTALNI DIO	15

5.1. Cilj rada.....	15
5.2. Materijal za ispitivanje.....	15
5.3. Priprema uzoraka za ispitivanje	16
5.4. Analiza kemijskog sastava	18
5.5. Analiza mikrostrukture	20
5.5.1. Priprema metalografskog uzorka	20
5.5.2. Analiza mikrostrukture u poliranom stanju	23
5.5.3. Analiza mikrostrukture u nagrizenom stanju	24
5.6. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.....	31
5.7. Ispitivanje tvrdoće.....	36
6. Osvrt na rezultate ispitivanja	39
6.1. Osvrt na analizu kemijskog sastava	39
6.2. Osvrt na analizu mikrostrukture.....	39
6.3. Osvrt na rezultate ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje	40
6.4. Osvrt na rezultate ispitivanja mikrotvrdoće HV0,2	41
7. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44

POPIS SLIKA

Slika 1.	Propeler podmornice od aluminijske bronce [3]	1
Slika 2.	Prirodni bakar [6]	4
Slika 3.	Ovisnost električne vodljivosti bakra o udjelu primjesa [8].....	5
Slika 4.	Utjecaj cinka na mehanička svojstva mjedi [8].....	7
Slika 5.	Skulptura Sveti Juraj ubija zmaja od bronce [12]	10
Slika 6.	Eurocenti izrađeni od legure nordijsko zlato [16]	11
Slika 7.	Dijagram stanja Cu-Al [8]	12
Slika 8.	Neiskreći ručni alat od aluminijske bronce [17]	13
Slika 9.	Postupak navarivanja [19]	14
Slika 10.	Navareni sloj na osnovnom materijalu	15
Slika 11.	Detalj pripreme navara	16
Slika 12.	Sekvence navarivanja	16
Slika 13.	Rezanje uzoraka na strojnoj pili	17
Slika 14.	Izrezani uzorci za planirana ispitivanja	17
Slika 15.	Uređaj za analizu kemijskog sastava GDS 850A LECO	18
Slika 16.	Kalup za zalijevanje uzorka	20
Slika 17.	Metalografski uzorak nakon vađenja iz kalupa	21
Slika 18.	Uređaj za brušenje i poliranje uzorka	21
Slika 19.	Svjetlosni mikroskop Olympus GX51	22
Slika 20.	Osnovni materijal u poliranom stanju, snimljeno pri povećanju 1000×	23
Slika 21.	Metal navara i zona utjecaja topline u poliranom stanju	24
Slika 22.	Osnovni materijal u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 50×	24
Slika 23.	Osnovni materijal u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 200×	25
Slika 24.	Osnovni materijal u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 500×	25
Slika 25.	Zona utjecaja topline u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 50×	26
Slika 26.	Zona utjecaja topline u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 100×	26
Slika 27.	Zona utjecaja topline u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 500×	27
Slika 28.	Prvi sloj navara u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 50×	27
Slika 29.	Prvi sloj navara u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 200×	28
Slika 30.	Drugi sloj navara u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 50×	28
Slika 31.	Drugi sloj navara u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 200×	29

Slika 32.	Treći sloj navara u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 50×	29
Slika 33.	Treći sloj navara u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 200×	30
Slika 34.	Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju "Taber abrader"	31
Slika 35.	Uzorci za ispitivanje abrazijske otpornosti na Taber abraderu	32
Slika 36.	Mjerna vaga "Analytical Plus balance Ohaus"	32
Slika 37.	Postavljeni ispitni uzorak u čeljusti držača	33
Slika 38.	Smanjenje mase uzoraka tijekom abrazijskog trošenja	35
Slika 39.	Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za sve cikluse	35
Slika 40.	Skica penetratora i otiska kod metode mjerenja tvrdoće po Vickersu	36
Slika 41.	Mikrotvrdomjer PMT3	37
Slika 42.	Dijagram rezultata tvrdoće HV0,2	38
Slika 43.	Dijagram stanja za CuAl leguru + 5 %Ni + 5 %Fe [23]	39
Slika 44.	Mikrostruktura osnovnog materijala u nagrizenom stanju	40
Slika 45.	Promjena gubitka mase od površine navarenog sloja do osnovnog materijala	41
Slika 46.	Dijagram rezultata ispitivanja mikrotvrdoće HV0,2	42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri zavarivanja	16
Tablica 2. Rezultati kemijskog sastava za osnovni materijal i navar	19
Tablica 3. Zajamčeni kemijski sastav osnovnog materijala oznake CuAl10Fe5Ni5 [21]	19
Tablica 4. Zajamčeni kemijski sastav metala navara oznake CuAl8Ni2Fe2Mn2 [22]	19
Tablica 5. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje	34
Tablica 6. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće HV0,2	38

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>d</i>	mm	Srednja vrijednost dijagonala baze piramide
<i>F</i>	N	Primijenjena sila
HV	-	Tvrdoća po Vickersu

SAŽETAK

U radu je provedena usporedba otpornosti na abrazijsko trošenje navara od aluminijske bronce oznake CuAl8Ni2Fe2Mn2, na osnovnom materijalu oznake CuAl10Fe5Ni5. Analizirana je mikrostruktura te izmjerena mikrotvrdoća HV0,2 na oba materijala.

U teorijskom dijelu rada opisana je povijest bakra i njegovih legura, njihova podjela i specifična svojstva, a posebno je opisana aluminijska bronca i područje njezine primjene.

Analiza mikrostrukture pokazala je da se mikrostruktura osnovnog materijala sastoji od kristala mješanaca i intermetalnog spoja precipitiranog u različitim oblicima. U mikrostrukturi zone utjecaja topline udio intermetalnih spojeva je viši nego u osnovnom materijalu. Navareni sloj ima tipičnu ljevačku, dendritnu mikrostrukturu, a između pojedinih slojeva navara nema razlike u mikrostrukturi.

Razlika između abrazijske otpornosti osnovnog materijala i metala navara nije velika. Između gubitka mase pri abraziji i udaljenosti od površine navara postoji izrazito slaba i negativna linearna korelacija, što znači da se abrazijska otpornost neznatno povećava od površine navara prema osnovnom materijalu.

Između mikrotvrdoće HV0,2 i udaljenosti od površine navara postoji velika pozitivna linearna korelacija s vrlo visokim koeficijentom $R=0,78$. Vrijednosti mikrotvrdoće su u rasponu od 152,5 HV0,2 do 312,3 HV0,2. Najviša mikrotvrdoća izmjerena je u zoni utjecaja topline zbog više izlučenih tvrdih intermetalnih spojeva, a vrijednosti mikrotvrdoće u osnovnom materijalu viša je od mikrotvrdoće navara i iznosi 249,3 HV0,2.

Analizom rezultata utvrđena je zadovoljavajuća kvaliteta navara.

Ključne riječi: abrazijsko trošenje, aluminijska bronca, navar, mikrostruktura, tvrdoća

SUMMARY

In the paper, a comparison of the resistance to abrasion wear of welds made of aluminium bronze marked CuAl8Ni2Fe2Mn2, on the base material marked CuAl10Fe5Ni5, was carried out. The microstructure was analyzed and the microhardness HV0.2 was measured on both materials.

In the theoretical part of the paper, the history of copper and its alloys, their division and specific properties is described and aluminum bronze and its field of application are especially described.

Microstructure analysis showed that the microstructure of the base material consists of crystals of mixtures and intermetallic compound precipitated in different forms. In the microstructure of the heat-affected zone, the proportion of intermetallic compounds is higher than in the base material. The burn layer has a typical foundry, dendritic microstructure and there is no difference in the microstructure between individual layers of burn.

The difference between the abrasion resistance of the base material and the base metal is not great. There is an extremely weak and negative linear correlation between the mass loss during abrasion and the distance from the surface of the weld, which means that the abrasion resistance slightly increases from the surface of the weld to the base material.

There is a large positive linear correlation between microhardness HV0.2 and the distance from the weld surface with a very high coefficient $R=0.78$. Microhardness values range from 152.5 HV0.2 to 312.3 HV0.2. The highest microhardness was measured in the heat-affected zone due to more secreted hard intermetallic compounds and the microhardness value in the base material is higher than the microhardness of the weld and amounts to 249.3 HV0.2.

By analyzing the results, the quality of the weld was determined to be satisfactory.

Key words: abrasive wear, aluminum bronze, weld, microstructure, hardenss

1. UVOD

Bakar i njegove legure predstavljaju jednu od najčešće korištenih skupina metalnih materijala. U povijesti je zabilježena uporaba bakra još od davnih vremena, a po bakru je cijelo jedno povijesno razdoblje dobilo naziv bakreno doba. Od tog vremena do danas razvijen je veliki broj bakrovih legura, od kojih je jedna i aluminijeva bronca [1].

Aluminijeva bronca je legura na bazi bakra koja u svom sastavu od legiranih elemenata sadrži najveći udio aluminijske. Osim toga može sadržavati nikal, željezo, mangan, silicij te druge legirane elemente, ovisno o primjeni. S obzirom na dobru kombinaciju mehaničkih i kemijskih svojstava svoju primjenu pronalazi u vrlo zahtjevnim područjima. Svojstva aluminijske bronce poput visoke čvrstoće, visoke tvrdoće, otpornosti na koroziju i otpornosti na trošenje, omogućavaju njezinu primjenu u morskom okruženju i drugim agresivnim medijima. Također je prikladna za izradu propelera, obloga i rotora turbina kojima će omogućiti dugi radni vijek te visoku učinkovitost [2]. Na slici 1. prikazan je propeler podmornice od aluminijske bronce.



Slika 1. Propeler podmornice od aluminijske bronce [3]

Bakrove legure tijekom eksploatacije mogu biti izložene tribološkim i korozivnim oštećenjima, koja se mogu spriječiti postupcima navarivanja. Navarivanjem se također mogu popraviti već nastala oštećenja na površini. Postupkom navarivanja na osnovni materijal nanose se slojevi dodatnog materijala te takav postupak osigurava i poboljšana svojstva na površini legure [4].

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje abrazijske otpornosti navarenog sloja od aluminijske bronce oznake CuAl8Ni2Fe2. Abrazijska otpornost navarenog sloja uspoređena je s abrazijskom otpornošću osnovnog materijala od legure CuAl10Fe5Ni5. Abrazijska otpornost ispitana je na uređaju Taber abrader. Također je provedena analiza kemijskog sastava i mikrostrukture osnovnog materijala i metala navara te je ispitana i njihova tvrdoća.

2. BAKAR I BAKROVE LEGURE

2.1. Povijest bakra i bakrovih legura

Bakar je jedan od prvih metala koji je poznat čovjeku te se procjenjuje da je zajedno sa srebrom i zlatom u upotrebi približno sedam tisuća godina. Njihova uporaba zabilježena je najprije na području Sjeverne i Južne Amerike te Bliskog Istoka čime je započelo bakreno doba. Premda je zastupljenost bakra u Zemljinoj kori izrazito mala (približno 0,006 %), u početku je češće korišten u odnosu na željezo i aluminij. Razlog tome je što se bakar ponekad u prirodi pojavljuje u čistom obliku u grumenima, lako se sakuplja i lako je oblikovljiv. Kovanjem se oblikovao u ukrase i alate poput noževa i sjekira [1].

Upotreba bakra značajno se povećala nakon razvoja taljenja i legiranja. Rastaljenom bakru dodan je kositar čime je dobivena kositrena bronca, s boljim svojstvima od samog bakra. Bakar, s malim postotkom kositra pokazao se izdržljivijim te ima veću tvrdoću u odnosu na bakar i kositar pojedinačno. Ostale legure bakra kao mjed i legure bakra i cinka razvijene su kasnije, u doba Rimskog Carstva [1].

Do razvoja metalurgije željeza bakar i bronca bili su vodeći metali te su korišteni za izradu oružja, alata, utega, proizvodnju cijevi, posuđa, nakita, kipova i dr [1].

Iako brončano doba završava otprilike 1200. g. pr. Kr. kada se sve više primjenjuje željezo (željeznog doba), bakar i njegove legure su i u današnje vrijeme u redovitoj primjeni [5].

2.2. Svojstva bakra

Bakar je metal svijetle crvenosmeđe boje s plošno centriranom (FCC) kubičnom rešetkom i nije polimorfan. Temperatura tališta bakra iznosi 1083 °C, a gustoća 8900 kg·m⁻³, što je tri puta više od gustoće aluminija. U prirodi su resursi bakra ograničeni, rijetko se pojavljuje u čistom obliku, a najviše u sklopu sulfidnih, oksidnih i karbonatnih ruda [6].

Najveća nalazišta bakra su na područjima Sjeverne i Južne Amerike, Afrike i Bliskog Istoka te sjevernog dijela centralne Azije [7].

Na slici 2. prikazan je prirodni bakar.



Slika 2. Prirodni bakar [6]

Bakar i njegove legure su jedna od najčešće korištenih skupina metala, odmah nakon željeza odnosno čelika i aluminija [5]. Kroz povijest svoju primjenu pronalaze u raznim i zahtjevnim područjima zahvaljujući svojim specifičnim mehaničkim i kemijskim svojstvima. Danas se čisti bakar pretežito primjenjuje u području elektrotehnike, dok se njegove legure upotrebljavaju kao konstrukcijski materijali u strojogradnji i brodogradnji. Primjena u takvim područjima omogućena je zahvaljujući osnovnim svojstvima bakra kao što su:

- dobra električna vodljivost u odnosu na druge metale
- velika toplinska vodljivost.

Legiranjem bakra postiže se:

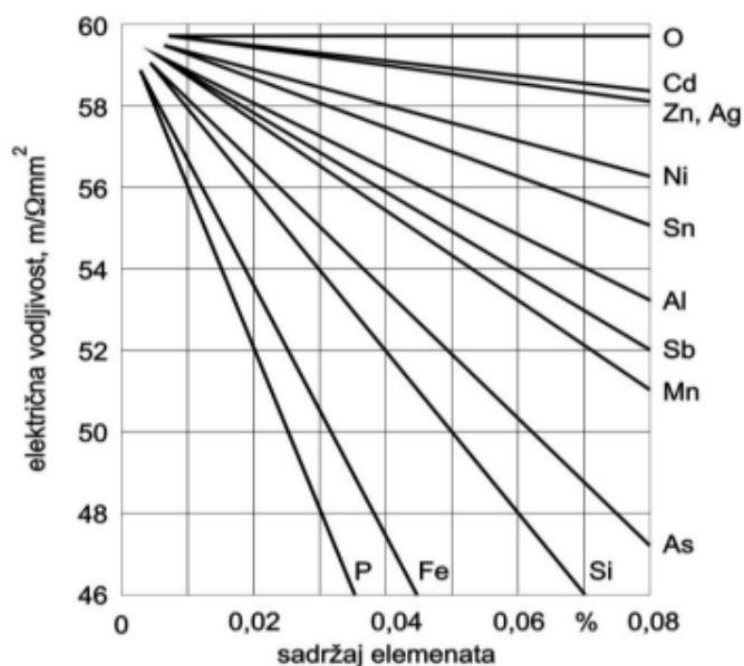
- poboljšana čvrstoća
- otpornost na puzanje i otpornost na umor
- poboljšana livljivost
- otpornost na koroziju i oksidaciju
- izvrsna duktilnost.

Unatoč dobroj kombinaciji mehaničkih i kemijskih svojstava, primjenu će otežavati visoka cijena bakra te njegovo visoko talište. Također, bakar ne smije biti u dodiru s hranom i ne smije se koristiti za preradu namirnica zbog opasnosti od stvaranja otrovne zelene prevlake bakrovog acetata [8].

2.3. Nelegirani bakar

Osnovna svojstva bakra kao električna vodljivost uvelike će ovisiti o primjesama topljivim u bakru, koje nepovoljno utječu na vodljivost. Nepovoljan utjecaj ovisi o vrsti i količini primjesa, pa će tako fosfor imati značajan utjecaj te će u vrlo malim količinama jako snižavati električnu vodljivost. S druge strane kadmij će imati mali utjecaj te se u malim količinama (1 %) dodaje radi povećanja čvrstoće. Elementi koji nisu topivi u bakru u čvrstom stanju uglavnom ni ne utječu na električnu vodljivost. [8].

Ovisnost električne vodljivosti o primjesama prikazana je na slici 3.



Slika 3. Ovisnost električne vodljivosti bakra o udjelu primjesa [8]

Toplinska vodljivost bakra temelji se na pokretljivosti slobodnih elektrona metalnih stanja. Dobra toplinska vodljivost otežava zavarivanje bakra zato je za plinsko zavarivanje prikladan bakar bez primjesa kisika. U slučaju primjene bakra koji sadrži kisik došlo bi do pojave poznate

kao „vodikova bolest“. Zbog djelovanja vodika iz plina za zavarivanje ili iz zaštitnog plina i niske čvrstoće bakra, nastaju vidljive pore i odvajanja po granicama zrna. Takav bakar imat će sniženu čvrstoću i žilavost te postaje krhak i neupotrebljiv.

Značajnu ulogu imaju i naslage oksida i slojevi drugog porijekla zbog čega se toplinska vodljivost bakra ne može u potpunosti iskoristiti [8].

2.4. Niskolegirani bakar

Unatoč dobrim svojstvima upotreba bakra često je ograničena zbog njegove niske čvrstoće. Čvrstoća bakra niža je što je bakar čišći te se također smanjuje povišenjem temperature [8]. Kako bi se poboljšala čvrstoća bakra mogu se primijeniti razni postupci kao što su: hladno oblikovanje, usitnjenje kristalnog zrna, stvaranje kristala mješanaca legiranjem te precipitacijsko očvršnuće koje se može primijeniti kod nekih bakrovih legura. Ovim se postupcima može postići optimalna kombinacija vrijednosti čvrstoće i električne vodljivosti te se pokazuje i dobra otpornost na popuštanje [9].

2.5. Bakrove legure

Podjela bakrovih legura temelji se na vrsti i udjelu glavnih legiranih elemenata. Također, svaka vrsta legure može sadržavati i druge elemente koji će značajno utjecati na specifična svojstva. Tako će legure sa dodatkom cinka imati žutu boju dok će dodatak nikla potaknuti srebrnu boju. Legiranjem će se poboljšati svojstva poput čvrstoće, otpornosti na oksidaciju te koroziju i dr., ali će se pri tome sniziti električna i toplinska vodljivost. Osnovna podjela legura je na dvije glavne skupine:

- mjedi – legure bakra s cinkom
- bronce – legure bakra bez cinka [8].

Legure bakra s cinkom (mjedi) mogu biti oblikovljive deformiranjem u hladnom stanju (α -mjedi) ili se mogu oblikovati deformiranjem samo u toplom stanju ($\alpha+\beta$)-mjedi. Mjedi se dijele na sljedeće skupine:

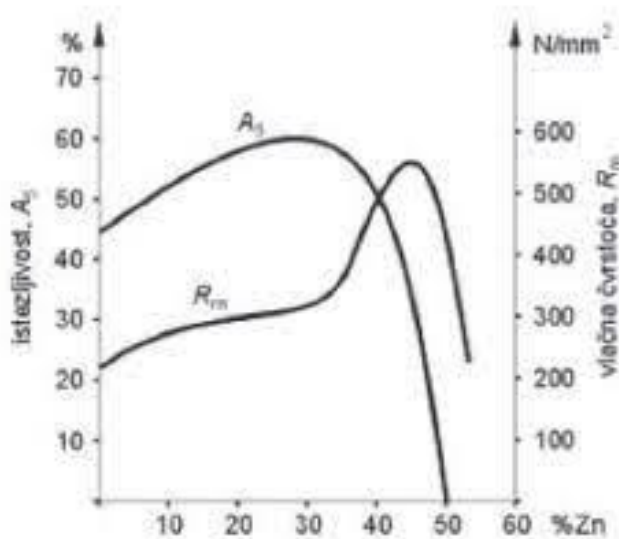
- legure bakra s cinkom ($> 50\% \text{ Cu}$ i $< 44\% \text{ Zn}$) – prave mjedi
- posebne mjedi (54 do 62 % Cu, oko 7 % drugih elemenata, ostatak Zn)
- legure bakra s niklom i cinkom (10 do 30 % Ni) – novo srebro
- Cu-Zn-Sn-Pb; $> 80\% \text{ Cu}$ – crveni metal, crveni lijev

Standardna bronca je legura bakra s dodatkom kositra. Druge vrste bronci uz bakar mogu još sadržavati olovo, cink, aluminij, željezo, mangan, silicij, berilij itd. Naziv bronce daje se po elementu koji je prisutan u najvećoj količini. Legure bakra bez cinka (bronce) dijele se na sljedeće skupine:

- legure bakra s kositrom ($< 15\% \text{Sn}$) – kositrene bronce
- legure bakra s aluminijem ($< 14\% \text{Al}$) – aluminijeve bronce
- legure bakra s kositrom i/ili olovom ($< 10\% \text{Sn}$ i/ili $< 25\% \text{Pb}$) – olovno–kositrene bronce i olovne bronce
- legure bakra s berilijem ($< 2\% \text{Be}$) – berilijeve bronce
- legure bakra s manganom te silicijem i manganom – manganove i silicijeve bronce
- legure bakra s niklom ($< 45\% \text{Ni}$) [8].

2.5.1. Mjedi

Legure bakra s cinkom su najrasprostranjenije legure bakra. Imaju raznoliku primjenu zahvaljujući dobroj električnoj i toplinskoj vodljivosti, dobroj otpornosti na koroziju i mehaničkim svojstvima te se mogu prerađivati u hladnom i toplom stanju. Na slici 4. prikazan je utjecaj cinka na mehanička svojstva mjedi [8].



Slika 4. Utjecaj cinka na mehanička svojstva mjedi [8]

Ovisno u udjelu cinka u mikrostrukturi se pojavljuju različite faze. Otopljeni cink u udjelu do 37 % u kristalima mješancima bakra tvori čvrstu otopinu α . Ako je udio cinka između 37 i 44

% u mikrostrukturi su pristupne α -kristal mješanac i β intermetalni spoj. Legura s 45 do 50 %Zn je monofazna te se sastoji samo od intermetalne faze β' . Nastala faza je vrlo krhka i legura sa takvom mikrostrukturom nije prikladna za inženjersku primjenu. Iz tog razloga tehničke legure ne sadrže više od 44 %Zn [8].

2.5.1.1. Hladno gnječene α -mjedi

Hladno gnječene α -mjedi imaju jednofaznu homogenu mikrostrukturu. Kako bi postigle vrlo dobru duktilnost moraju biti visoke čistoće, što ovu leguru čini vrlo skupom. Hladno oblikovane α -mjedi osjetljive su na napetosnu koroziju zbog nakupljanja dislokacija i napetosti na granicama zrna tijekom hladnog oblikovanja. Hladno oblikovanje primjenjuje se za dobivanje završnih dimenzija i konkretnog stupnja očvrnuća [8].

2.5.1.2. Toplo gnječene $(\alpha+\beta)$ -mjedi

Toplo gnječene $(\alpha+\beta)$ -mjedi sadrže preko 37 %Zn i do 60 %Cu te se oblikuju u toplom stanju. Zbog smanjene žilavosti i heterogenosti prikladne su za obradu odvajanjem čestica (tokarenje, bušenje, glodanje i blanjanje). Dodatkom olova također se poboljšava obradivost odvajanjem čestica zato što se olovo ne otapa u mjedi, a njegove neotopljene čestice koje uzrokuju lokalni lom za vrijeme rezanja. $(\alpha+\beta)$ -mjedi osjetljive su na tzv. „koroziiju cinka“ koja nastaje u vodenim otopinama zbog pomicanja elektrokemijskog potencijala na graničnoj površini. U tom slučaju bakar se ponovno taloži, a β -faza korodira. Ovaj tip korozije može se spriječiti uporabom posebnih mjedi [8].

2.5.2. **Bronce**

2.5.2.1. Kositrena bronca

Legure bakra bez cinka imaju različita svojstva ovisno o mikrostrukturi koja se može objasniti ravnotežnim dijagramom stanja. Kositrena bronca će kao i mjed imati prisutnu α -fazu koja je žilava i duktilna te intermetalni spoj, δ -fazu, koja je tvrda i krhka te ne smije biti prisutna u legurama koje se hladno oblikuju. Kako bi se uklonila δ -faza i omogućila hladna oblikovljivost bronci s višim udjelom kositra (do 14 %Sn), provodi se toplinska obrada bronci. U industriji se hladno oblikuju legure samo do 7 %Sn, a legure s višim udjelom kositra (do oko 15 %) se lijevaju. Lijewane kositrene bronce primarno se koriste za izradu kliznih ležaja te mogu imati

dodatak fosfora (1 %) koji osim što povećava čvrstoću poboljšava i otpornost na koroziju te smanjuje faktor trenja [8].

2.5.2.2. *Crveni lijev*

U bronci skupi kositar često može biti zamijenjen s jeftinijim cinkom pri čemu nema značajne promjene u mikrostrukturi u odnosu na čistu kositrenu broncu. Takve bronce se nazivaju crveni lijev. Dodatak cinka doprinosi livljivosti, a dodaje se i olovo kako bi se povećala homogenost legure. Crveni lijev sve više zamjenjuje lijevanu broncu te se koristi kada se traži otpornost na koroziju i u morskim okruženjima [8].

2.5.2.3. *Olovne i olovno-kositrene bronce*

Olovne i olovno–kositrene bronce sadrže oko 3 %Pb kako bi se poboljšala rezljivost, dok se veće količine dodaju kod kliznih ležaja. Imaju veću toplinsku vodljivost te uz normalno podmazivanje izrazito su otporne na trošenje i zaribavanje [8].

2.5.2.4. *Berilijeva bronca*

Berilijeva bronca primjenjuje se u hladnom gnječenom i toplinski očvrnutom stanju. Ima zahtjevnu toplinsku obradu, ali među bakrovim legurama postiže najvišu čvrstoću. Često se koristi za izradu opruga te u izradi neiskrećeg alata gdje nadilazi svojstva aluminijske bronce [8].

2.5.2.5. *Manganska i silicijeva bronca*

Manganska i silicijeva bronca imaju dobru otpornost na koroziju i veliku žilavost te se mogu hladno i toplo oblikovati. Manganska bronca ima veliku sposobnost prigušenja vibracija, ali ima i visoku cijenu te lošu rezljivost zbog žilavosti. Silicijeva bronca je rijetko dvokomponentna legura te često sadrži i mangan, nikal, željezo ili cink [8].

2.5.2.6. *Legure bakra s niklom*

Legure bakra s niklom imaju vrlo dobru oblikovljivost, veliku korozijsku postojanost i povećanu čvrstoću koja se na povišenim temperaturama može usporediti s nehrđajućim čelicima. Zbog dobre korozijske postojanosti koriste se u morskim okruženjima, ali imaju znatne poteškoće kod zavarivanja zbog velike topljivosti vodika u bakru i niklu [8].

2.6. Primjena bakra i bakrovih legura

Dobra kombinacija mehaničkih i kemijskih svojstava bakra i njegovih legura, omogućila je njihovu široku primjenu. Čisti bakar zbog svoje velike toplinske i električne vodljivosti najčešće je primjenjivan u području energetskog sektora i građevinske industrije. Na području Europe 58 % bakra koristi se u elektrotehnici (telefonske žice), 26 % u građevini, 10 % u industrijskim postrojenjima, za strojeve i namještaj te 5 % u transportu [10]. Također, bakar je kemijski postojan u neutralnim i lužnatim vodenim otopinama te se zato upotrebljava i za izradu vodovodnih cijevi i posuda za vrenje u pivarstvu [8].

Legiranjem bakra cilj je zadržati njegova dobra postojeća svojstva, ali i poboljšati druga kao što su: čvrstoća, otpornost na oksidaciju i koroziju, otpornost na umor i puzanje [11]. Zbog toga će se također primjenjivati u području elektrotehnike i za proizvodnju cijevi, ali bit će prikladne i za proizvodnju izmjenjivača topline, dijelove ventila, ležaje i zupčanike te neiskreće alate. Bakrove legure koriste se i u atmosferskim uvjetima (krovovi i krovni žlijebovi) te u morskom okruženju za izradu propelera, obloga i rotora turbina. U atmosferskim okruženjima dolazi do stvaranja zelene prevlake (patina), od lužnatog bakrovog karbonata i ugljične kiseline iz zraka [8]. Slika 5. prikazuje zelenu prevlaku (patina) na skulpturi Sveti Juraj ubija zmaja.



Slika 5. Skulptura Sveti Juraj ubija zmaja od bronce [12]

Danas u svijetu od svih materijala bakar i njegove legure najčešće se koriste za distribuciju vode zahvaljujući njihovoj visokoj korozijskoj otpornosti. Međutim njihova primjena također

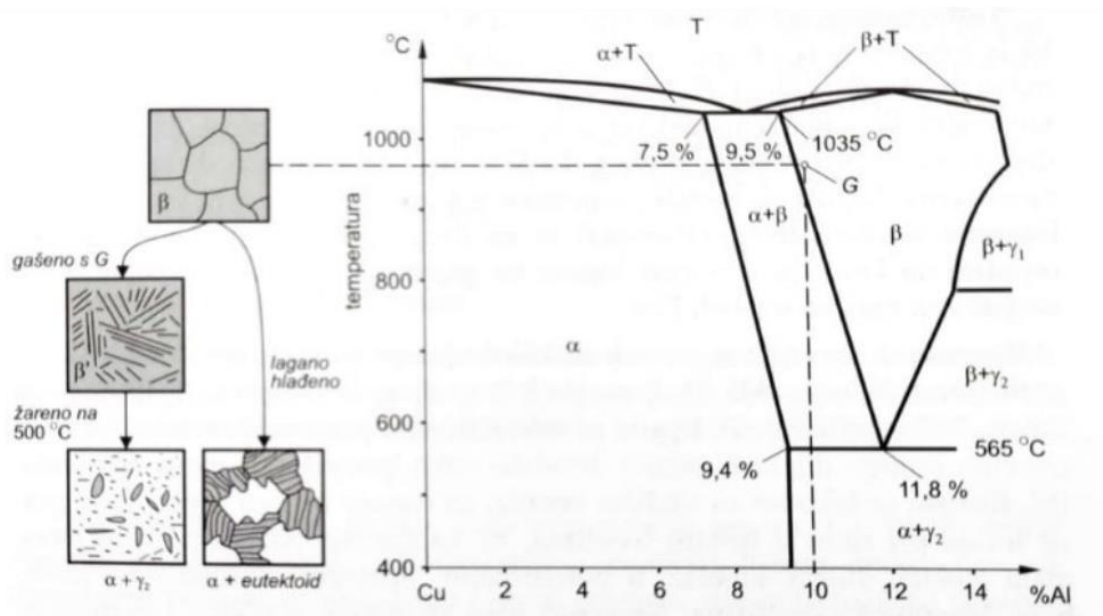
reducira razvoj brojnih bakterija [13]. Zbog toga je bakar u povijesti često korišten u medicini, a danas je prikladan na mjestima gdje je čest kontakt s ljudskom kožom. Predmeti poput kvaka na vratima, prekidači, kolica i ručke mogu biti izrađeni od bakra i bakrovih legura kako bi se mogla primijeniti njihova antibakterijska svojstva [14]. Prikladni su i za izradu kovanica (10, 20 i 50 eurocenti) koje su izrađene od legure poznate pod nazivom nordijsko zlato. Takva legura u svom sastavu sadrži 89 %Cu, 5 %Al, 5 %Zn i 1 %Sn te je prikazana na slici 6. [15].



Slika 6. Eurocenti izrađeni od legure nordijsko zlato [16]

3. ALUMINIJEVA BRONCA

Aluminijeva bronca je legura na bazi bakra koja sadrži najveći udio aluminija kao legirnog elementa s dodatkom elemenata poput nikla, željeza, mangana i silicija [2]. Slično kao i mjed dijeli se na toplo i hladno oblikovljive te livljive legure. Dijagram stanja Cu–Al koji je prikazan na slici 7., pokazuje da je u aluminijevoj bronci s 9,4 %Al na sobnoj temperaturi prisutna α čvrsta otopina koja je dobro oblikovljiva. Za više udjele aluminija u mikrostrukturi je prisutan intermetalni spoj, γ_2 -faza zbog koje je legura prilično krhka [8].



Slika 7. Dijagram stanja Cu-Al [8]

Dijagram stanja Cu–Al pokazuje sličnost s Fe–C dijagramom gdje β -faza odgovara austenitu. Zbog tih sličnosti aluminijeva bronca s 10 %Al može se toplinski obraditi tako da dođe do transformacije slične martenzitnoj pretvorbi kod čelika. Laganim hlađenjem bronce s 10 %Al postiže se mikrostruktura s α i γ_2 -fazom. Zagrijavanjem ovakve mikrostrukture na 900 °C postiže se monofazna čvrsta otopina β -faza. Gašenjem legure u vodi postiže se tvrda i krhka faza β' , slična martenzitu. Popuštanjem na oko 500 °C dolazi do precipitacije α i γ_2 -faze [8].

Glavna svojstva zbog kojih aluminijeva bronca svoju primjenu pronalazi u industriji su sljedeća:

- zadržavanje čvrstoće pri povišenim temperaturama (posebno uz prisutnost određenih legirnih elemenata)

- velika otpornost na oksidaciju pri povišenim temperaturama
- dobra otpornost na koroziju pri uobičajenim temperaturama uporabe
- dobra otpornost na trošenje
- dopadljiva boja uporabiva u dekorativne svrhe [8].

Šira uporaba aluminijske bronce otežana je zbog poteškoća koje se javljaju pri lijevanju. Aluminij lako oksidira na temperaturama iznad 1100 °C te se zbog toga stvara oksidna kožica i troska na tekućem metalu tijekom lijevanja. Kako bi se to spriječilo primjenjuju se neturbulentni postupci lijevanja, što dovodi do poskupljenja proizvoda.

Hladno gnječene α -legure sa 4 % do 8 % Al te 4 % Ni koriste se za proizvodnju kondenzatorskih cijevi i izmjenjivača topline kada je potrebna visoka čvrstoća i korozijska postojanost. Sastav ovih legura je prilagodljiv tako da mogu imati boju 18-karatnog zlata te za izradu dekorativnih predmeta. Toplo gnječene i lijevane legure sadrže 8 % do 12 % Al te se obično dodaju i elementi poput nikla, željeza i mangana. Oblikuju se kovanjem i valjanjem te se koriste u kemijskoj industriji i za izradu otkovaka otpornih na koroziju.

Legure koje se lijevaju u pijesak ili kokilu sadrže 9,5 % do 12 % aluminija, do 5 % nikla i željeza te 1 % mangana. Takve aluminijske bronce koriste se u pomorskoj tehnici za izradu propelera, dijelova ventila, osovina pumpi, neiskrećih alata i dr. [8].

Na slici 8. prikazan je neiskreći ručni alat od aluminijske bronce.

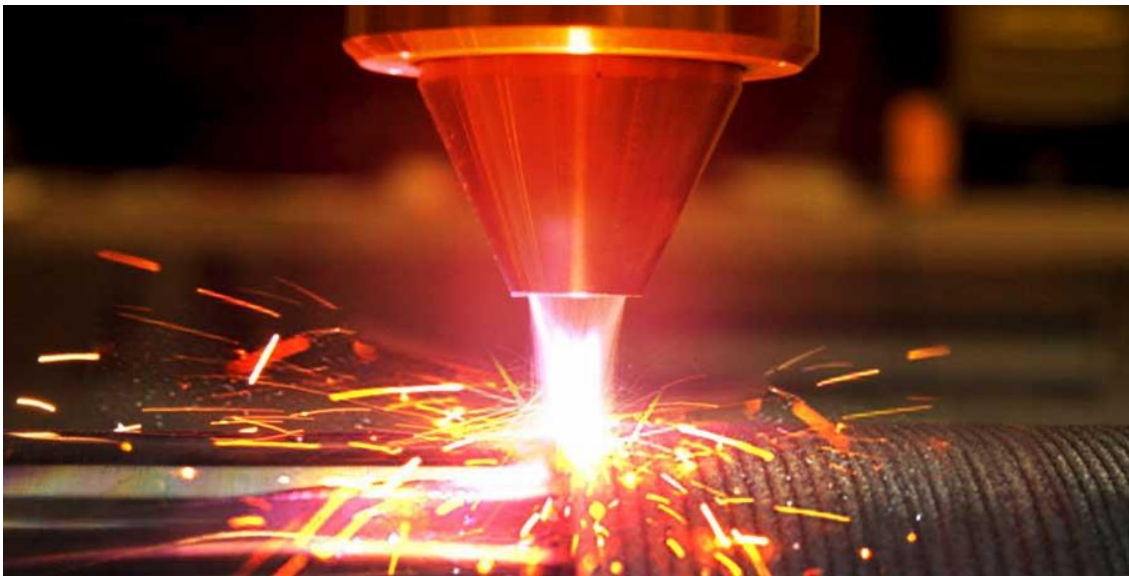


Slika 8. Neiskreći ručni alat od aluminijske bronce [17]

4. NAVARIVANJE

Navarivanje je postupak u kojem se dodatni materijal, u obliku praha, u slojevima nanosi na osnovni materijal. Dodatni materijal zavaruje se laserom na osnovnom materijalu te je nakon brzog hlađenja metalurški povezan sa osnovnim materijalom. Navarivanjem se poboljšavaju svojstva na površini legure te se često primjenjuje kod legura koje su tijekom eksploatacije izložene tribološkim i korozivskim oštećenjima. Aluminijske legure te legure na bazi nikla, kobalta i željeza navarivanjem značajno poboljšavaju otpornost na trošenje te otpornost na oksidaciju i koroziju [4]. Ovaj postupak se također primjenjuje za popravljjanje oštećenja i pukotina nastalih kavitacijskom erozijom tijekom eksploatacije. U takvim slučajevima često se koristi aluminijska bronca s dodatkom nikla koja ima jako dobra mehanička svojstva u odnosu na druge legure [18].

Na slici 9. prikazan je postupak navarivanja.



Slika 9. Postupak navarivanja [19]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Cilj rada

Osnovni cilj rada bio je određivanje abrazijske otpornosti navarenog sloja aluminijske bronce oznake CuAl8Ni2Fe2 i usporedba s abrazijskom otpornošću osnovnog materijala legure CuAl10Fe5Ni5. Na temelju rezultata usporedbe treba procijeniti kvalitetu navarenog spoja.

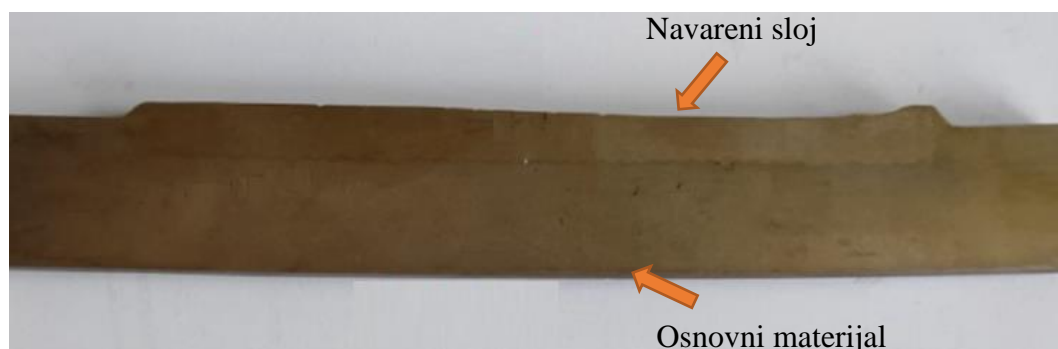
Kako bi se okarakterizirao navareni sloj i osnovni materijal te usporedila njihova mikrostruktura, mehanička i tribološka svojstva, provedena su sljedeća ispitivanja:

- analiza kemijskog sastava osnovnog materijala i materijala navarenog sloja
- analiza mikrostrukture osnovnog materijala i materijala navarenog sloja
- otpornost na abrazijsko trošenje
- mjerenje mikrotvrdoće HV0,2.

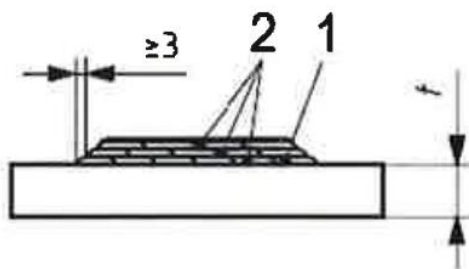
5.2. Materijal za ispitivanje

Sva ispitivanja provedena su na navarenom sloju od bakrove legure oznake CuAl8Ni2Fe2Mn2 i na osnovnom materijalu CuAl10Fe5Ni5. Ispitivanjem je obuhvaćena i zona utjecaja topline te metal navara. Na osnovni materijal navar je nanesen elektrolučnim zavarivanjem taljivom žicom pod zaštitom inertnog plina (Metal Inert Gas - MIG). Kao zaštitni plin pri navarivanju koristio se inertni plin argon (Ar 99,9 %).

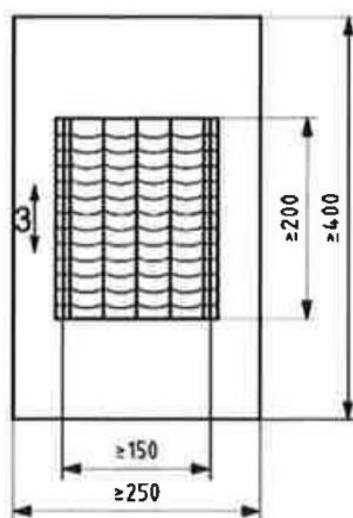
Na slici 10. prikazan je navareni sloj na osnovnom materijalu. Na slici 11. i slici 12. vide se detalj pripreme i sekvence zavarivanja.



Slika 10. Navareni sloj na osnovnom materijalu



Slika 11. Detalj pripreme navara



Slika 12. Sekvence navarivanja

U tablici 1. prikazani su parametri zavarivanja.

Tablica 1. Parametri zavarivanja

Oznaka postupka 131						
Prolaz Br./N	Napon V	Jakost struje A	Unos topline KJ/mm	Brzina zavarivanja mm/min	Brzina žice m/min	Debljina dodatnog materijala mm
1-n	22	240	0,50	560	9	1,2

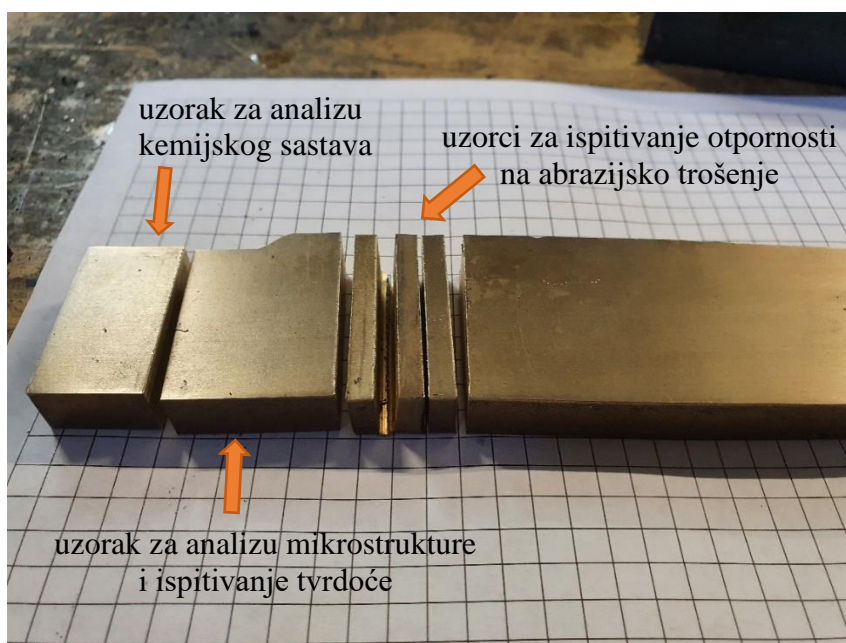
5.3. Priprema uzoraka za ispitivanje

Kako bi se provela navedena ispitivanja, potrebno je pripremiti odgovarajuće uzorke. Svi potrebni uzorci izrezani su strojnom pilom u Laboratoriju za strojnu obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Rezanje uzoraka na strojnoj pili prikazano je na slici 13. Na slici 14. prikazani su izrezani uzorci za analizu kemijskog sastava, analizu mikrostrukture i ispitivanje abrazijske otpornosti na Taber abraderu.



Slika 13. Rezanje uzoraka na strojnoj pili



Slika 14. Izrezani uzorci za planirana ispitivanja

5.4. Analiza kemijskog sastava

U Laboratoriju za analizu metala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, provedena je analiza kemijskog sastava osnovnog materijala i metala navara. Kemijski sastav određen je metodom optičke emisijske spektrometrije. Metoda optičke spektrometrije jedna je od najčešće korištenih i najpreciznijih metoda za određivanje kemijskih elemenata u uzorku. Ovom metodom mjeri se emisija fotona iz atoma i iona koji su pobuđeni ioniziranim plemenitim plinom argonom [20].

Ispitivanje kemijskog sastava provedeno je na uređaju GDS 850A LECO, prikazanom na slici 15.



Slika 15. Uređaj za analizu kemijskog sastava GDS 850A LECO

Nakon analize kemijskog sastava osnovnog materijala i metala navara, dobiveni su rezultati koji su prikazani u tablici 2.

Tablica 2. Rezultati kemijskog sastava za osnovni materijal i navar

	Maseni udio elemenata, %							
	Al	Fe	Ni	Mn	Zn	Sn	Pb	Cu
osnovni materijal	8,6	4,4	4,2	1,4	0,9	0,6	0,3	ostatak
navar	8,4	1,8	2,5	1,7	< 0,2	< 0,2	< 0,2	ostatak

U tablici 3. prikazan je kemijski sastav za osnovni materijal CuAl10Fe5Ni5 zajamčen od strane proizvođača, dok je u tablici 4. prikazan također zajamčeni kemijski sastav za metal navara CuAl8Ni2Fe2Mn2. Nakon usporedbe dobivenih rezultata kemijske analize sa zajamčenim kemijskim sastavom može se zaključiti da sastav osnovnog materijala i metala navara odgovaraju propisanom kemijskom sastavu.

Tablica 3. Zajamčeni kemijski sastav osnovnog materijala oznake CuAl10Fe5Ni5 [21]

Maseni udio elemenata, %						
Al	Fe	Ni	Mn	Pb	Cu	Ostalo
8,5 - 10,5	4,0 - 5,5	4,0 - 6,0	2,5 max	0,03 max	76,0 - 83,0	ostatak

Tablica 4. Zajamčeni kemijski sastav metala navara oznake CuAl8Ni2Fe2Mn2 [22]

Maseni udio elemenata, %							
Al	Fe	Ni	Mn	Zn	Sn	Pb	Cu
7,0 - 9,5	0,5 - 2,5	0,5 - 3,0	0,5 - 2,5	< 0,2	< 0,2	< 0,02	ostatak

5.5. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U okviru analize mikrostrukture provodi se priprema metalografskog uzorka koja uključuje zalijevanje uzorka, brušenje i poliranje. Nakon toga slijedi promatranje mikrostrukture u poliranom i nagrizenom stanju.

5.5.1. Priprema metalografskog uzorka

Nakon što je na strojnoj pili izrezan uzorak za analizu mikrostrukture slijedi njegovo zalijevanje u polimernu masu kako bi se pojednostavilo rukovanje s uzorkom pri daljnjoj metalografskoj pripremi i kako bi se dobila kvalitetnija slika mikrostrukture na rubovima uzorka. Na slici 16. prikazan je kalup za zalijevanje uzorka hladnim postupkom, a na slici 17. prikazan je metalografski uzorak nakon vađenja iz kalupa.



Slika 16. Kalup za zalijevanje uzorka



Slika 17. Metalografski uzorak nakon vađenja iz kalupa

Nakon vađenja uzorka iz kalupa slijedi brušenje i poliranje površine metalografskog uzorka kako bi se mogla provesti analiza mikrostrukture i ispitivanje tvrdoće. Uzorak se brusi na uređaju za brušenje, prikazanom na slici 18.



Slika 18. Uređaj za brušenje i poliranje uzorka

Brzina okretanja brusne ploče iznosi oko 300 o/min. Brušenje površine uzorka provodi se u nekoliko koraka. U prvom koraku koristi se brusni papir kvalitete P320, a u svakom sljedećem koraku kvaliteta brusnog papira se povećava. Koriste se brusni papiri kvalitete P600, P1000, P2400, a završava se s kvalitetom P4000. Tijekom postupka brušenja po brusnom papiru teče voda koja istovremeno hladi uzorak te služi kao lubrikant.

Nakon brušenja slijedi postupak poliranja koji se provodi na istom uređaju, u dva koraka. Kao podloga za poliranje koristi se tkanina na koju se stavlja dijamantna pasta, a kao sredstvo za hlađenje koristi se lubrikant. U prvom koraku koristi se dijamantna pasta srednjeg promjera čestica od 3 μm , a podloga za poliranje okreće se brzinom od 150 o/min. U drugom koraku, polira se tekućinom za poliranje s abrazivnim česticama od 0,03 μm . Nakon toga na uzorku se može provesti analiza mikrostrukture u poliranom stanju.

Kako bi se analizirala mikrostruktura metalografskog uzorka, njegova površina promatra se na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51 prikazanom na slici 19.



Slika 19. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

Nakon analize mikrostrukture u poliranom stanju površina uzorka se nagriza kako bi se otkrila mikrostruktura osnovnog materijala i materijala navara.

Uzorak se nagriza u sredstvu za nagrizanje koje je odabrano prema kemijskom sastavu osnovnog materijala i metala navara. Korišteno je sredstvo za nagrizanje naziva Cu4B kompleks, koje sadrži:

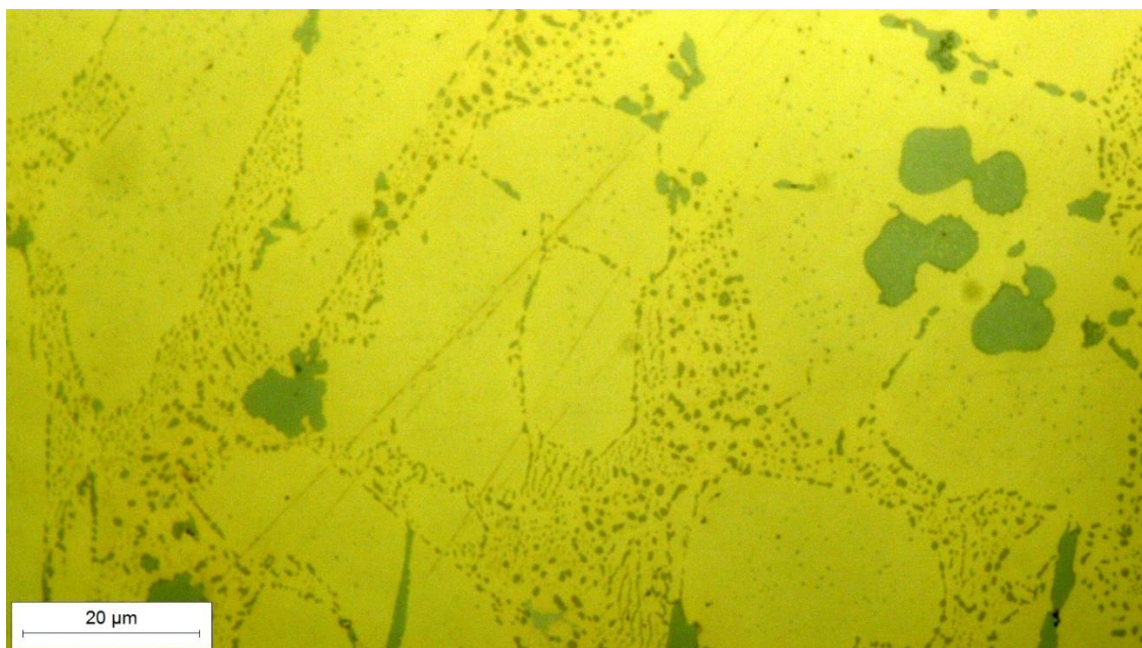
- 30 ml HCl
- 100 ml destilirane vode
- 5 g FeCl₃.

Nakon nagrizanja uzorak se ponovno analizira na svjetlosnom mikroskopu.

5.5.2. *Analiza mikrostrukture u poliranom stanju*

U poliranom stanju u osnovnom materijalu vidljivi su kristali mješanci α -faze te intermetalni spojevi, takozvana κ -faza, koja može biti izlučena u obliku krupnijih ili sitnijih, globularnih ili lamelarnih precipitata.

Opisana mikrostruktura u poliranom stanju vidljiva je na slici 20., a područje zone utjecaja topline i navara u poliranom stanju prikazana je na slici 21.



Slika 20. Osnovni materijal u poliranom stanju, snimljeno pri povećanju 1000×



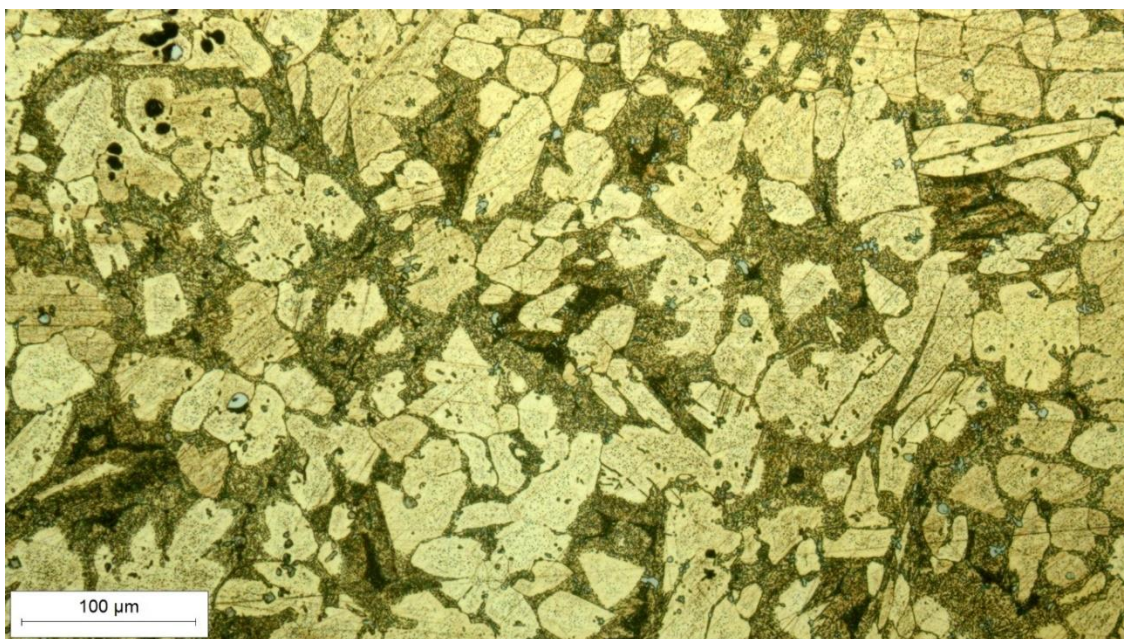
Slika 21. Metal navara i zona utjecaja topline u poliranom stanju

5.5.3. Analiza mikrostrukture u nagrizenom stanju

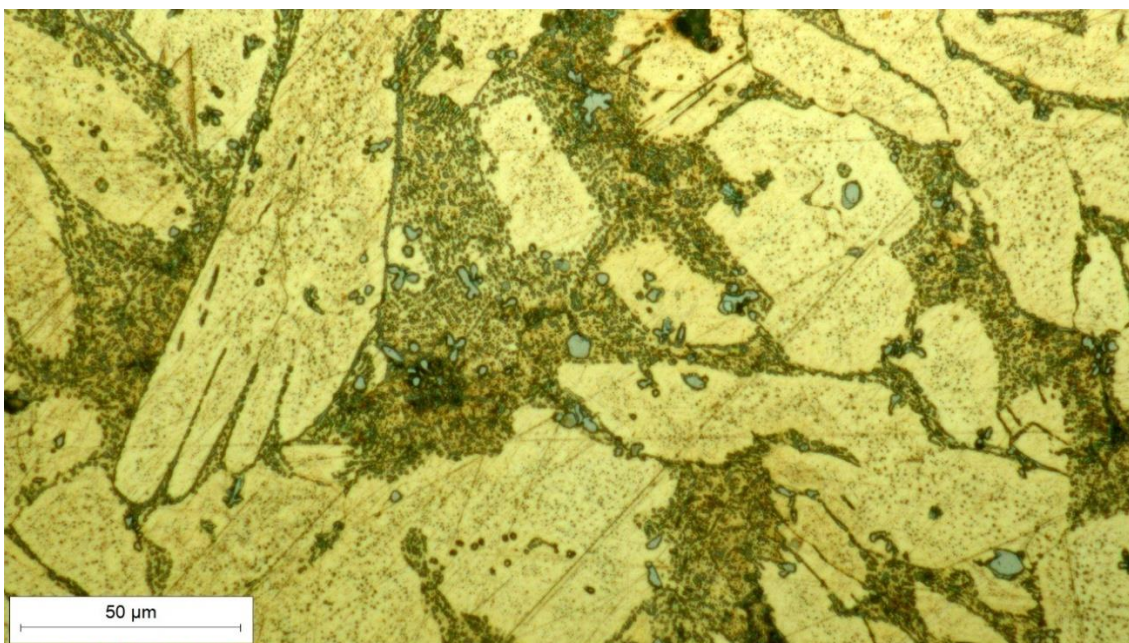
U mikrostrukтури osnovnog materijala u nagrizenom stanju, na slikama 22., 23. i 24., jasno su vidljivi α -faza, eutektoid i precipitati κ -faze. α -faza je kristal mješanac bakra, sadrži puno nikla i nešto manje aluminija i željeza. Globularni precipitati κ -faze su intermetalni spojevi željeza i aluminija (Fe_3Al), a neki sitniji lamelarni precipitati iste faze su intermetalni spojevi nikla i aluminija (NiAl) [23].



Slika 22. Osnovni materijal u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 50×



Slika 23. Osnovni materijal u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 200×

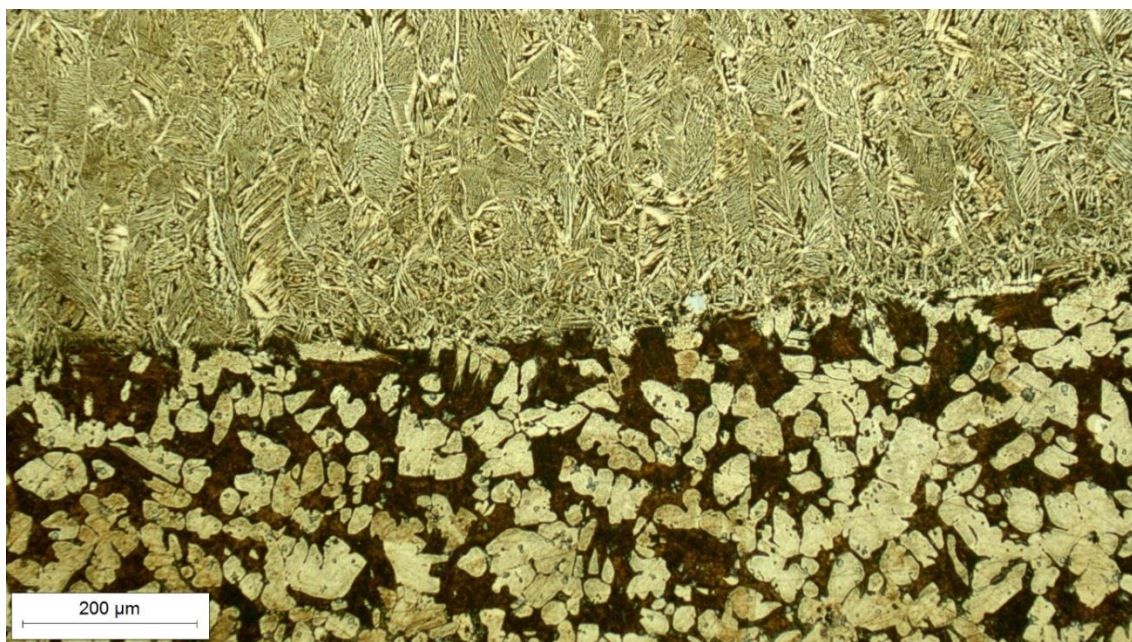


Slika 24. Osnovni materijal u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 500×

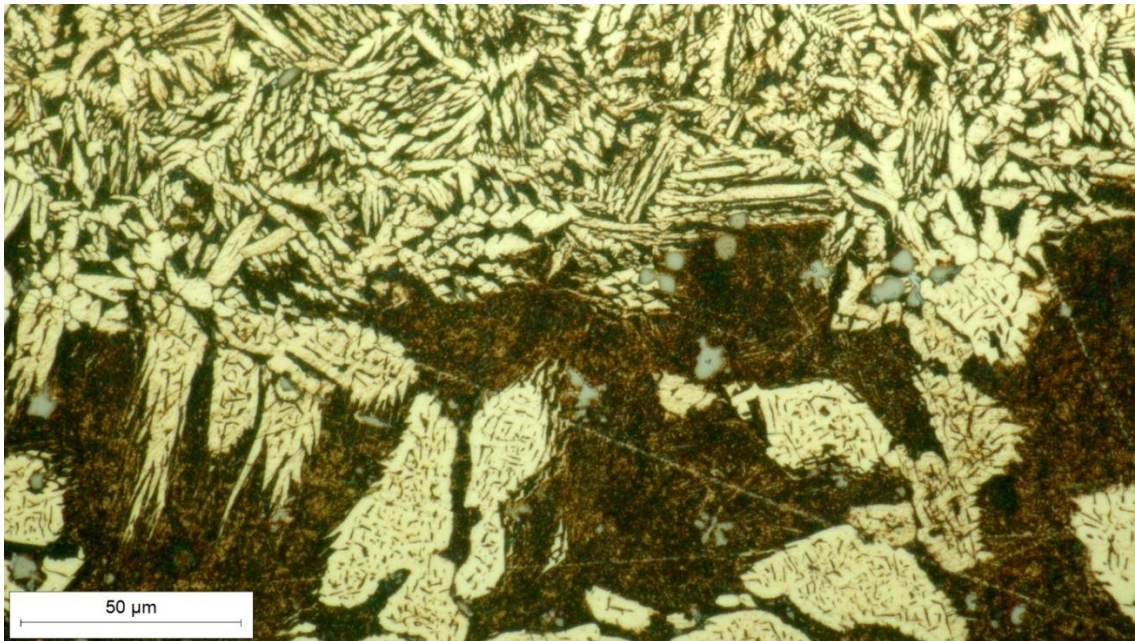
Zona utjecaja topline u nagrizenom stanju prikazana je na slikama 25., 26. i 27. Linija staljivanja je jasno izražena te se jasno vidi mikrostruktura osnovnog materijala i mikrostruktura metala navara.



Slika 25. Zona utjecaja topline u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 50×

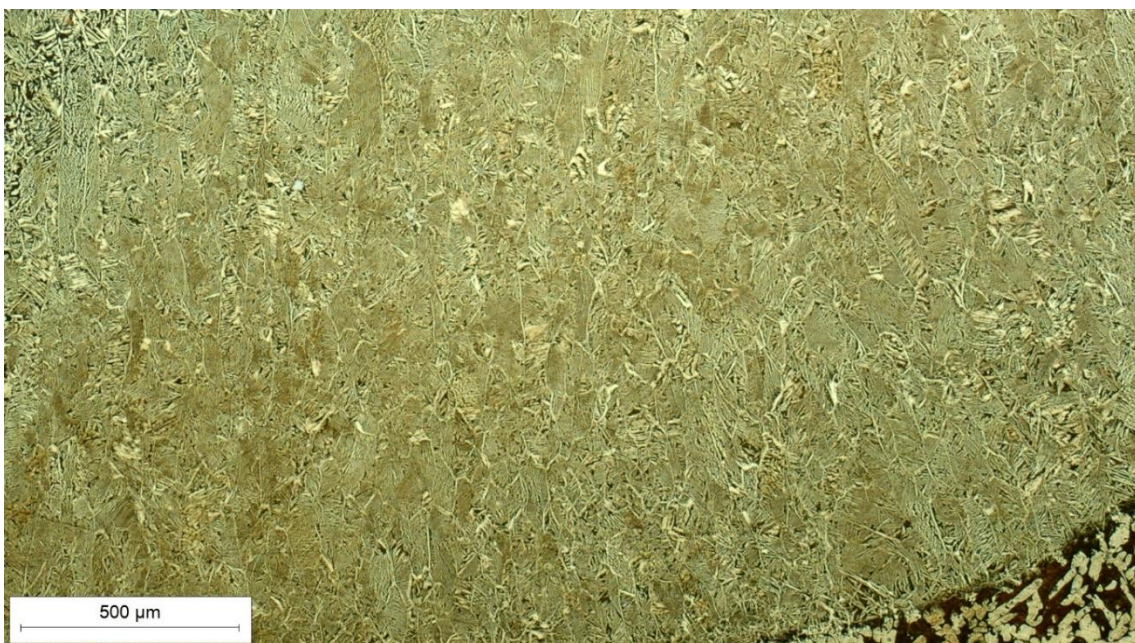


Slika 26. Zona utjecaja topline u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 100×



Slika 27. Zona utjecaja topline u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 500×

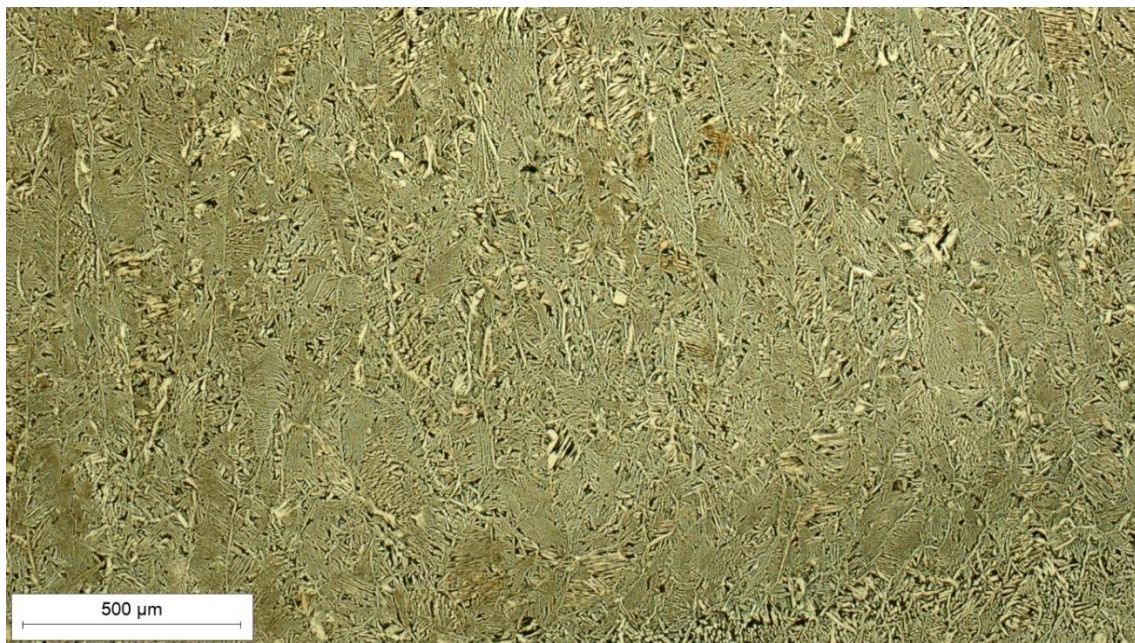
Na slikama od 28. do 33. prikazana je mikrostruktura metala navara. Razlika u mikrostrukturi između pojedinih slojeva metala navara nije uočena. Mikrostruktura metala navara je tipična ljevačka, dendritna i usmjerena mikrostruktura, bez vidljivih nepravilnosti.



Slika 28. Prvi sloj navara u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 50×



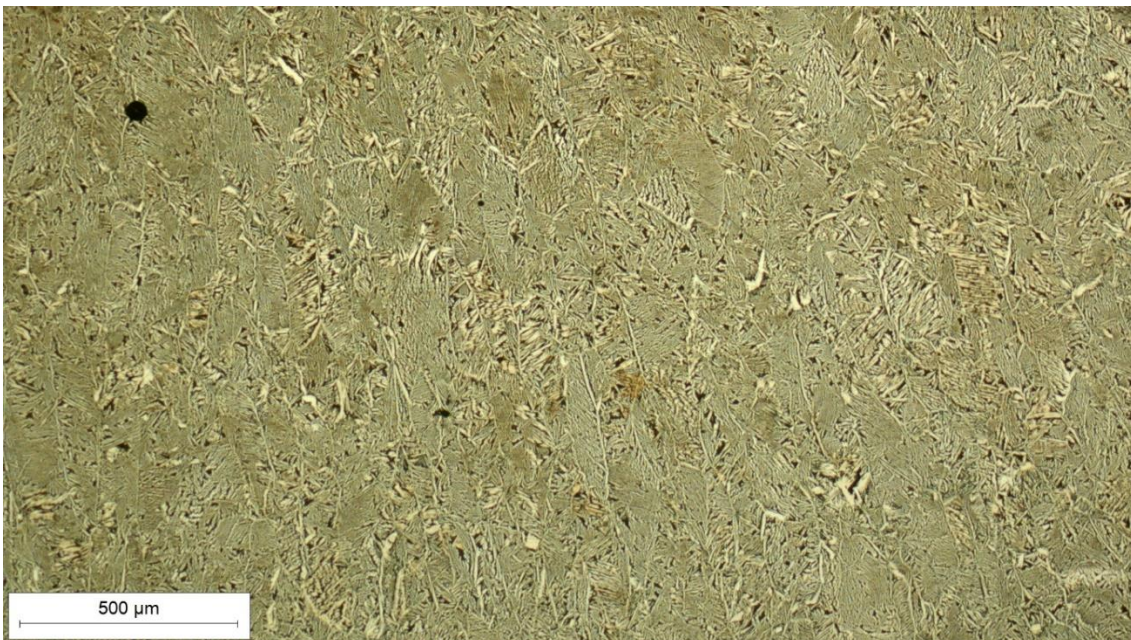
Slika 29. Prvi sloj navara u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 200×



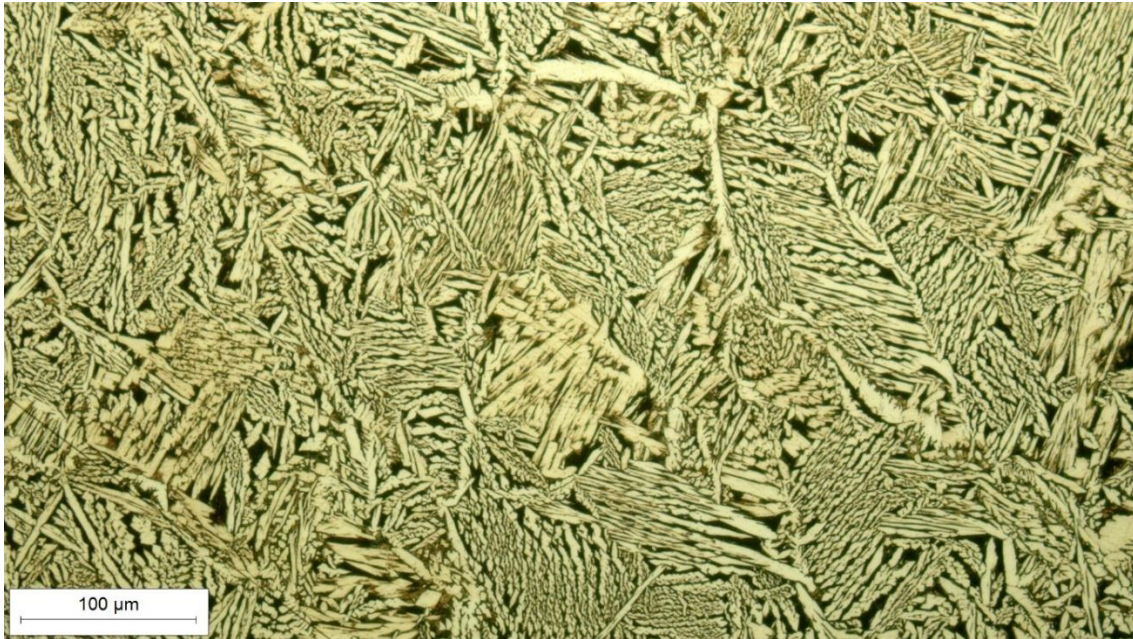
Slika 30. Drugi sloj navara u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 50×



Slika 31. Drugi sloj navara u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 200×



Slika 32. Treći sloj navara u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 50×



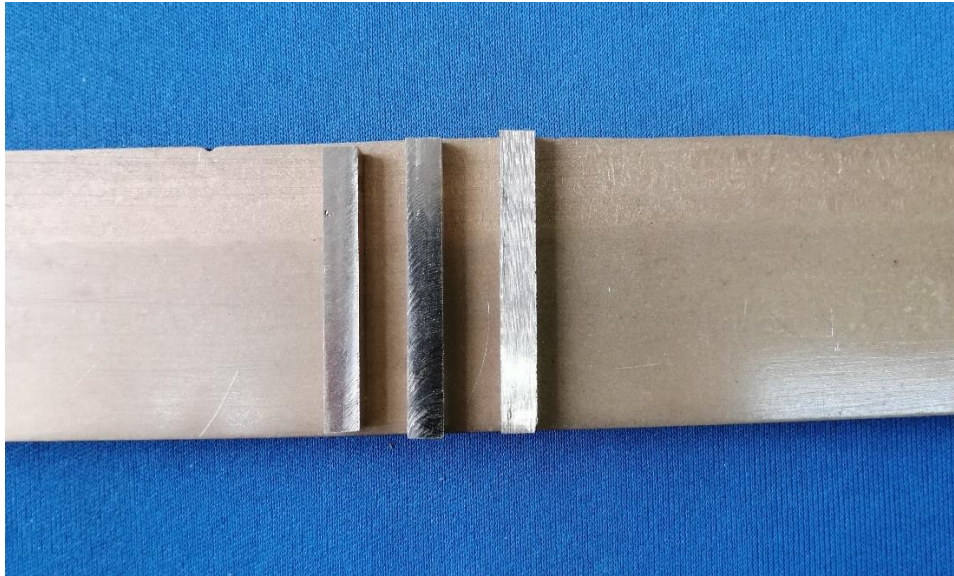
Slika 33. Treći sloj navara u nagrizenom stanju, snimljeno pri povećanju 200×

5.6. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je u Laboratoriju za tribologiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Osnovni cilj ispitivanja bio je utvrditi i usporediti abrazijsku otpornost osnovnog materijala, zone utjecaja topline i metala navara, tj. utvrditi promjenu abrazijske otpornosti po poprečnom presjeku u području navarenog sloja. Ispitivanje je provedeno na uređaju Taber abrader, prikazanom na slici 34. Uzorci za ispitivanje, četvrtastog poprečnog presjeka, izrezani su iz dijela ploče s navarom, a dimenzije uzoraka bile su $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 35\text{ mm}$. Na slici 35. vide se izrezani uzorci i njihova pozicija u odnosu na osnovnu ploču i navar. Prije početka ispitivanja izmjerena je masa uzoraka na mjernoj vagi „Analytical Plus balance Ohaus“, prikazanoj na slici 36., kako bi se odredila početna masa uzoraka. Sva druga mjerenja mase pri ispitivanju abrazijske otpornosti provedena su na istoj vagi.



Slika 34. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje na uređaju "Taber abrader"



Slika 35. Uzorci za ispitivanje abrazijske otpornosti na Taber abraderu



Slika 36. Mjerna vaga "Analytical Plus balance Ohaus"

Tijekom ispitivanja korišten je brusni papir s abrazivnim česticama od silicijevog karbida, kvalitete P220 sa srednjim promjerom abrazivnih čestica od 68 μm . Brusni papir se postavlja na okretni disk uređaja koji rotira brzinom od 60 okretaja u minuti. Svaki ciklus trošenja trajao je 200 sekundi ili 200 okretaja diska. Uzorci se u držač uređaja postavljaju tako da se abradira površina 4 mm \times 4 mm. Na slici 37. vidi se položaj ispitnog uzorka pri ispitivanju. S abradiranjem uzorka kreće se sa strane navarenog sloja i traje sve dok se ne uđe u osnovni materijal.



Slika 37. Postavljeni ispitni uzorak u čeljusti držača

Svaki ciklus ispitivanja abrazijske otpornosti na Taber abraderu sastoji se od sljedećih koraka:

- Vaganje uzorka na mjernoj vagi
- Postavljanje brusnog papira na disk
- Postavljanje ispitnog uzorka u držač
- Pokretanje diska i abradiranje površine ispitnog uzorka
- Skidanje ispitnog uzorka i brusnog papira
- Čišćenje ispitnog uzorka četkicom s finim vlaknima
- Vaganje uzorka na mjernoj vagi

Tijekom ispitivanja abradirane čestice s površine brusnog papira uklanjaju se usisavanjem.

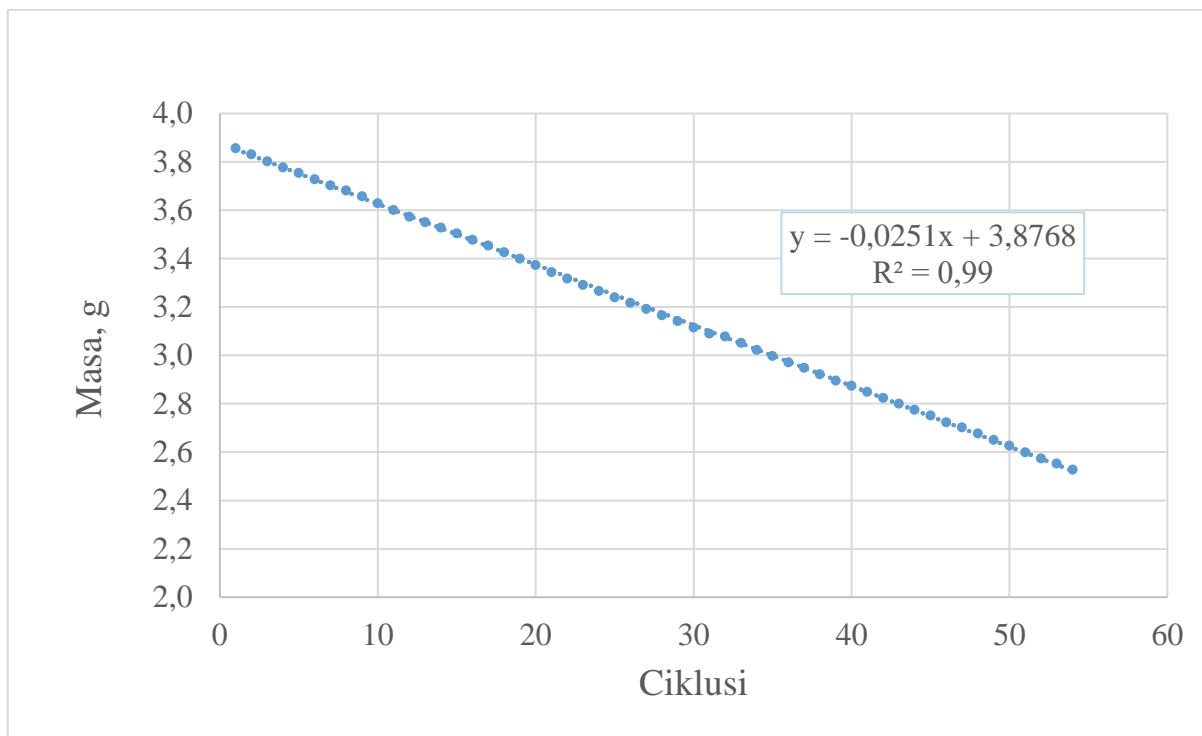
U tablici 5. prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje.

Tablica 5. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

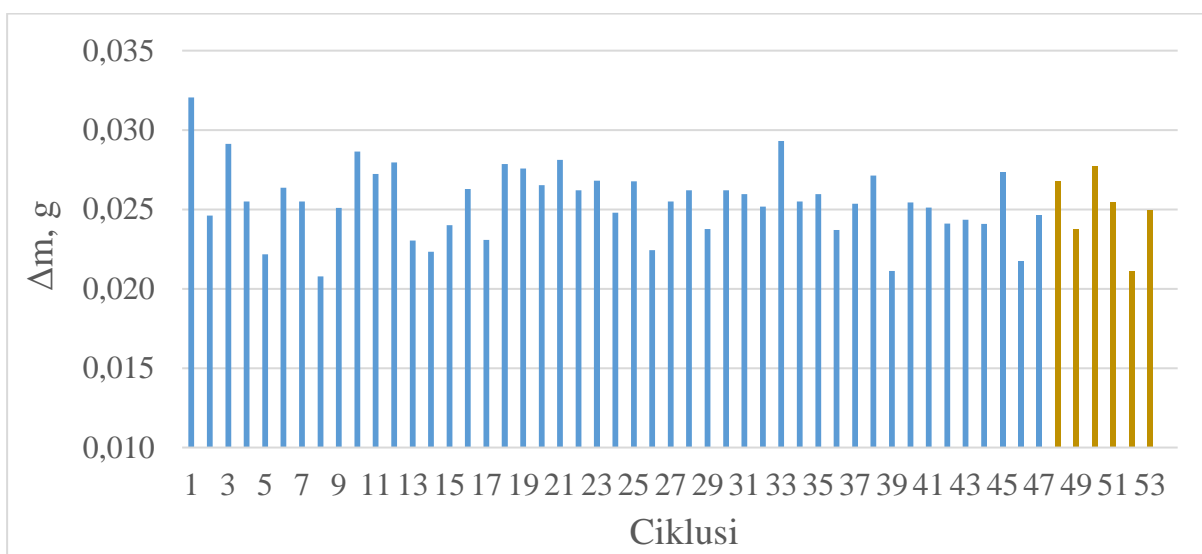
ciklus	Δm	ciklus	Δm	ciklus	Δm
1.	0,0320	19.	0,0276	37.	0,0254
2.	0,0246	20.	0,0265	38.	0,0271
3.	0,0291	21.	0,0281	39.	0,0211
4.	0,0255	22.	0,0262	40.	0,0254
5.	0,0222	23.	0,0268	41.	0,0251
6.	0,0264	24.	0,0248	42.	0,0241
7.	0,0255	25.	0,0268	43.	0,0243
8.	0,0208	26.	0,0224	44.	0,0241
9.	0,0251	27.	0,0255	45.	0,0274
10.	0,0286	28.	0,0262	46.	0,0217
11.	0,0272	29.	0,0238	47.	0,0246
12.	0,0280	30.	0,0262	48.	0,0268
13.	0,0230	31.	0,0260	49.	0,0238
14.	0,0223	32.	0,0252	50.	0,0277
15.	0,0240	33.	0,0293	51.	0,0255
16.	0,0263	34.	0,0255	52.	0,0211
17.	0,0231	35.	0,0260	53.	0,0250
18.	0,0279	36.	0,0237	-	-

U dijagramu na slici 38. prikazani su rezultati mjerenja mase nakon ispitivanja abrazijskog trošenja na Taber abraderu. Prikazani su rezultati mjerenja mase nakon svakog od 53 ciklusa abradiranja površine, pri čemu je svaki ciklus trošenja trajao 200 sekundi ili 200 okretaja diska s brusnim papirom.

Na slici 39. prikazan je gubitak mase pri abrazijskom trošenju za sve cikluse. Prvih 47 ciklusa predstavlja gubitak mase u metalu navarenog sloja (plavi stupići), a zadnjih 6 ciklusa predstavljaju gubitak mase u osnovnom materijalu (smeđi stupići).



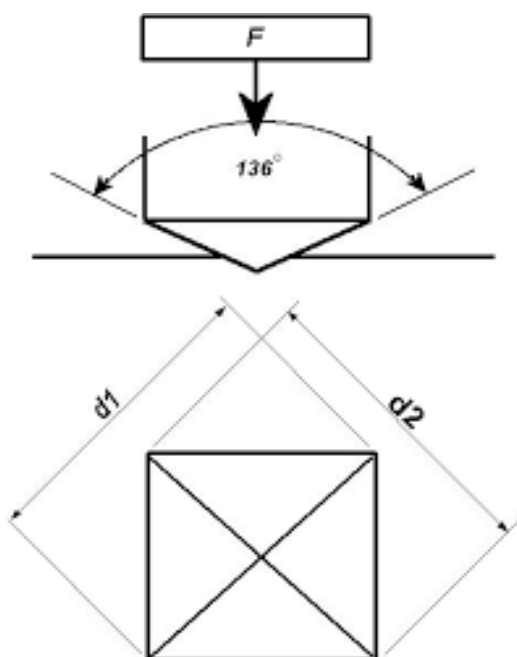
Slika 38. Smanjenje mase uzoraka tijekom abrazijskog trošenja



Slika 39. Gubitak mase pri abrazijskom trošenju za sve cikluse

5.7. Ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje tvrdoće provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitana je mikrotvrdoća HV0,2 osnovnog materijala i metala navara, metodom po Vickersu, prema normi HRN EN ISO 6507 – 1:2008. Vickersova metoda koristi dijamantni penetrator u obliku istostrane četverostrane piramide, s kutem između stranica od 136°, koji se utiskuje u poliranu površinu uzorka. Skica dijamantnog penetratora i otiska Vickersove metode prikazana je na slici 40. [24].



Slika 40. Skica penetratora i otiska kod metode mjerenja tvrdoće po Vickersu

Dobivene vrijednosti tvrdoće neovisne su o primijenjenoj sili te se određuju prema izrazu:

$$HV = \frac{F \cdot 0,189}{d^2}$$

gdje su:

- F – primijenjena sila, N
- d – srednja vrijednost dijagonala baze piramide u mm.

Dijagonale (d_1 i d_2) otisnute u materijalu mjere se pomoću mjernog mikroskopa, prikazanom na slici 41. te se određuju prema izrazu:

$$d = \frac{(d_1 + d_2)}{2}$$

Primijenjena sila ovisi o debljini uzorka te može biti u rasponu od 49 N do 981 N [25].



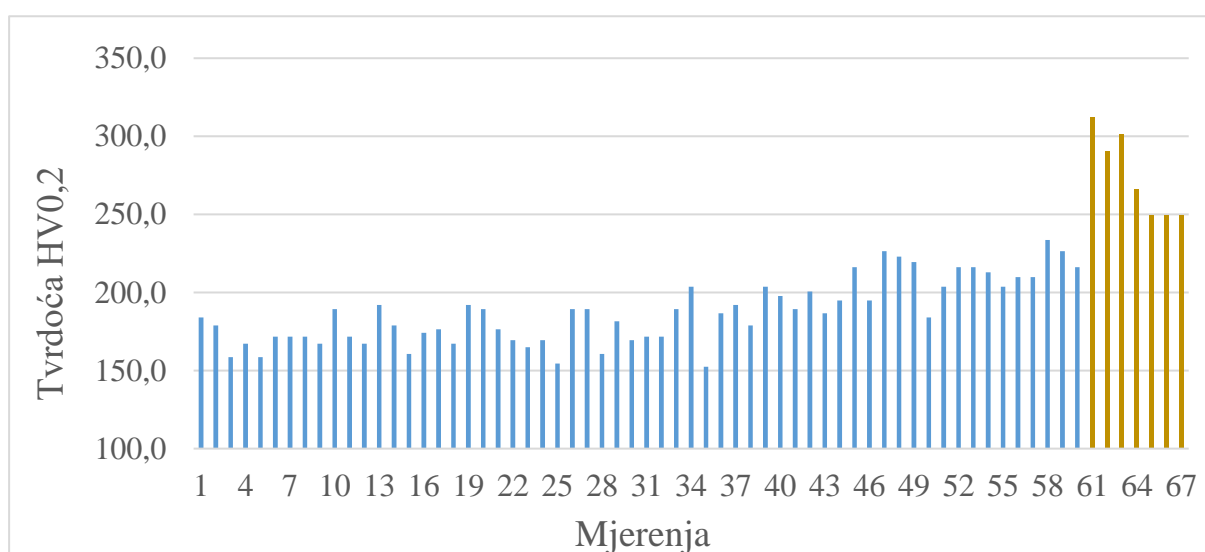
Slika 41. Mikrotvrdomjer PMT3

U tablici 6. prikazani su rezultati ispitivanja mikrotvrdoće HV0,2.

U dijagramu na slici 42. grafički su prikazani rezultati mjerenja tvrdoće od ruba navarenog sloja preko linije staljivanja do osnovnog materijala. Prvih 60 mjerenja napravljeno je u metalu navara (plavi stupići), a preostala mjerenja napravljena su u osnovnom materijalu (smeđi stupići).

Tablica 6. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće HV0,2

	HV0,2		HV0,2		HV0,2		HV0,2
1.	184,0	18.	167,1	35.	152,5	52.	216,2
2.	178,9	19.	192,0	36.	186,6	53.	216,2
3.	158,5	20.	189,3	37.	192,0	54.	212,9
4.	167,1	21.	176,5	38.	178,9	55.	203,6
5.	158,5	22.	169,4	39.	203,6	56.	209,7
6.	171,7	23.	164,9	40.	197,7	57.	209,7
7.	171,7	24.	169,4	41.	189,3	58.	233,7
8.	171,7	25.	154,4	42.	200,6	59.	226,4
9.	167,1	26.	189,3	43.	186,6	60.	216,2
10.	189,3	27.	189,3	44.	194,8	61.	312,3
11.	171,7	28.	160,6	45.	216,2	62.	290,6
12.	167,1	29.	181,4	46.	194,8	63.	301,1
13.	192,0	30.	169,4	47.	226,4	64.	266,5
14.	178,9	31.	171,7	48.	223,0	65.	249,3
15.	160,6	32.	171,7	49.	219,5	66.	249,3
16.	174,1	33.	189,3	50.	184,0	67.	249,3
17.	176,5	34.	203,6	51.	203,6	-	-



Slika 42. Dijagram rezultata tvrdoće HV0,2

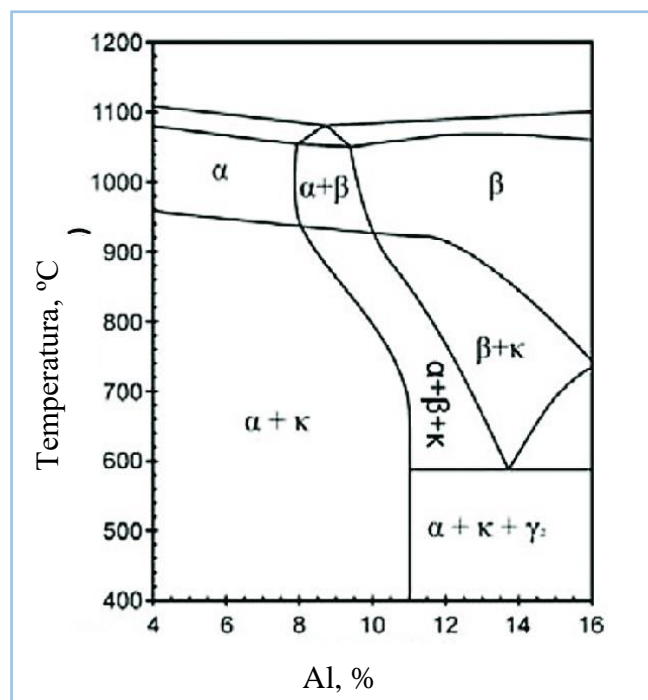
6. Osvrt na rezultate ispitivanja

6.1. Osvrt na analizu kemijskog sastava

Nakon provedene analize kemijskog sastava osnovnog materijala i materijala navara, rezultati su uspoređeni sa zajamčenim kemijskim sastavom od strane proizvođača. Iz rezultata se može zaključiti kako dobiveni kemijski sastav odgovara propisanom kemijskom sastavu osnovnog materijala i materijala navara. Osnovni materijal je legura bakra oznake CuAl10Fe5Ni5, a dodatni materijal je također legura bakra oznake CuAl8Ni2Fe2Mn2.

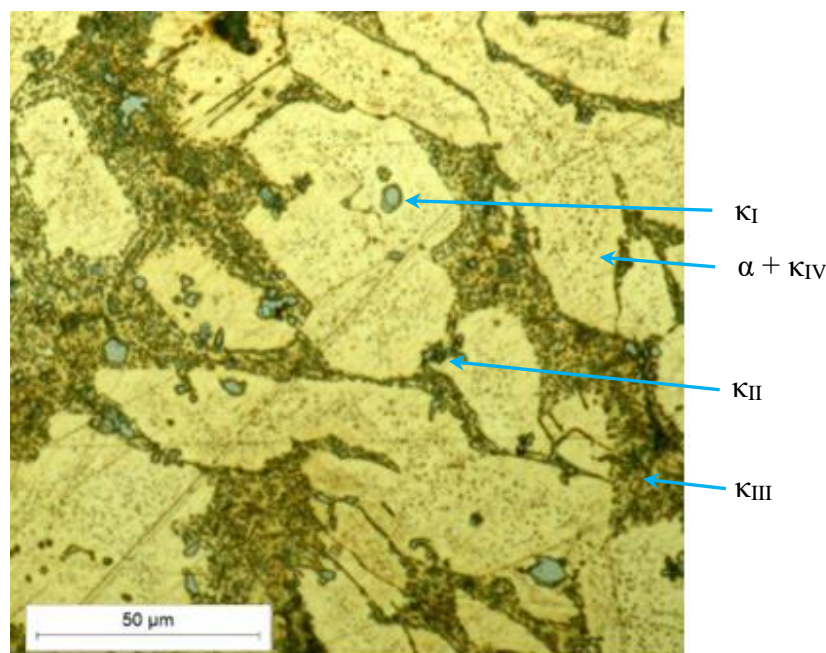
6.2. Osvrt na analizu mikrostrukture

Mikrostruktura osnovnog materijala, zone utjecaja topline te materijala navara analizirana je u poliranom i nagrizenom stanju. Već u poliranom stanju vide se različiti konstituenti u osnovnom materijalu, leguri CuAl10Fe5Ni5. U metalu navara vide se sporadično sitne pore što je uobičajeno u ljevačkoj mikrostrukтури. U nagrizenom stanju u osnovnom materijalu jasnije se vide prisutne mikrostrukturne faze. S obzirom na kemijski sastav osnovnog materijala u kojem se nalazi 10 %Al, 5 %Fe i 5 %Ni, u dijagramu stanja, na slici 43., može se vidjeti da se mikrostruktura ovih legura sastoji od α -kristala mješanaca s osnovnom rešetkom bakra te κ -faze.



Slika 43. Dijagram stanja za CuAl leguru + 5 %Ni + 5 %Fe [23]

α -faza osim bakra sadrži puno nikla i nešto manje aluminija te željeza. κ -faza je intermetalni spoj i može biti izlučena u različitim oblicima, koji su prikazani na slici 44. Najveći precipitati su u obliku globula (κ_I), a po sastavu su intermetalni spojevi željeza i aluminija (Fe_3Al) isto kao i finiji precipitati (κ_{II}). Lamelarni precipitati (κ_{III}) su intermetalni spojevi nikla i aluminija ($NiAl$). Vrlo sitni precipitati ove faze (κ_{IV}) mogu biti izlučeni unutar α -kristala mješanaca, a po sastavu su intermetalni spojevi željeza i aluminija (Fe_3Al) [23].



Slika 44. Mikrostruktura osnovnog materijala u nagrizenom stanju

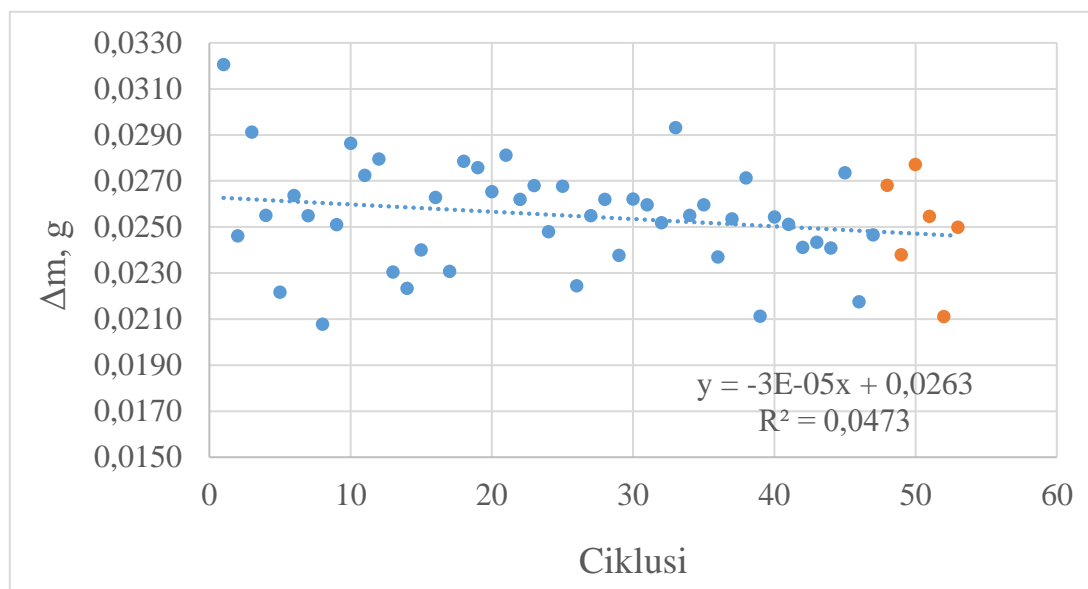
Mikrostruktura metala navara je tipična ljevačka, dendritna mikrostruktura i usmjerena, bez vidljivih nepravilnosti. Mikrostruktura se sastoji od dvije vrste kristala, svijetlo su α -kristali mješanci, a tamno su intermetalni spojevi. Između mikrostrukture pojedinih slojeva navara nema izražene razlike.

Linija staljivanja je jasno izražena. U zoni utjecaja topline ima puno više izlučenih intermetalnih spojeva κ -faze.

6.3. Osvrt na rezultate ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

Na slici 45. prikazan je dijagram u kojem se vidi kako se mijenjao gubitak mase kontinuiranim abrazijskim trošenjem od površine navarenog sloja do osnovnog materijala. Rasipanja rezultata su dosta velika. Postoji izrazito slaba, linearna negativna korelacija između gubitka mase pri

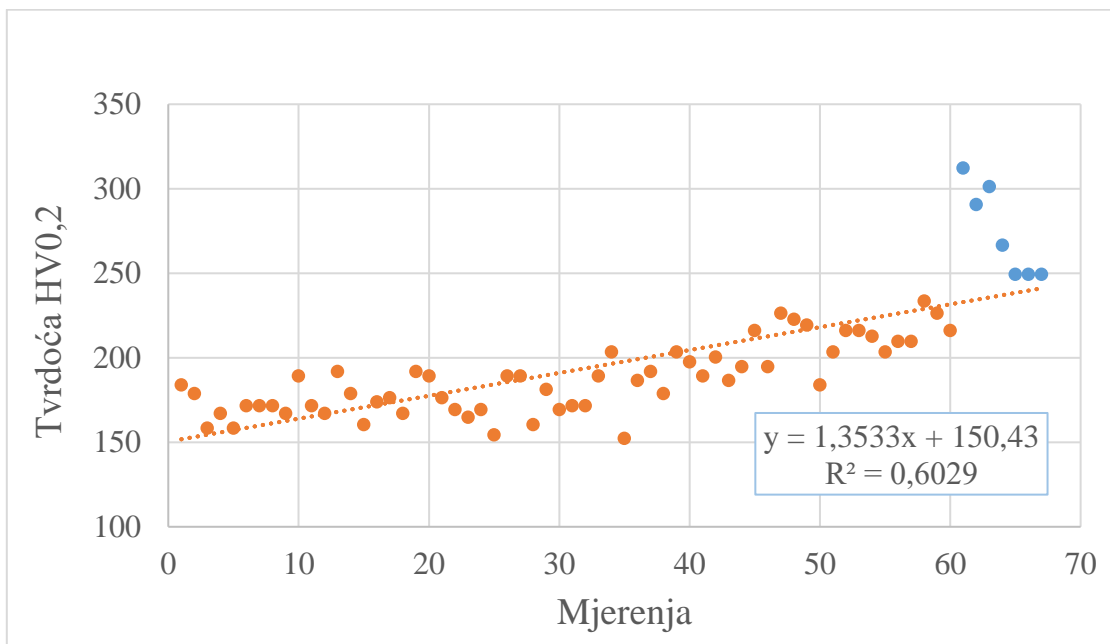
abraziji i udaljenosti od površine navara, što znači da se otpornost na abraziju neznatno povećava kako se ulazi u dubinu navara. Nije uočena razlika u gubitku mase pri abraziji između osnovnog materijala i metala navara, a ne može se uočiti ni razlika između pojedinih navarenih slojeva.



Slika 45. Promjena gubitka mase od površine navarenog sloja do osnovnog materijala

6.4. Osvrt na rezultate ispitivanja mikrotvrdoće HV0,2

Na slici 46. prikazan je dijagram u kojem se vidi kako se mijenja mikrotvrdoća od površine navarenog sloja do osnovnog materijala. Smeđe točkice predstavljaju rezultate mjerenja u metalu navara, a plave u osnovnom materijalu. Vrijednosti mikrotvrdoće kreću se u širokom rasponu od 152,5 do 312,3 HV0,2. Najveće vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su u zoni utjecaja topline. Zbog velikog unosa topline tijekom navarivanja u ovom uskom pojasu osnovnog materijala uz liniju staljivanja, izlučili su se tvrdi intermetalni spojevi (κ -faza), što je sigurno utjecalo na povišenje tvrdoće. Mikrotvrdoća HV0,2 osnovnog materijala viša je od mikrotvrdoće metala navara i iznosi 249,3 HV0,2. Postoji vrlo jasno izražen trend porasta mikrotvrdoće s udaljenošću od površine navarenog sloja prema osnovnom materijalu. Koeficijent linearne korelacije je pozitivan i ima vrlo visoku vrijednost $R=0,78$.



Slika 46. Dijagram rezultata ispitivanja mikrotvrdoće HV0,2

7. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih ispitivanja, na temelju dobivenih rezultata, može se zaključiti sljedeće:

- Na osnovni materijal oznake CuAl10Fe5Ni5 nanesen je navareni sloj aluminijske bronce oznake CuAl8Ni2Fe2, visine oko 12 mm.
- Mikrostruktura osnovnog materijala sastoji se od α -kristala mješanaca i precipitata intermetalnog spoja u različitim oblicima κ -faze, koji po sastavu mogu biti spojevi Fe_3Al i NiAl .
- U mikrostrukturi zone utjecaja topline uočen je puno viši udio intermetalnih spojeva (κ -faze) nego u osnovnom materijalu.
- Mikrostruktura navarenog sloja je tipična ljevačka, dendritna mikrostruktura, bez nepravilnosti, a sastoji se od α -kristala mješanaca i intermetalnih spojeva. Između pojedinih slojeva navara nema razlike u mikrostrukturi.
- Nema velike razlike između abrazijske otpornosti osnovnog materijala i metala navara. Korelacija između gubitka mase pri abrazijskom trošenju i udaljenosti od površine navara je izrazito slaba i negativna, što pokazuje da se otpornost na abraziju neznatno povećava kako se ulazi u dubinu navara.
- Postoji vrlo jasno izražen trend porasta mikrotvrdoće s udaljenošću od površine navarenog sloja prema osnovnom materijalu. Najveće vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 izmjerene su u zoni utjecaja topline zbog više izlučenih tvrdih intermetalnih spojeva (κ -faza). Vrijednost mikrotvrdoće u osnovnom materijalu iznosi 249,3 HV0,2.

Prema navedenim rezultatima zaključuje se kako je kvaliteta metala navara zadovoljavajuća te je materijal prikladan za eksploataciju.

LITERATURA

- [1] Radetzki M. Seven thousand years in the service of humanity—the history of copper, the red metal. *Resources Policy*. 2009.;34(4):176–84.
- [2] Donatus U, Omotoyinbo JA, Momoh IM, others. Mechanical properties and microstructures of locally produced aluminium-bronze alloy. *Journal on Mineral and Material Characterization and Engineering*. 2012.;11:1020–6.
- [3] Richardson I. *Guide to Nickel Aluminium Bronze for Engineers*. [citirano 26. veljača 2023.]; Dostupno na:
https://www.copper.org/applications/marine/nickel_al_bronze/pub-222-nickel-al-bronze-guide-engineers.pdf
- [4] Tao XP, Zhang S, Zhang CH, Wu CL, Chen J, Abdullah AO. Effect of Fe and Ni contents on microstructure and wear resistance of aluminum bronze coatings on 316 stainless steel by laser cladding. *Surf Coat Technol* [Internet]. 2018.;342:76–84.
Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897218301506>
- [5] Davis JR, others. *Copper and copper alloys*. ASM international; 2001.
- [6] Konečná R, Fintová S. *Copper and copper alloys: casting, classification and characteristic microstructures*. InTech Rijeka; 2012.
- [7] Pietrzyk S, Tora B. Trends in global copper mining—a review. U: *IOP conference series: materials science and engineering*. 2018. str. 12002.
- [8] Filetin T, Kovačiček F, Indof J. *Svojstva i primjena materijala*. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb. 2002.;142.
- [9] Li M, Zinkle SJ. *Physical and mechanical properties of copper and copper alloys*. 2012.;
- [10] Sverdrup HU, Ragnarsdottir KV, Koca D. On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves. *Resour Conserv Recycl*. 2014.;87:158–74.
- [11] Caron RN. *Copper Alloys: Properties and Applications*. U: *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier; 2001. str. 1665–8.
- [12] Sveti Juraj ubija zmaja – Zagrebi Zagreb [Internet]. [citirano 26. veljača 2023.].
Dostupno na: <https://zagrebizagreb.com/hr/sveti-juraj-ubija-zmaja/>
- [13] Vincent M, Hartemann P, Engels-Deutsch M. Antimicrobial applications of copper. *Int J Hyg Environ Health*. 2016.;219(7):585–91.

- [14] Konieczny J, Rdzawski Z. Antibacterial properties of copper and its alloys. Archives of Materials Science and Engineering. 2012.;56(2):53–60.
- [15] Peralta L, Farinha AC, Rego F. What are the 50 cent Euro coins made of? Eur J Phys. 01. rujan 2008.;29(5):901–9.
- [16] 10 Euro Cent: Diese Münzen können ein kleines Vermögen wert sein [Internet]. [citirano 21. veljača 2023.]. Dostupno na: <https://www.stern.de/wirtschaft/geld/10-euro-cent--diese-muenzen-koennen-ein-kleines-vermoegen-wert-sein-30578190.html>
- [17] Viljuškasto okasti ključ, neiskreći [Internet]. [citirano 22. veljača 2023.]. Dostupno na: <https://www.hoffmann-group.com/HR/hr/rotometal/Ru%C4%8Dni-alat/Stezni-alat/Klju%C4%8D-za-vijke/Vilju%C5%A1kasto-okasti-klju%C4%8Devi-i-garniture/Vilju%C5%A1kasto-okasti-klju%C4%8Devi/Vilju%C5%A1kasto-okasti-klju%C4%8D%2C-neiskre%C4%87i/p/759715>
- [18] Cottam R, Luzin V, Moody H, Edwards D, Majumdar A, Wong YC, i ostali. The role of microstructural characteristics in the cavitation erosion behaviour of laser melted and laser processed Nickel–Aluminium Bronze. Wear. rujan 2014.;317(1–2):56–63.
- [19] LASER CLADDING [Internet]. [citirano 15. veljača 2023.]. Dostupno na: <https://www.loukas.com.gr/services/laser-cladding/>
- [20] Hou X, Jones BT. Inductively coupled plasma/optical emission spectrometry. Sv. 2000, Encyclopedia of analytical chemistry. John Wiley & Sons Chichester, UK; 2000. str. 9468–85.
- [21] Product Information Sheet ALLOY CuAl10Fe5Ni5 [Internet]. [citirano 23. veljača 2023.]. Dostupno na: <https://www.awfraser.co.nz/AWFraser/files/9d/9d135b9a-439e-4b53-9698-79722c785585.pdf>
- [22] Total Materia [Internet]. [citirano 22. veljača 2023.]. Dostupno na: <https://portal.totalmateria.com/en/search/quick/materials/3262046/composition>
- [23] Böhm J, Linhardt P, Strobl S, Haubner R, Biezma M v. Microstructure of a Heat Treated Nickel-Aluminum Bronze and Its Corrosion Behavior in Simulated Fresh and Sea Water. Mater Perform Charact. 22. prosinac 2016.;5(5):MPC20160029.
- [24] ISO Standard: Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method (ISO 6507-1:2008).
- [25] Ivušić V, Franz M, Španiček Đ, Ćurković L. Materijali 1. 2. izd. Pustačić D, urednik. Zagreb : Fakultet strojarstva i brodogradnje Ivana Lučića 5; 2014. 5–93 str.