

Utjecaj usmjerene strukture na abrazijsku otpornost austenitnog nehrđajućeg čelika

Šargač, Juraj

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:846947>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Juraj Šargač

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Juraj Šargač

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentorici ovog rada, prof. dr. sc. Veri Rede, na uloženom trudu i pruženoj pomoći pri izradi rada. Također se zahvaljujem svim ostalim djelatnicima fakulteta koji su mi pomogli oko provedbe eksperimentalnog dijela rada.

Juraj Šargač



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za završne 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:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Juraj Šargač**

Mat. br.: 0035209453

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Utjecaj usmjerene strukture na abrazijsku otpornost austenitnog
nehrđajućeg čelika**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Effect of anisotropic structure on abrasive wear resistance of austenitic
stainless steel**

Opis zadatka:

Svi čelični poluproizvodi u fazi formiranja prolaze kroz intenzivnu plastičnu deformaciju, što za posljedicu ima vrlo usmjerenu anizotropnu mikrostrukturu. Ovo je osobito izraženo kod poluproizvoda u obliku ploča i limova. Zbog takve mikrostrukture i većina svojstava je različita u različitim smjerovima.

U završnom radu potrebno je ispitati abrazijsku otpornost ploče od austenitnog nehrđajućeg čelika, u tri karakteristična presjeka:

- u smjeru valjanja i okomito na površinu ploče
- okomito na smjer valjanja
- u smjeru valjanja i paralelno s površinom ploče.

Ispitivanje abrazijske otpornosti provesti na uređaju *Taber abrader* s različitim kvalitetama brusnog papira. Na ispitnim uzorcima također je potrebno provesti karakterizaciju mikrostrukture te izmjeriti mikrotvrdoću. Na temelju dobivenih rezultata izvesti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Datum predaje rada:

- 1. rok: 21. veljače 2020.
- 2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
- 3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
- 2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
- 3. rok: 21.9. – 25.9.2020.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. NEHRĐAJUĆI ČELICI	2
2.1. Definicija nehrđajućih čelika	2
2.2. Podjela nehrđajućih čelika	3
2.3. Martenzitni nehrđajući čelici	3
2.4. Feritni nehrđajući čelici	5
2.5. Austenitni nehrđajući čelici	6
2.6. Dupleks nehrđajući čelici.....	9
3. TROŠENJE.....	10
3.1. Abrazija.....	10
3.1.1. Mehanizmi abrazijskog trošenja	11
3.2. Krična veličina abrazivnog zrna	17
4. EKSPERIMENTALNI DIO	19
4.1. Cilj rada.....	19
4.2. Materijal za ispitivanje	19
4.3. Provođenje ispitivanja.....	21
4.3.1. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.....	21
4.3.2. Mjerenje tvrdoće HV0,2	24
4.3.3. Analiza mikrostrukture	25
4.4. Rezultati ispitivanja.....	28
4.5. Analiza rezultata	37
5. ZAKLJUČAK.....	43
LITERATURA.....	44
PRILOZI.....	45

POPIS SLIKA

Slika 1.	Stvaranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeliku [2].....	2
Slika 2.	Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [3].....	4
Slika 3.	Mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrTi12 [4].....	5
Slika 4.	Pseudobinarni dijagram sustava Fe-Cr-Ni za 70% Fe [5].....	7
Slika 5.	Usmjerena struktura čelika oznake X6CrNiTi18-10 [6].....	8
Slika 6.	Rekristalizirana struktura oznake X6CrNiTi18-10 [6].....	8
Slika 7.	Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMoN22-5-3 [7]	9
Slika 8.	Jedinični događaj abrazije [8].....	10
Slika 9.	Trošenje mehanizmom mikrobrazdanja [9]	11
Slika 10.	Trošenje mehanizmom mikrorezanja [9]	12
Slika 11.	Trošenje mehanizmom mikronaprsnuća [9].....	12
Slika 12.	Trošenje mehanizmom mikroumora [9].....	13
Slika 13.	Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [9].....	13
Slika 14.	"Čista" abrazija [9].....	14
Slika 15.	Selektivna abrazija [9].....	15
Slika 16.	"Nulta" abrazija [9].....	16
Slika 17.	Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsko trošenje materijala [10].....	17
Slika 18.	Utjecaj veličine abrazivnoga zrna na trošenje različitih materijala [11]	18
Slika 19.	Čelična ploča iz koje su izrezani uzorci	20
Slika 20.	Rezanje ploče	20
Slika 21.	Ispitni uzorci iz tri karakteristična presjeka	21
Slika 22.	Vaga za mjerenje mase.....	22
Slika 23.	Uređaj za ispitivanje abrazijske otpornosti	23
Slika 24.	Uređaj za mjerenje tvrdoće PMT-3	24
Slika 25.	Ispitni uzorci u polimernoj masi.....	25
Slika 26.	Uređaj za vruće ulijevanje uzoraka	26
Slika 27.	Uređaj za brušenje i poliranje.....	27
Slika 28.	Gubitak mase za sve brusne papire, uzorak 1	29
Slika 29.	Gubitak mase za sve brusne papire, uzorak 2	29
Slika 30.	Gubitak mase za sve brusne papir, uzorak 3	30

Slika 31.	Ukupni gubitak mase za sve korištene brusne papire.....	30
Slika 32.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2.....	31
Slika 33.	Mikrostruktura uzorka 1 snimljena pri povećanju 100×	32
Slika 34.	Mikrostruktura uzorka 1 snimljena pri povećanju 200×	32
Slika 35.	Mikrostruktura uzorka 1 snimljena pri povećanju 500×	33
Slika 36.	Mikrostruktura uzorka 2 snimljena pri povećanju 100×	33
Slika 37.	Mikrostruktura uzorka 2 snimljena pri povećanju 200×	34
Slika 38.	Mikrostruktura uzorka 2 snimljena pri povećanju 500×	34
Slika 39.	Mikrostruktura uzorka 3 snimljena pri povećanju 100×	35
Slika 40.	Mikrostruktura uzorka 3 snimljena pri povećanju 200×	35
Slika 41.	Mikrostruktura uzorka 3 snimljena pri povećanju 500×	36
Slika 42.	Ukupni gubitak mase s označenim vrijednostima za svaki brusni papir.....	37
Slika 43.	Gubitak mase na brusnom papiru P600.....	38
Slika 44.	Gubitak mase na brusnom papiru P500.....	38
Slika 45.	Gubitak mase na brusnom papiru P320.....	39
Slika 46.	Gubitak mase na brusnom papiru P220.....	39
Slika 47.	Gubitak mase na brusnom papiru P120.....	40
Slika 48.	Ovisnost abrazijskog trošenja o veličini abrazivnog zrna za uzorak 1.....	41
Slika 49.	Ovisnost abrazijskog trošenja o veličini abrazivnog zrna za uzorak 2.....	41
Slika 50.	Ovisnost abrazijskog trošenja o veličini abrazivnog zrna za uzorak 3.....	42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav čelika X2CrNiMo17-12-2.....	18
Tablica 2. Kvalitete brusnog papira i srednji promjeri abrazivnog zrna.....	22
Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće HV _{0,2}	30

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
H_a	HV	tvrdoća abraziva
H_1	HV	tvrdoća abradiranog materijala
H_β	HV	tvrdoća tvrde faze abradiranog materijala
d_{kr}	μm	kritična veličina abrazivnoga zrna

SAŽETAK

Cilj ovoga rada bio je utvrditi kako usmjerenost strukture ploče austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2 utječe na abrazijsku otpornost.

U teorijskom dijelu navedene su i opisane vrste nehrđajućih čelika, osnovni mehanizmi trošenja, abrazijsko trošenje i fenomen kritične veličine abrazijskog zrna.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je analiza mikrostrukture, izmjerena je mikrotvrdoća HV0,2 i ispitana je otpornost na abrazijsko trošenje na uređaju Taber abrader pri različitim kvalitetama brusnog papira. Rezultati ispitivanja pokazali su da usmjerenost strukture utječe na mikrotvrdoću i abrazijsku otpornost. Najveća tvrdoća izmjerena je u presjeku okomitom na smjer valjanja, a najmanji kumulativni gubitak mase na svim brusnim papirima izmjeren je na presjeku paralelnom sa smjerom valjanja. Time je potvrđeno da otpornost na abrazijsko trošenje nije uvijek u direktnoj korelaciji s tvrdoćom materijala. Kod svih uzoraka izražen je fenomen kritične veličine abrazivnog zrna ($d_{kr} \approx 50 \mu m$).

Ključne riječi: *austenitni nehrđajući čelik, usmjerenost strukture, abrazijska otpornost, kritična veličina abrazivnoga zrna*

SUMMARY

The purpose of this paper was to determine the effect of anisotropic structure on abrasive wear resistance of X2CrNiMo17-12-2 austenitic stainless steel plate.

The theoretical part of this paper describes various types of stainless steel, basic wear mechanisms, especially abrasive wear and the phenomenon of critical particle size in abrasion wear.

The experimental part consists of microstructure analysis, HV0,2 microhardness measurement, and abrasive wear resistance test conducted on a Taber abrader device with different qualities of abrasive papers. Test results have shown that the anisotropic structure has an observable effect on the microhardness and abrasive wear resistance. The highest hardness value was measured for the cross-section perpendicular to the direction of rolling, whereas the cross-section parallel to the rolling direction had the lowest total mass loss. That confirms the fact that abrasive wear resistance is not always in direct correlation to the material hardness. All samples have exhibited the critical particle size phenomenon in abrasive wear resistance tests ($d_{kr} \approx 50 \mu\text{m}$).

Keywords: *austenitic stainless steel, anisotropic structure, abrasive wear resistance, critical abrasive particle size*

1. UVOD

Korozijski postojani čelici ili nehrđajući čelici metalni su materijali postojani na različite oblike korozije u različitim uvjetima. [1] Osim korozijske postojanosti, nehrđajući čelici često imaju dobra mehanička i toplinska svojstva, što ih čini vrlo konkurentnim materijalom za razne primjene. S obzirom na širinu primjene, nehrđajući čelici proizvode se u raznim oblicima poluproizvoda, pa tako i u obliku limova i ploča. Proizvodnja ovih poluproizvoda uključuje postupke oblikovanja deformiranjem, odnosno plastične deformacije, koja ostavlja određene posljedice na mikrostrukturu materijala. Proces valjanja kojim se proizvode čelične ploče uzrokuje gnječenje kristalnih zrna i samim time usmjerenost mikrostrukture. Zbog takve mikrostrukture većina mehaničkih svojstava različita je u različitim smjerovima. [2] Taj fenomen poznat je pod nazivom anizotropnost.

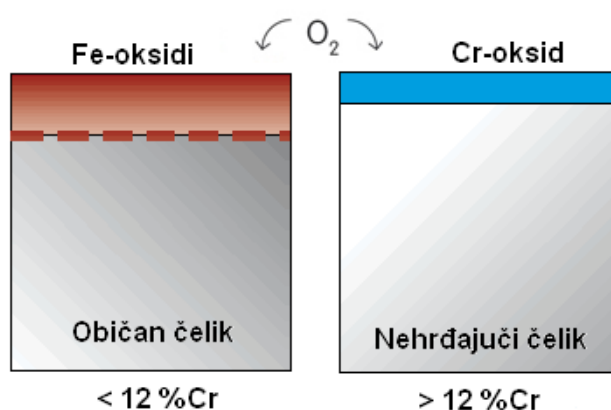
Abrazijska otpornost usko je povezana s tvrdoćom materijala i stoga se očekuje da usmjerenost mikrostrukture utječe i na ovo svojstvo. Obično je abrazijska otpornost veća što je tvrdoća materijala viša. Veličina, oblik i tvrdoća abrazivnog zrna također utječu na intenzitet abrazijskog trošenja. Zbog toga je zanimljivo pratiti ovisnost gubitka mase trošenog materijala o veličini abrazivnog zrna. Kod većine metalnih materijala ta ovisnost ima linearan tijek do određene veličine abrazivnog zrna. Daljnjim povećanjem abrazivnog zrna, ovisnost između gubitka mase i veličine abrazivnog zrna mijenja se na jedan od sljedećih načina: gubitak mase raste, ali u manjoj mjeri, gubitak mase ostaje konstantan neovisno o daljnjem povećanju abrazivnoga zrna ili se gubitak mase smanjuje. Veličina abrazivnoga zrna pri kojoj se događa ova promjena naziva se kritična veličina abrazivnoga zrna.

2. NEHRĐAJUĆI ČELICI

2.1. Definicija nehrđajućih čelika

Nehrđajući čelici ili korozijski postojani čelici su visokolegirani čelici čiji je osnovni legirni element krom. Prvi i osnovni uvjet korozijske postojanosti čelika je da maseni udio kroma u kemijskom sastavu iznosi minimalno 12 %. [1] Podrazumijeva se da krom u čeliku nije sastavni dio karbida ili drugih strukturnih tvorevina, već je u potpunosti otopljen u metalnoj matrici, odnosno u kristalu mješancu. Taj udio kroma omogućuje stvaranje stabilnog sloja kromovih oksida na površini koji onemogućava daljnju oksidaciju. U normalnim uvjetima do stvaranja ovog sloja dolazi spontano, kemijskom reakcijom između kroma u čeliku i kisika iz zraka. Općenito je ovaj sloj vrlo tanak, debljine nekoliko nanometara, ima izvrsnu prionjivost uz osnovni materijal i u nekim medijima je samoobnovljiv. Svojstva zaštitnog sloja variraju ovisno o kemijskom sastavu čelika i vrsti medija kojem je čelik izložen. [2]

Na slici 1. prikazana je razlika u vrsti oksidnih slojeva, koji nastaju pri izlaganju čelika atmosferi, između običnog (s manje od 12 % Cr u sastavu) i nehrđajućeg čelika (s više od 12 % Cr). Željezni oksidi koji nastaju na običnom čeliku nisu tako tanki kao kromov oksid, ne prijanjaju dobro uz površinu čelika i u konačnici neće dovesti do zaustavljanja korozije, nego će materijal nastaviti korodirati.



Slika 1. Stvaranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeliku [2]

Drugi uvjet korozijske postojanosti je monofazna mikrostruktura čelika. Kod većine nehrđajućih čelika ovaj je uvjet ispunjen, ali postoje i korozijski postojani čelici višefazne mikrostrukture. Prisutnošću više faza povećava se opasnost od nastanka galvanskih članaka unutar samog čelika koji u vodljivom mediju mogu uzrokovati korozijsko trošenje materijala. Kod nehrđajućih čelika s više faza nužno je da nema velike razlike potencijala između različitih faza.[2]

2.2. Podjela nehrđajućih čelika

Korozijski postojani čelici najčešće se klasificiraju prema mikrostrukturi. Prema tome, postoje martenzitni, feritni i austenitni korozijski postojani čelici. Također postoji skupina dupleks čelika čija je struktura sastavljena od približno 50 % austenita i 50 % ferita. Postoji i posebna skupina precipitacijski očvrnutih nehrđajućih čelika (eng. Precipitation Hardenable – PH).

Klasificiranje korozijski postojanih čelika prema kemijskom sastavu rijetko se koristi. Skupine u koje se nehrđajući čelici svrstavaju na temelju kemijskog sastava su sljedeće:

- Cr – čelici
- Cr-Ni – čelici
- Cr-Ni-Mo – čelici
- Cr-Mn – čelici.

Vrijedi spomenuti da su s vremenom razvijene poboljšane verzije osnovnih vrsta nehrđajućih čelika opisanih u nastavku. Te vrste čelika obično imaju predmetak super- ili hiper- i imaju dodatno poboljšana mehanička i korozijska svojstva koja su postignuta povećanjem čistoće te većim i preciznijim legiranjem.

2.3. Martenzitni nehrđajući čelici

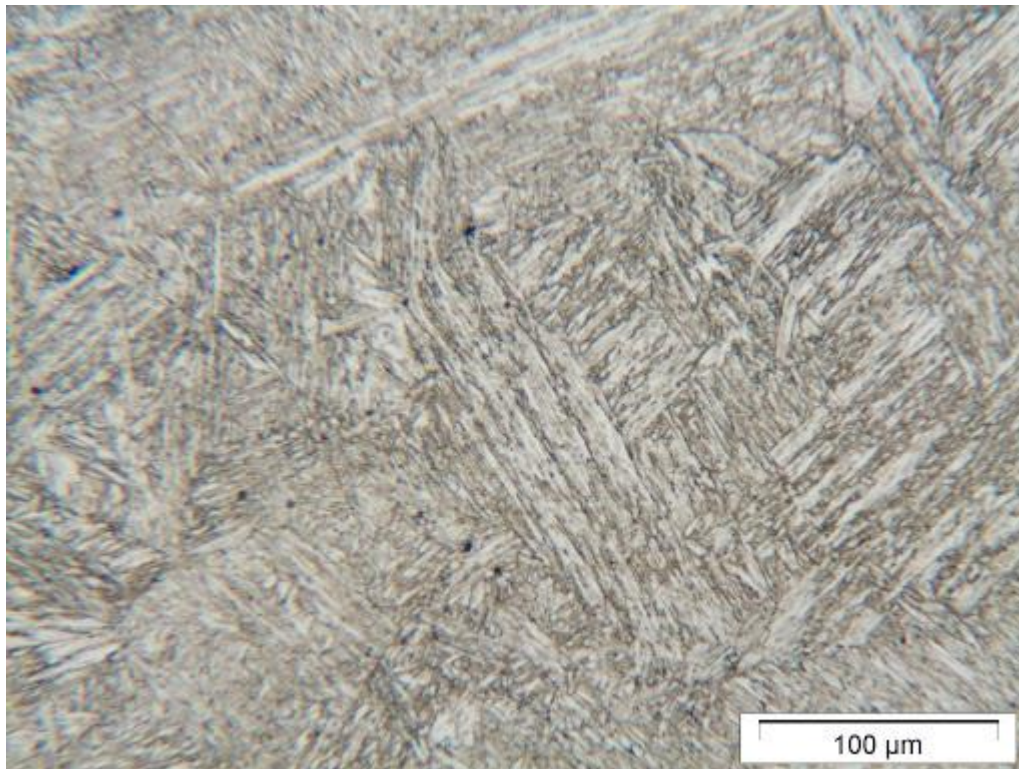
Martenzitni nehrđajući čelici su legure čija su tri najzastupljenija elementa željezo, krom i ugljik. Maseni udio kroma je najčešće između 12 i 18 %, a ugljika od 0,15 do 1,2 %. Martenzitna mikrostruktura postiže se samozakaljivanjem na zraku zbog visokog udjela legiranih elemenata. Ovi čelici imaju viši udio ugljika od ostalih vrsta nehrđajućih čelika kako bi se postigla viša tvrdoća i čvrstoća. Konstrukcijski martenzitni nehrđajući čelici imaju niži

sadržaj ugljika zbog postizanja više žilavosti i bolje korozijske postojanosti, a čelici za alatnu primjenu imaju viši udio ugljika, zbog postizanja više tvrdoće. U mikrostrukturi ovih čelika smiju biti prisutni karbidi jer je kod tih čelika najvažnija visoka tvrdoća i otpornost na abrazijsko trošenje, a korozijska postojanost je u drugom planu. Mehanička i druga svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika postižu se variranjem parametara toplinske obrade.

Martenzitni nehrđajući čelici su feromagnetični. Imaju slabiju korozijsku postojanost nego drugi nehrđajući čelici, ali su općenito jeftiniji od ostalih nehrđajućih čelika zbog nižeg sadržaja kroma i ostalih legiranih elemenata.

Primjenjuju se u blažim uvjetima glede radne temperature i svojstava medija, ali zadovoljavaju zahtjeve na visoku čvrstoću i tvrdoću. Najčešće se primjenjuju u energetske i procesnoj industriji te u medicinske industriji. [2]

Na slici 2. prikazana je tipična mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika nakon kaljenja i popuštanja. U mikrostrukturi ovog čelika prisutan je samo martenzit. Osim martenzita, u mikrostrukturi martenzitnih čelika može biti i određena količina karbida, zaostalog austenita, pa čak i ferita. Zaostali austenit i ferit negativno utječu na svojstva martenzitnog čelika.



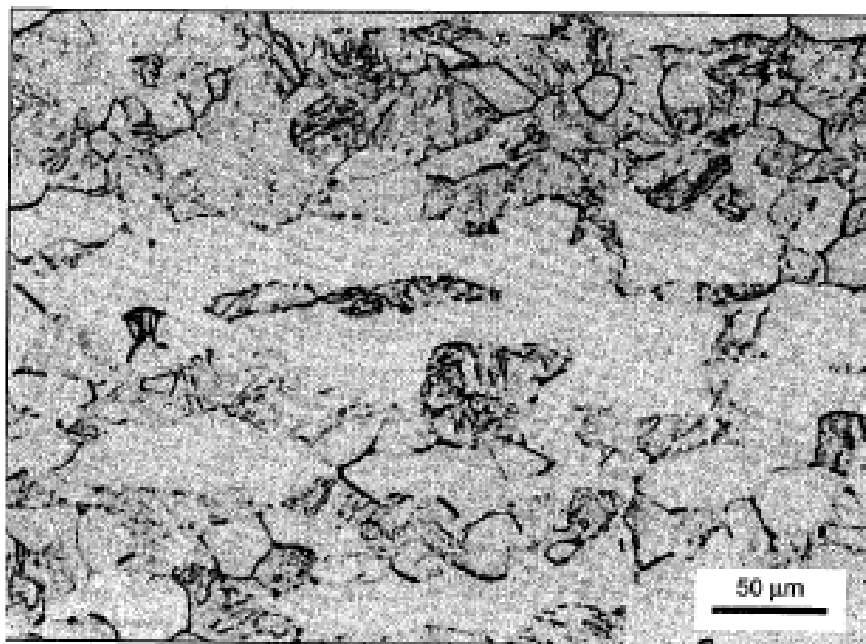
Slika 2. Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika [3]

2.4. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici imaju relativno nizak udio ugljika prvenstveno zbog održavanja feritne mikrostrukture ali i zbog korozijske postojanosti. Osim udjelom ugljika, korozijska postojanost uvelike je određena i sadržajem kroma. Vrste s višim sadržajem kroma mogu se primijeniti u vrlo agresivnim korozijskim uvjetima. Općenito ove čelike karakterizira dobra otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju. Primjenu im ograničavaju relativno slaba mehanička svojstva i loša zavarljivost. Također je problematično što se teško obrađuju i što su relativno skupi, ali njihova je prednost što u nekim medijima imaju bolju korozijsku postojanost od martenzitnih i austenitnih nehrđajućih čelika. Feritni nehrđajući čelici su feromagnetični.

Primjenjuju se pretežno pri temperaturama do 400 °C zbog nastanka krhkih faza pri višim temperaturama. Primjenjuju se u automobilske industriji te kemijske i prehrambene industriji. [2]

Mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrTi12 prikazana je na slici 3.



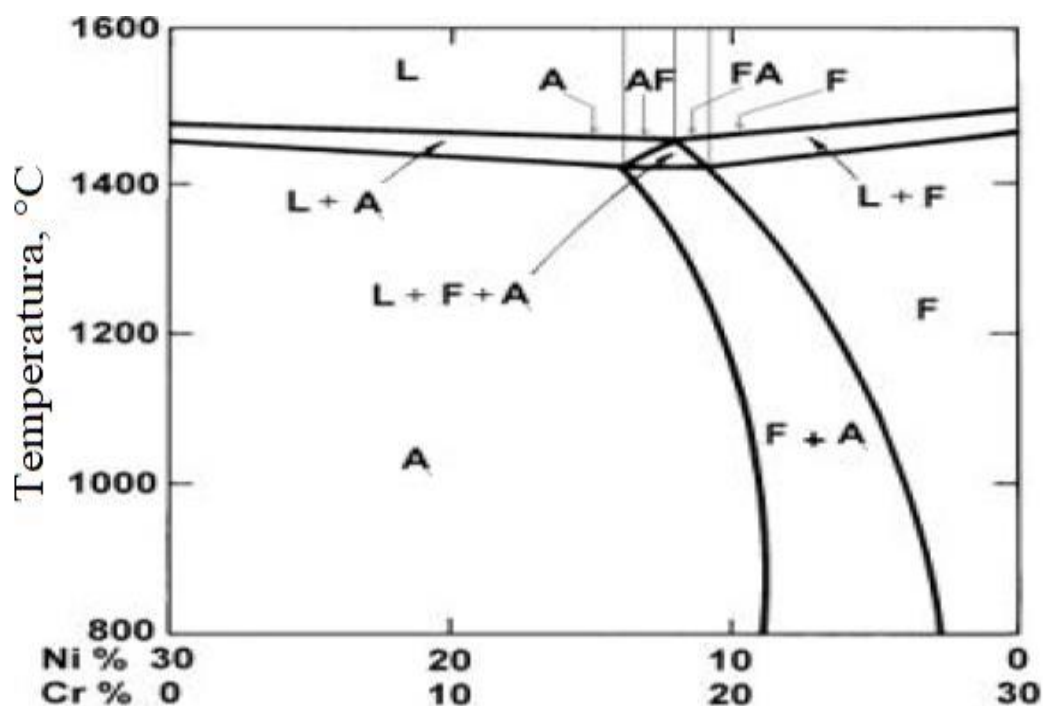
Slika 3. Mikrostruktura feritnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrTi12 [4]

2.5. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici imaju najveći udio u ukupnoj proizvodnji nehrđajućih čelika, a i po broju vrsta su najbrojniji. Maseni udio ugljika u ovim čelicima je vrlo nizak (do 0,1 %), a od legirnih elemenata sadrže najviše kroma i nikla. Ne mogu se toplinski očvrsnuti, ali se zato mogu značajno očvrsnuti hladnom deformacijom. Korozijski su postojani u mnogim medijima. Ističu se u odnosu na ostale vrste nehrđajućih čelika širokim rasponom radne temperature. Neke vrste ovih čelika mogu se primijeniti do 760 °C. Zbog dobre žilavosti na sniženim i niskim temperaturama austenitni čelici mogu se primjenjivati do iznimno niskih temperatura. Također ih odlikuje osobito dobra oblikovljivost i zavarljivost, što je za konstrukcijske čelike od iznimne važnosti.

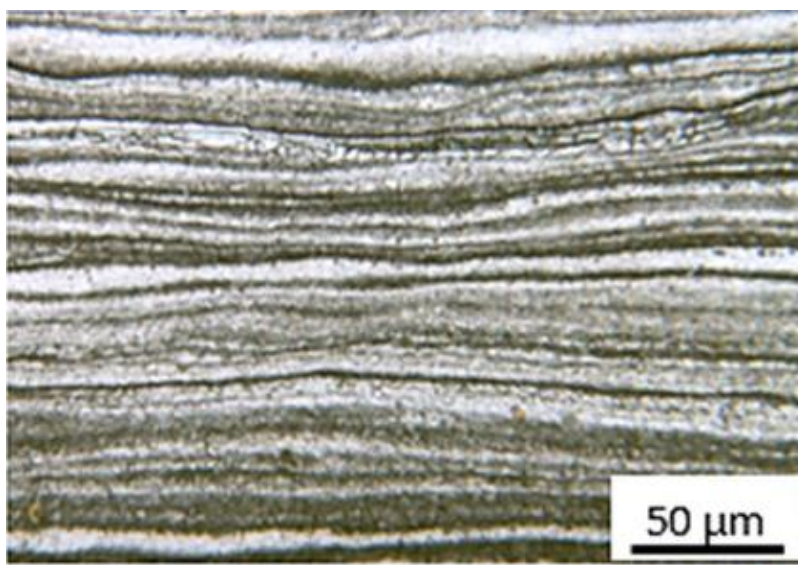
Kao i kod ostalih nehrđajućih čelika, kod legiranja je važna ravnoteža alfagenih i gamagenih elemenata zbog postizanja željene mikrostrukture. Austenitnu mikrostrukturu promiču gamageni elementi poput ugljika, nikla, dušika, mangana, bakra ili kobalta. Nijedan element pojedinačno ne može dovoljno utjecati na promicanje austenita i stoga se uvijek dodaje više elemenata. Ugljik se dodaje u što manjoj količini zbog opasnosti od senzibilizacije mikrostrukture (izlučivanje kromovih karbida po granicama zrna i osiromašivanje područja uz granice zrna na krom) koja je preduvjet za vrlo opasnu interkristalnu koroziju. Iz istog razloga dodaju se legirni elementi koji su jaki karbidotvorci (Ti, Nb) te stabiliziraju mikrostrukturu u pogledu rizika od interkristalne korozije.

Mikrostruktura ovog čelika na sobnoj temperaturi bi trebala biti potpuno austenitna, no nije rijetka prisutnost malog udjela feritne faze (visokotemperaturni – delta ferit). Trakaste nakupine delta ferita mogu se vidjeti na optičkom mikroskopu te se na njima mogu vidjeti posljedice plastične deformacije tijekom proizvodnje. Delta ferit u određenim uvjetima može smanjiti duktilnost i žilavost austenitnih nehrđajućih čelika, no može i pozitivno djelovati na svojstva zavarenog spoja. Formiranje mikrostrukture kod austenitnih nehrđajućih čelika moguće je pratiti u ravnotežnom pseudobinarnom Fe-Cr-Ni dijagramu sa 70 % Fe, koji je prikazan na slici 4. Formiranje austenitne ili feritne mikrostrukture ovisi o sadržaju kroma i nikla, ali i o brzini hlađenja. [2]



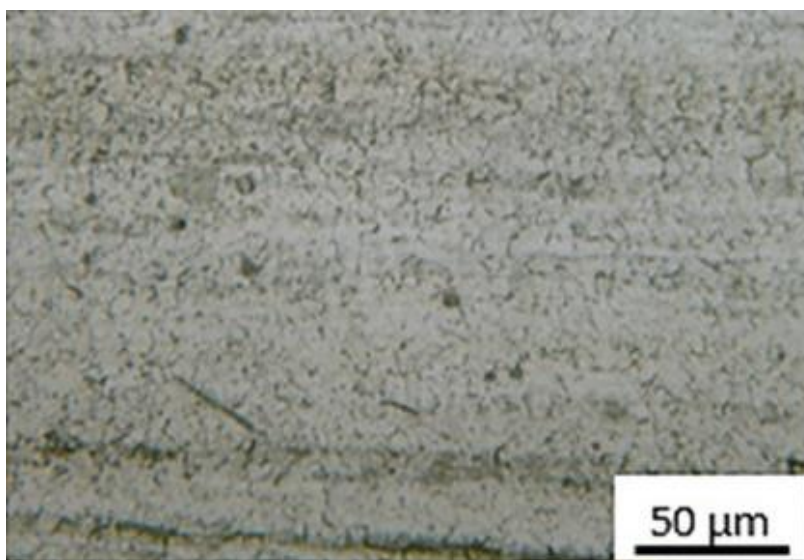
Slika 4. Pseudobinarni dijagram sustava Fe-Cr-Ni za 70 % Fe [5]

Austenitni nehrđajući čelici imaju prilično niske vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, usporedive s vrijednostima ovih svojstava kod niskougličnih čelika. Kao što je ranije spomenuto, ovi čelici nisu toplinski očvrstivi jer nemaju alotropskih modifikacija koje bi se praktično mogle iskoristiti kao način očvrstnuća. Zato se ovi čelici podvrgavaju postupcima hladne deformacije, poput izvlačenja, savijanja, valjanja itd. Kod vrlo visokog stupnja ugnječenja moguće je stvaranje deformacijskog martenzita što se nastoji izbjeći. [2] Postupci hladne deformacije povećavaju vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, no ostavljaju i neželjene posljedice na mikrostrukturu materijala. Ugnječenje kristalnih zrna izaziva izrazitu usmjerenost mehaničkih svojstava, odnosno anizotropnost. Kristalna zrna mogu se vratiti u prvobitni oblik rekristalizacijskim žarenjem, ali svojstva ostaju do određene mjere ipak usmjerena. Parametri rekristalizacijskog žarenja, vrijeme i temperatura, moraju biti pažljivo odabrani kako bi se postigli željeni rezultati. Na slici 5. prikazana je mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X6CrNiTi18-10 rekristalizacijski žarenog na 900 °C u trajanju od 10 minuta. Nakon ovog postupka mikrostruktura je i dalje izrazito usmjerena i nije došlo do rekristalizacije zrna.



Slika 5. Usmjerena struktura čelika oznake X6CrNiTi18-10 [6]

Na slici 6. prikazana je mikrostruktura istog čelika žarenog na istoj temperaturi, ali u trajanju od 25 minuta. Na fotografiji se može primijetiti da je većina kristalnih zrna rekristalizirano.



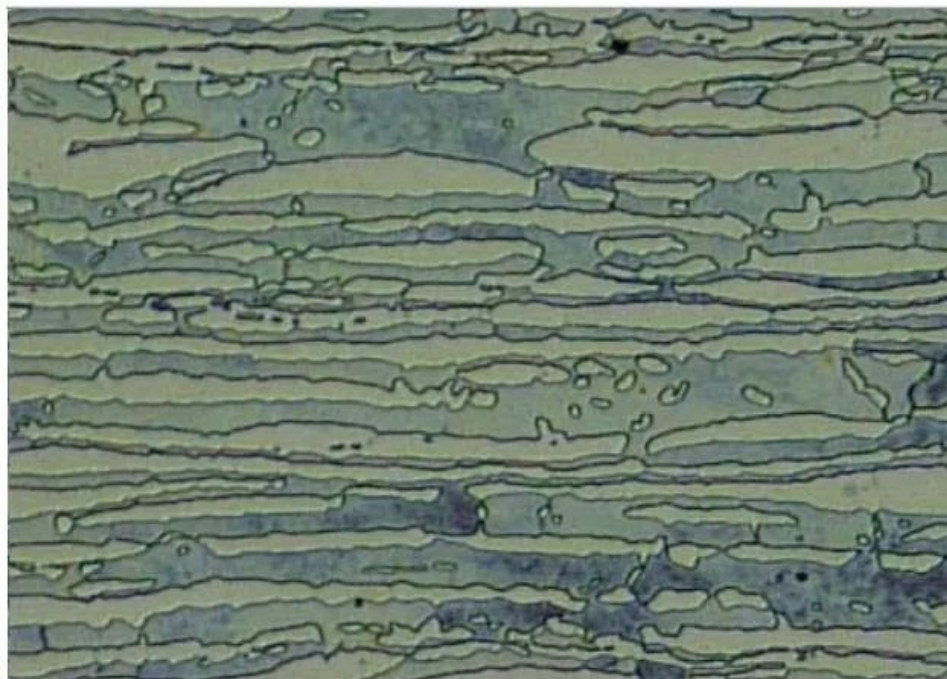
Slika 6. Rekristalizirana struktura oznake X6CrNiTi18-10 [6]

2.6. Dupleks nehrđajući čelici

Dupleks nehrđajući čelici imaju mikrostrukturu koja se sastoji od ferita i austenita u približno jednakim volumnim udjelima (50:50). Ovu skupinu čelika karakterizira iznimno dobra kombinacija visoke čvrstoće, dobre žilavosti i duktilnosti te dobre korozijske postojanosti. Legirni elementi specifični za ovu vrstu čelika su krom i nikal, a posebno i dušik. Uvođenje dušika kao legirnog elementa se povijesno pokazalo kao važan korak u razvoju dupleks čelika. Dušik pozitivno utječe na korozijsku postojanost i na svojstva zavarenog spoja. Općenito nikal i dušik kao gamageni elementi promiču austenitnu strukturu, što je osobito važno kod zavarivanja. Dupleks nehrđajući čelici legiraju se još i molibdenom, bakrom, volframom i silicijem zbog poboljšanja otpornosti na određene oblike korozije, no potreban je oprez zbog utjecaja svakog elementa na mikrostrukturu, odnosno na omjer ferita i austenita.

U nekim primjerima primjenama gdje je potrebna visoka otpornost na rupičastu i napetosnu koroziju, dupleks nehrđajući čelici su superiorni austenitnim nehrđajućim čelicima, iako imaju bitno višu cijenu. Često se primjenjuju za izradu dijelova plinovoda i naftovoda, a u blažim korozijskim uvjetima mogu dobro zamijeniti skuplje niklove legure. [2]

Na slici 7. prikazana je mikrostruktura dupleks čelika oznake X2CrNiMoN22-5-3.



Slika 7. Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMoN22-5-3 [7]

3. TROŠENJE

Trošenje se definira kao postupni gubitak materijala s površine čvrstoga tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim čvrstim tijelom, fluidom, i/ili česticama. [6]

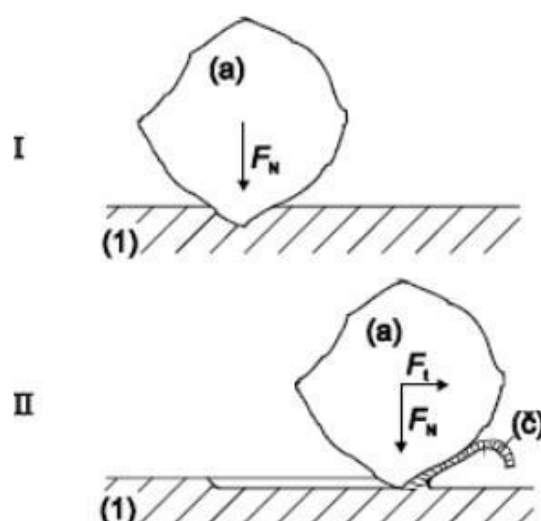
Općenito razlikujemo četiri osnovna mehanizma trošenja:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija

U tribologiji se za opisivanje mehanizama trošenja koristi pojam jediničnog događaja. Jedinični događaj podrazumijeva tijek zbivanja koji dovodi do odvajanja čestice trošenja s površine koja se troši.

3.1. Abrazija

Abrazija je mehanizam trošenja u kojem tvrde čestice ili izbočine tvrdog materijala istiskuju materijal drugog tijela. Ovaj mehanizam može se opisati kao mikrorezanje abrazivnom česticom nedefinirane geometrije oštrice, kroz dvije faze jediničnog događaja, kako je prikazano na slici 5.



Slika 8. Jedinični događaj abrazije [8]

Jedinični događaj abrazije promatramo kroz dvije faze:

I faza – prodiranje abrazivne čestice u površinu abradiranog materijala (1) pod utjecajem normalne komponente sile F_N

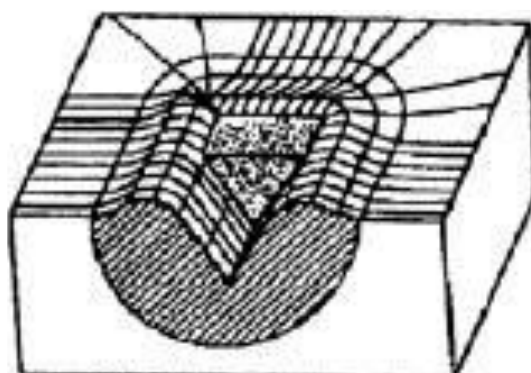
II faza – istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente sile F_N

3.1.1. Mehanizmi abrazijskog trošenja

Mehanizam abrazijskog trošenja najčešće se proučava s tri različita gledišta:

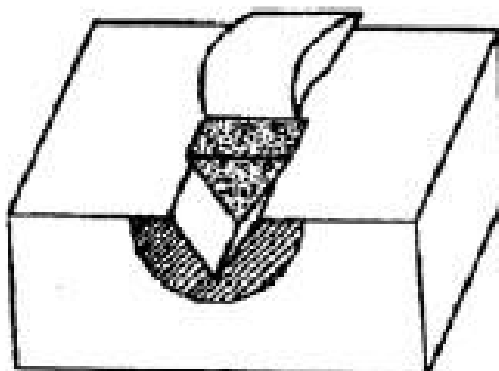
1) ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine postoje sljedeći mikromehanizmi:

a) mikrobrazdanje – prijelazom abrazivne čestice preko površine materijala dolazi do plastične deformacije i stvaranja brazde i bočnih nadvišenja u materijalu. U idealnom slučaju nema produkata trošenja, a u realnom slučaju je gubitak materijala proporcionalan volumenu brazde. Produkti trošenja su rubovi brazde koji se odvoje od površine. Idealan slučaj mikrobrazdanja shematski je prikazan na slici 9.



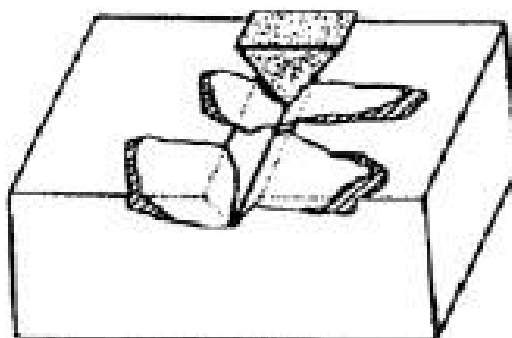
Slika 9. Trošenje mehanizmom mikrobrazdanja [9]

b) mikrorezanje – prijelazom abrazivne čestice preko površine materijala doći će do formiranja zareza, a gubitak materijala je pritom jednak volumenu nastalog zareza. Ovaj proces shematski je prikazan na slici 10.



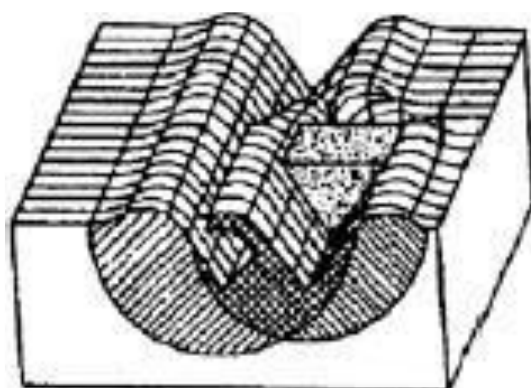
Slika 10. Trošenje mehanizmom mikrorezanja [9]

c) mikronaprsnuća – prijelazom abrazivne čestice preko površine materijala dolazi do nastanka i širenja mikropukotina što rezultira odnošenjem većih dijelova materijala. Ovaj mehanizam karakterističan je za krhke površine, a shematski je prikazan na slici 11.



Slika 11. Trošenje mehanizmom mikronaprsnuća [9]

d) mikroumor – trošenje materijala pod utjecajem izmjeničnog opterećenja. U materijalu nastaju deformacije koje u konačnici dovode do nastanka mikropukotina. Mikropukotine se šire što na kraju dovodi do odvajanja materijala na trošenoj površini. Mehanizam mikroumora shematski je prikazan na slici 12.

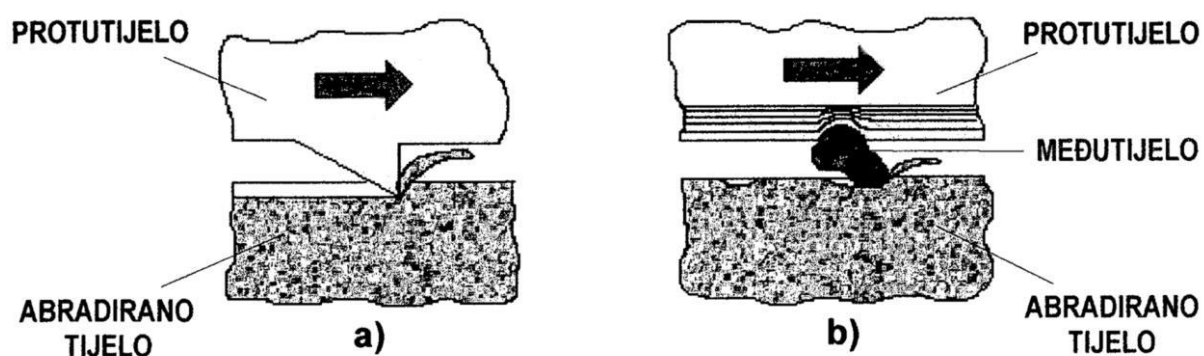


Slika 12. Trošenje mehanizmom mikroumora [9]

2) ovisno o strukturi tribosustava u kome se zbiva abrazija (broj tijela i njihov međusobni odnos u tribosustavu) pojavljuju se dva oblika abrazije, koji su prikazani na slici 10.

a) abrazija pri dodiru dvaju tijela – gdje tribosustav čine dva funkcionalna dijela od kojih je jedno abrazivno tijelo (protutijelo), a drugo je abradirano tijelo

b) abrazija pri dodiru triju tijela – gdje tribosustav čine dva funkcionalna dijela (protutijelo i abradirano tijelo) i međutijelo, odnosno čestica koje se slobodno gibaju između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.

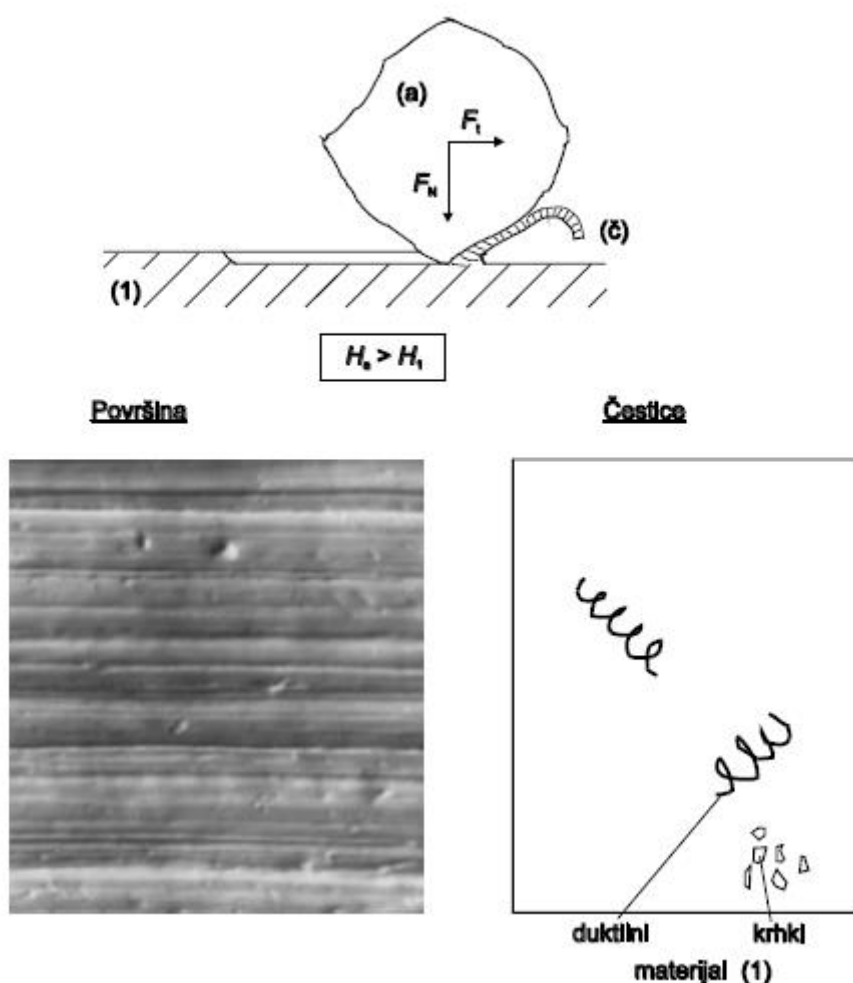


Slika 13. Abrazija pri dodiru dvaju tijela (a) i triju tijela (b) [9]

3) ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i abradiranog materijala postoje tri moguća slučaja:

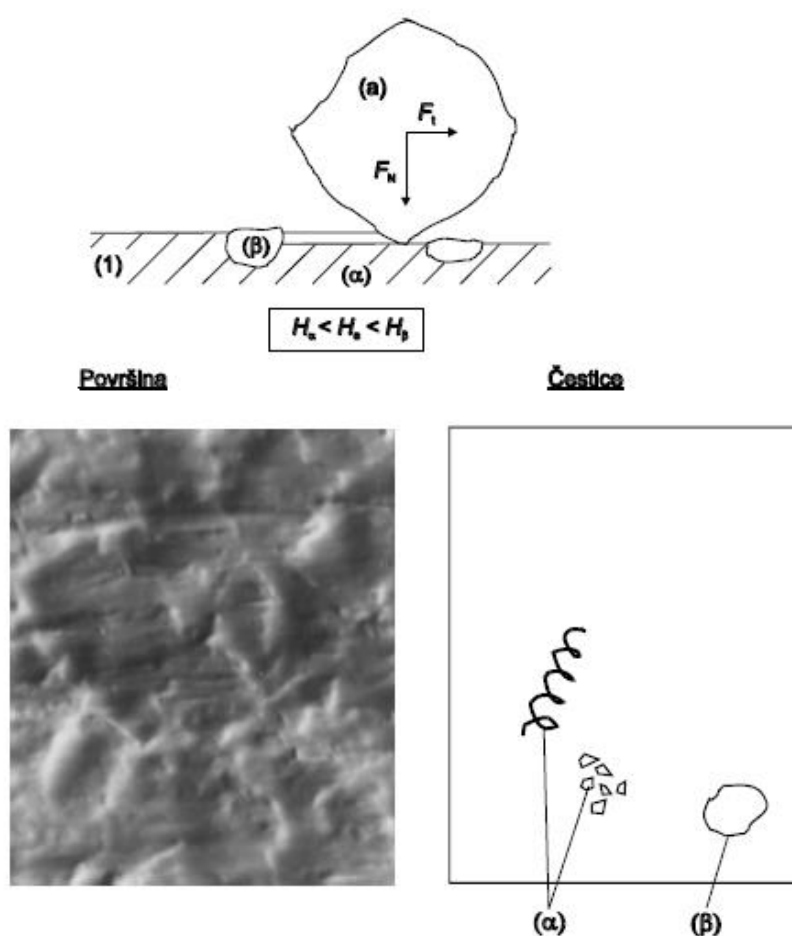
a) "čista" abrazija – pojavljuje se kada je tvrdoća abrazivnog tijela H_a veća od tvrdoće trošene površine H_1 . Abradirana površina je izbrazdana, a oblik čestica trošenja ovisi o svojstvima trošenog materijala. Kod duktilnih materijala čestice trošenja su u obliku spiralnih strugotina, a kod krhkih materijala su u obliku lomljene strugotine ili nepravilnog oblika.

Opisani mehanizam, abradirana površina i čestice trošenja prikazani su na slici 14.



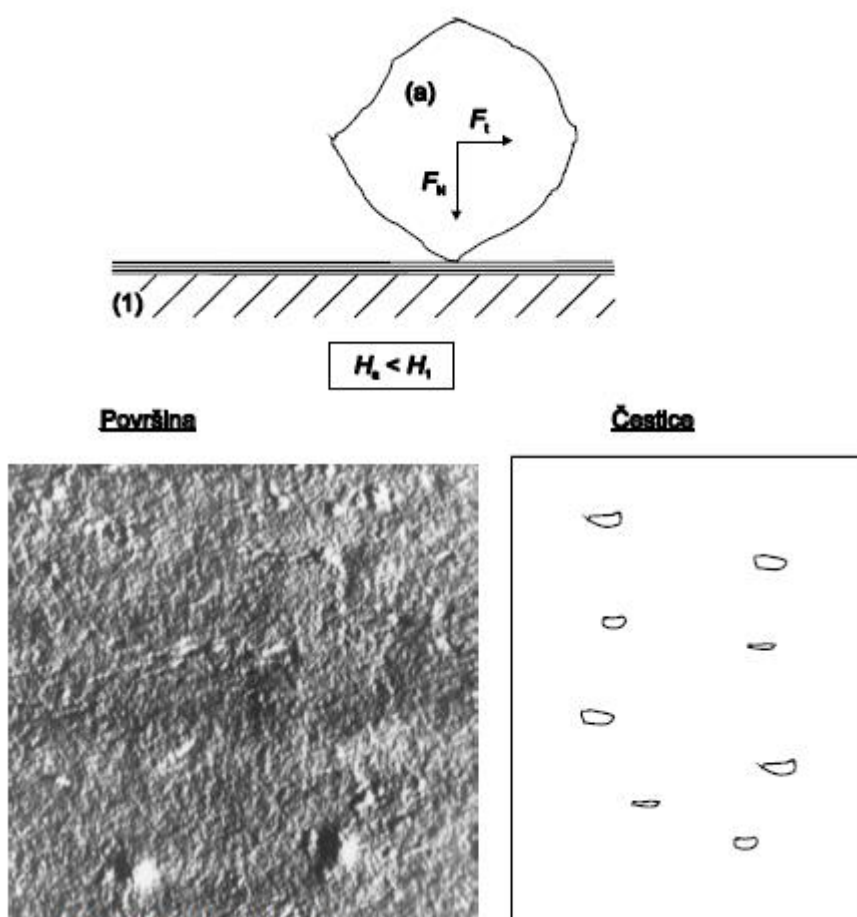
Slika 14. "Čista" abrazija [9]

b) selektivna abrazija – pojavljuje se kod višefaznih materijala koji sadrže fazu čija je tvrdoća H_β veća od tvrdoće abrazivnog tijela H_a . U tom slučaju abrazivno tijelo vrši abraziju samo nad mekšom fazom površine. Abraziv ostavlja brazde na područjima mekše faze, s prekidima na mjestima na površini gdje se nalazi tvrđa faza, a povremeno je moguće otkidanje zrna tvrde faze s površine. Shematski prikaz mehanizma selektivne abrazije, fotografija trošene površine te čestice trošenja prikazani su na slici 15.



Slika 15. Selektivna abrazija [9]

c) "nulta" abrazija – pojavljuje se kad je tvrdoća čitave površine H_1 veća od tvrdoće abraziva H_a . Abraziv ne može ozbiljnije utjecati na površinu. Čestice trošenja se eventualno mogu pojaviti u obliku ljuskica koje potječu od vanjskog graničnog sloja površine. Nulta abrazija karakteristična je za materijale modificiranih ili prevučenih površina slojevima visoke tvrdoće. Na slici 16. shematski je prikazan mehanizam nulte abrazije, fotografija površine i čestice trošenja.



Slika 16. "Nulta" abrazija [9]

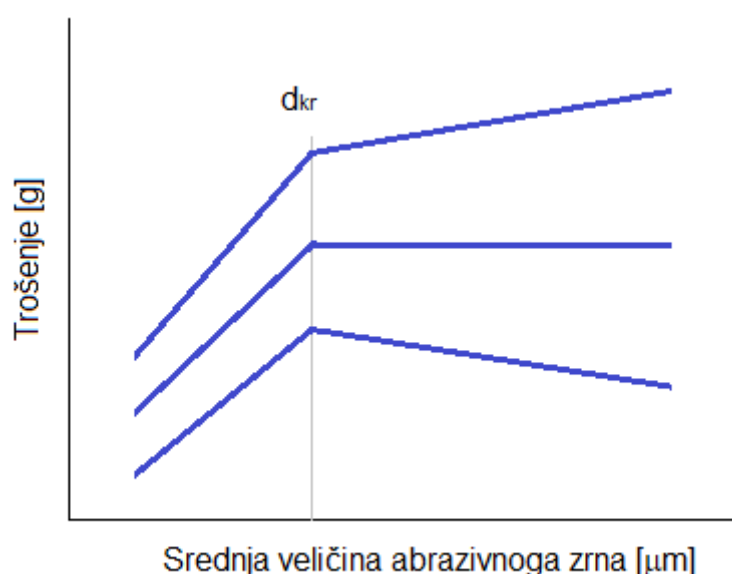
3.2. Kritična veličina abrazivnog zrna

Kritična veličina abrazivnog zrna je fenomen koji se pojavljuje kod abrazijskog trošenja, a zanimljiv je i u slučaju erozijskog trošenja te pri postupcima obrade odvajanjem čestica.

Pokazalo se da je ovisnost gubitka mase o veličini abrazivnog zrna linearna sve dok veličina abrazivnog zrna ne dostigne kritičnu vrijednost d_{kr} . Povećanjem abrazivnog zrna preko kritične vrijednosti moguće su sljedeće pojave:

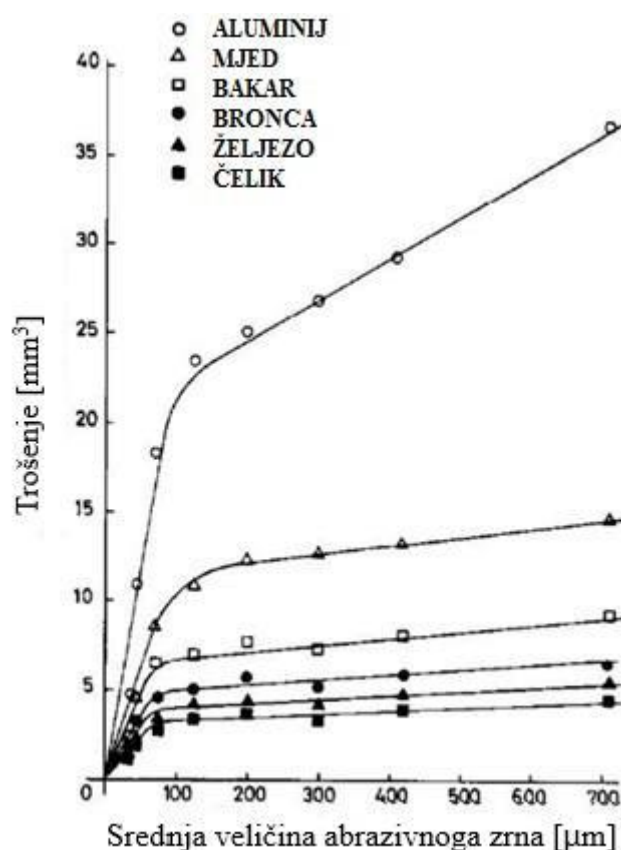
- gubitak mase nastavlja rasti ali manjom brzinom (slučaj 1)
- gubitak mase ostaje konstantan (slučaj 2)
- gubitak mase se smanjuje (slučaj 3).

Na slici 17. shematski su prikazana sva tri slučaja.



Slika 17. Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsko trošenje materijala [10]

Dijagram na slici 18. prikazuje rezultate ispitivanja Nathana i Jonesa iz 1966. godine [11] na različitim materijalima. Ispitani tribosustav bio je izveden kao abrazijsko trošenje u dodiru dvaju tijela. Kao abrazivne čestice korištene su čestice silicijevog karbida, koji se često koristi kao materijal za abrazivna zrna brusnih papira. Kod svih ispitivanih materijala izražen je fenomen kritične veličine abrazijskog zrna i to kod veličina abrazivnog zrna između 70 i 150 μm.



Slika 18. Utjecaj veličine abrazivnoga zrna na trošenje različitih materijala [11]

Ovaj fenomen još nije u potpunosti objašnjen i ne postoji opći konsenzus oko samo jedne hipoteze. Za slučaj smanjenja intenziteta trošenja pri povećanju veličine abrazivnog zrna preko kritične veličine Coronado i Sinatora nude objašnjenje temeljeno na mikromehanizmu abrazijskog trošenja. U njihovom radu tvrdi se da manja abrazivna zrna imaju oštrije bridove te da troše materijal mehanizmom mikrorezanja. Abrazivna zrna s povećanjem veličine postaju zaobljenija te dominantan mehanizam abrazijskog trošenja postaje mikrobrazdanje. Time se intenzitet trošenja smanjuje jer se materijal više plastično deformira nego što se mehanički odvaja od površine. [12]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Cilj rada

Cilj ovog rada je utvrditi kako usmjerenost strukture, kao posljedica plastične deformacije pri proizvodnji, utječe na abrazijsku otpornost austenitnog nehrđajućeg čelika. Također je potrebno odrediti kako veličina abrazivnog zrna utječe na intenzitet abrazijskog trošenja.

4.2. Materijal za ispitivanje

Uzorci za ispitivanje izrađeni su od austenitnog nehrđajućeg čelika standardne oznake X2CrNiMo17-12-2 (1.4404 ili po američkom standardu AISI 316L). Kemijski sastav, zajamčen od strane dobavljača, prikazan u tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav čelika X2CrNiMo17-12-2

Kemijski element	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	P	S	Fe
Maseni udio, %	0,02	16,85	10,03	2,05	1,77	0,24	0,059	0,042	0,003	ostatak

Uzorci za ispitivanja su izrezani iz ploče debljine 15 mm koja je prikazana na slici 19. Prvo je označen dio ploče koji je izrezan u Laboratoriju za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, što je prikazano na slici 20. Zatim su u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu iz tog komada izrezani uzorci za ispitivanje, a prikazani su na slici 21. Svi uzorci imali su istu površinu poprečnog presjeka – $5 \times 5 \text{ mm}^2$. Uzorci su izrezani tako da ispitivane površine triju različitih vrsta uzoraka predstavljaju tri karakteristična presjeka čelične ploče:

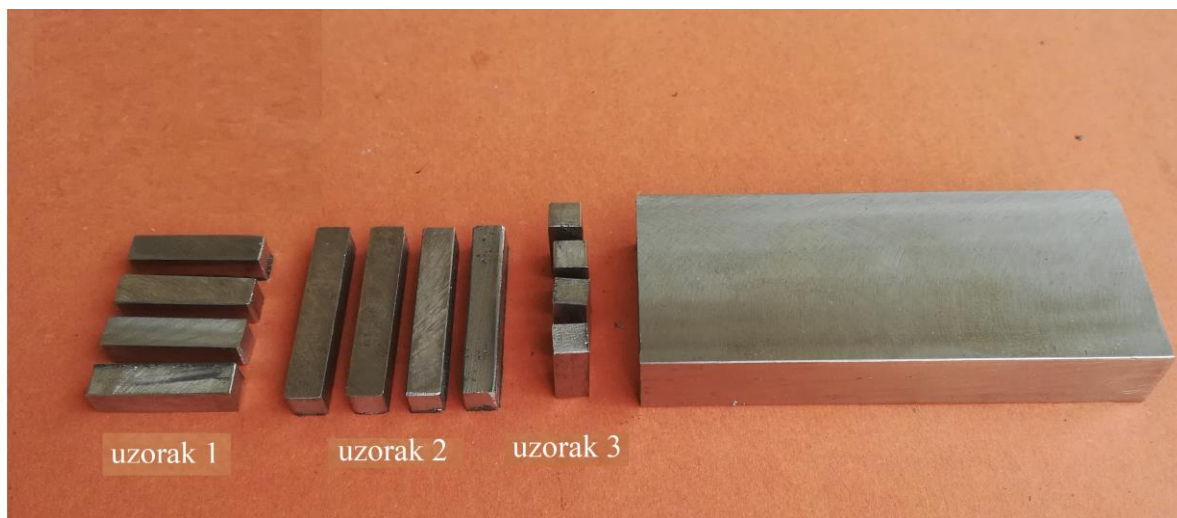
- **uzorak 1** – u smjeru valjanja i okomito na površinu ploče
- **uzorak 2** – okomito na smjer valjanja
- **uzorak 3** – paralelno s površinom ploče.



Slika 19. Čelična ploča iz koje su izrezani uzorci



Slika 20. Rezanje ploče



Slika 21. Ispitni uzorci iz tri karakteristična presjeka

4.3. Provođenje ispitivanja

Na pripremljenim uzorcima provedena su sljedeća ispitivanja:

- otpornost na abrazijsko trošenje
- mjerenje mikrotvrdoće HV0,2
- analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu.

4.3.1. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitni uzorci su nakon strojne obrade odvajanjem čestica ručno brušeni pomoću brusnih papira zbog postizanja kvalitetnije površine prikladne za provođenje ispitivanja.

Uzorcima je izmjerena početna masa na uređaju OHAUS Analytical Plus prikazanom na slici 22.



Slika 22. Vaga za mjerenje mase

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je na uređaju *Taber abrader* u Laboratoriju za tribologiju, u Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uređaj s ispitnim uzorkom i abrazivnim papirom prikazan je na slici 23. Ispitni uzorak postavljen je u nosač, stegnut vijkom te oslonjen na površinu abrazivnog papira. Abrazivni papir čvrsto je spojen s rotirajućim diskom i prati rotaciju uređaja. Promjer diska uređaja iznosi 125 mm, njegova brzina vrtnje je 1 o/s, a obodna brzina je 0,251 m/s. Pri ispitivanju uzorci su pritisnuti na brusni papir silom od 4,91 N.



Slika 23. Uredaj za ispitivanje abrazijske otpornosti

Ispitivanje abrazijskog trošenja provedeno je na papirima različite granulacije, redoslijedom od finijih prema grubljima. Materijal abrazivnih čestica brusnih papira je silicijev karbid – SiO_2 .

Oznake kvalitete brusnih papira i srednje vrijednosti promjera abrazivnih čestica prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Kvalitete brusnog papira i srednji promjeri abrazivnog zrna

Kvaliteta brusnoga papira (ISO/FEPA)	Srednji promjer abrazivnoga zrna [μm]
P600	25,8
P500	30,2
P320	46,2
P220	68
P120	125

Ispitivan je po jedan uzorak iz svakog karakterističnog presjeka. Za svaku kvalitetu brusnog papira provedena su po tri ciklusa trošenja od 100 okretaja za svaki uzorak. Prije i nakon svakog trošenja, uzorcima je izmjerena masa kako bi se mogao izračunati gubitak mase u svakom ciklusu trošenja.

4.3.2. Mjerenje tvrdoće HV0,2

Abrazijska otpornost i tvrdoća materijala su usko povezana svojstva, ali nisu potpuno jednoznačna. Iz tog razloga provedeno je mjerenje tvrdoće koje bi trebalo, uz rezultate ispitivanja abrazijskog trošenja, pružiti bolji uvid u povezanost ovih svojstava.

Mjerenje tvrdoće provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na uređaju za mjerenje mikrotvrdoće PMT-3, metodom po Vickersu. Izmjerene su vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 (opterećenje utegom mase 200 g).

Provedena su tri uzastopna mjerenja mikrotvrdoće na svakom karakterističnog presjeka te je izračunata srednja vrijednost mikrotvrdoće.

Uređaj za mjerenje tvrdoće prikazan je na slici 24.

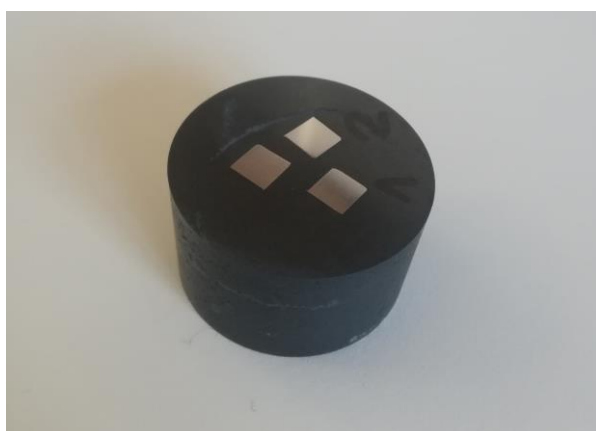


Slika 24. Uređaj za mjerenje tvrdoće PMT-3

4.3.3. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju, u Zavodu za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na ispitnim uzorcima provedena je analiza mikrostrukture u poliranom i nagriženom stanju.

Uzorci su prvo zaliveni u vodljivu polimernu masu kako bi bili pogodni za daljnju metalografsku pripremu. Metalografski uzorak prikazan je na slici 25.



Slika 25. Ispitni uzorci u polimernoj masi

Postupak vrućeg ulijevanja u polimernu masu proveden je na uređaju prikazanom na slici 26. Parametri pri zalijevanju uzorka bili su sljedeći:

- temperatura: 143°C
- tlak: 2 bar
- vrijeme 'pečenja': 15 min
- nakon uklanjanja grijača, uzorak se hladi u uređaju još 30 min.



Slika 26. Uređaj za vruće ulijevanje uzoraka

Nakon ulijevanja uzoraka u polimernu masu, uzorci su brušeni i polirani. Oba postupka provedena su na uređaju za brušenje i poliranje prikazanom na slici 27.

Brušenje je provedeno pri brzini od 300 o/min uz hlađenje vodom. Korištene su sljedeće kvalitete brusnih papira: P120, P320, P600, P1200, P2400 i P4000.

Poliranje je provedeno pri brzini od 150 o/min uz korištenje lubrikanta. Korištena je dijamantna pasta srednje veličine abrazivnog zrna 3 μm , a završno poliranje obavljeno je abrazivnim česticama veličine 0,04 μm .



Slika 27. Uređaj za brušenje i poliranje

Površina poliranih uzoraka analizirana je na optičkom mikroskopu OLYMPUS GX 51 pri različitim povećanjima ($50\times$, $100\times$, $200\times$, $500\times$). U poliranom stanju nisu uočene nikakve nepravilnosti na površini analiziranih uzoraka.

Nakon toga, površina uzoraka je nagrižena kako bi se otkrila mikrostruktura materijala. S obzirom na to da se radi o nehrđajućem čeliku, provedeno je elektrokemijsko nagrivanje i zbog toga su uzorci uliveni u vodljivu polimernu masu.

Parametri nagrivanja bili su sljedeći:

- sredstvo za nagrivanje: 10 % otopina oksalne kiseline
- električna struja jakosti 5 A i napona 12 V
- vrijeme nagrivanja: 90 s

Nakon nagrivanja uzorak se ispiru vodom, suši i spreman je za analizu.

Mikrostruktura površine uzorka fotografirana je pri različitim povećanjima, a fotografije su prikazane u poglavlju Rezultati ispitivanja.

4.4. Rezultati ispitivanja

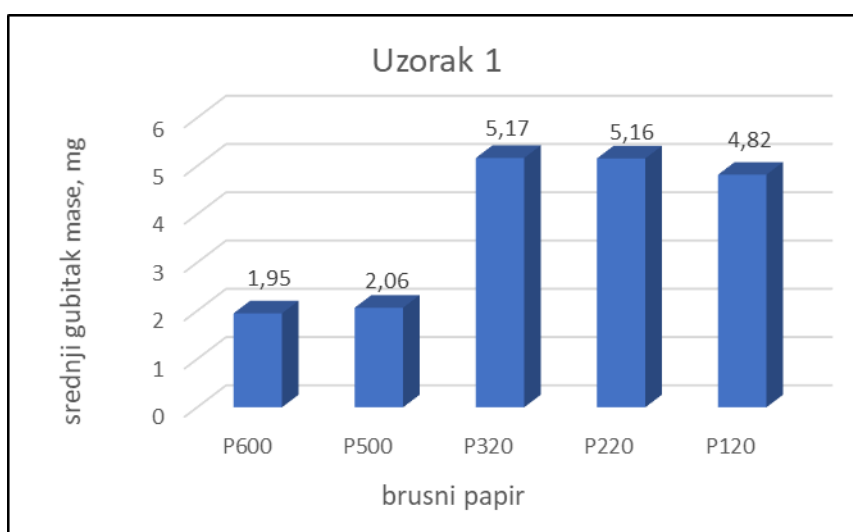
Rezultati dobiveni pri ispitivanju abrazijskog trošenja prikazani su u tablici 2. Za svaku kvalitetu primijenjenih brusnih papira navedene su srednje vrijednosti gubitka mase (tri mjerenja) za sve ispitane uzorke.

Otpornost na abrazijsko trošenje najčešće se prikazuje kao gubitak volumena, pogotovo kad se radi usporedba intenziteta trošenja materijala s različitom gustoćom. Kako ovdje to nije bio slučaj, rezultati ispitivanja su predloženi kao gubitak mase.

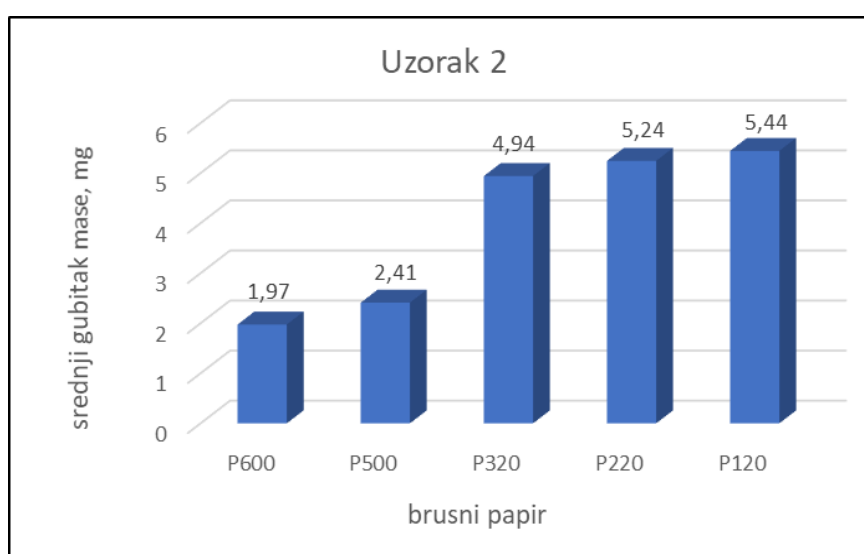
Na slikama od 28. do 30. dijagramski su prikazane vrijednosti gubitka mase na pojedinačnim uzorcima za sve brusne papire. a sve uzorke, a na slici 31. prikazan je kumulativni gubitak mase za sva tri uzorka.

Tablica 2. Gubitak mase pri abrazijskom trošenju

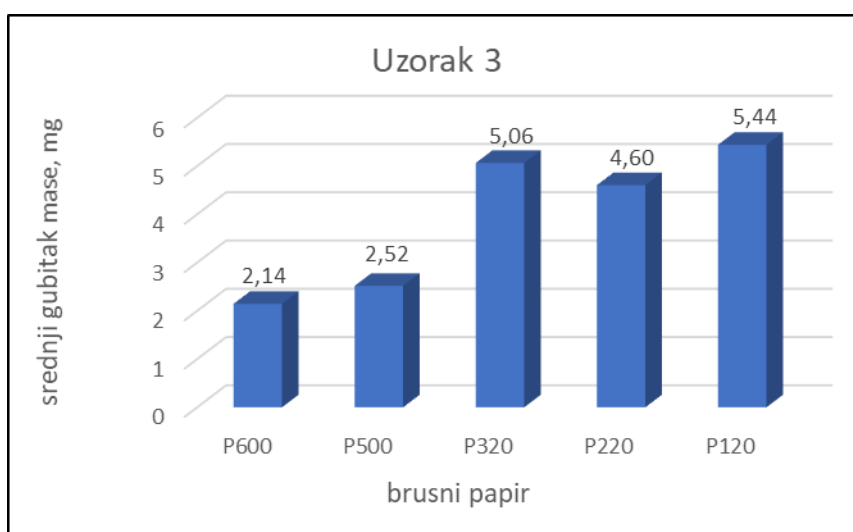
Brusni papir	Gubitak mase, mg		
	uzorak 1	uzorak 2	uzorak 3
P600	1,94	1,97	2,14
P500	2,06	2,41	2,51
P320	5,16	4,94	5,06
P220	5,15	5,24	4,60
P120	4,82	5,44	5,44
Ukupno	21,58	21,75	21,99



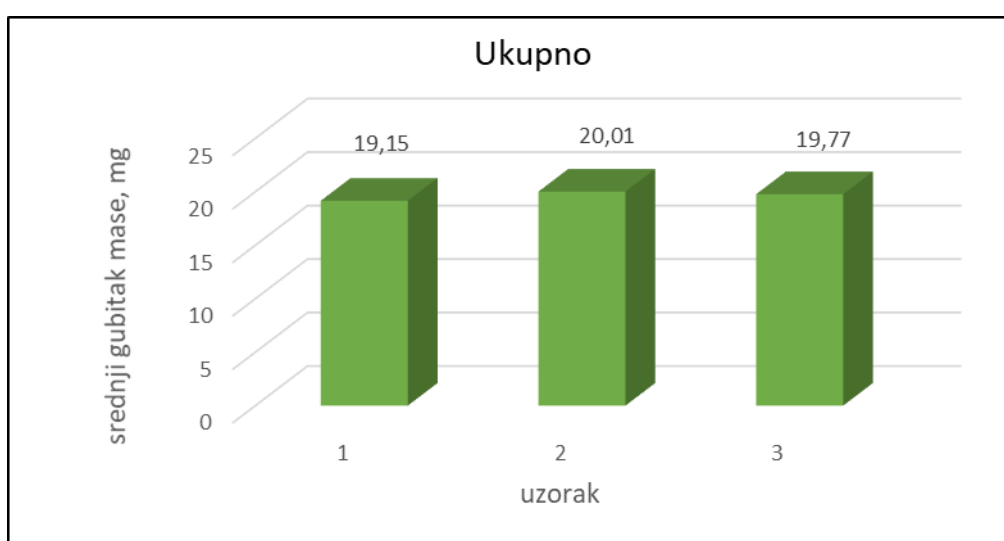
Slika 28. Gubitak mase za sve brusne papire, uzorak 1



Slika 29. Gubitak mase za sve brusne papire, uzorak 2



Slika 30. Gubitak mase za sve brusne papir, uzorak 3

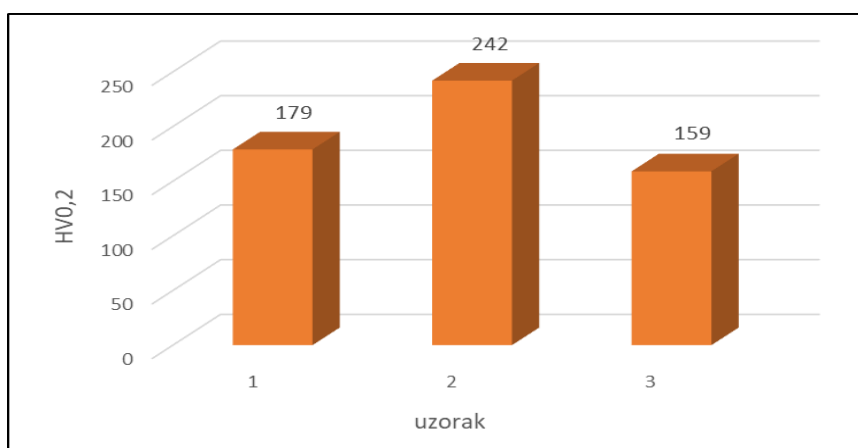


Slika 31. Ukupni gubitak mase za sve korištene brusne papire

Rezultati mjerenja tvrdoće prikazani su u tablici 3. i u dijagramu na slici 32.

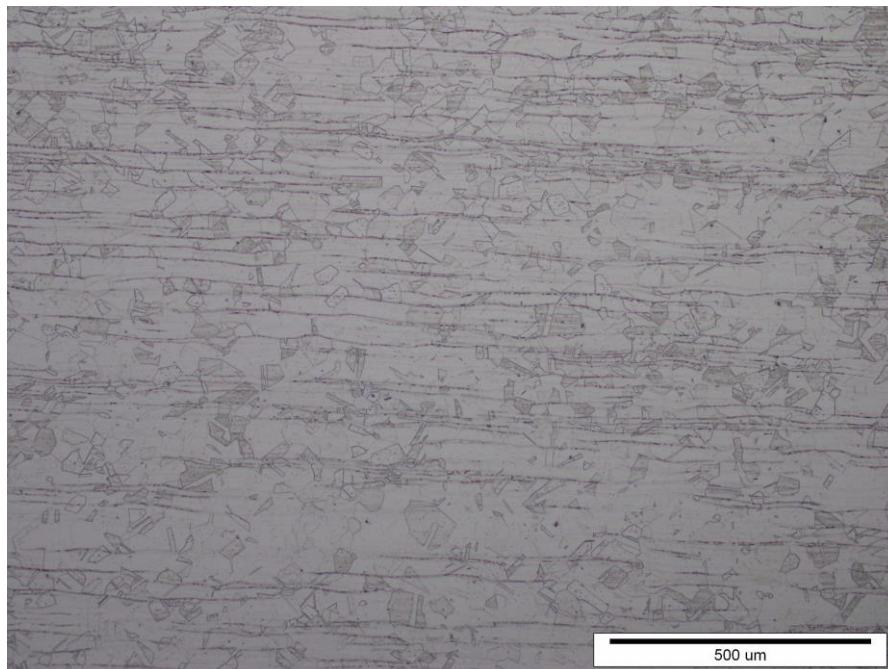
Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2

Mjerenje	Uzorak		
	1	2	3
1	176	260	161
2	188	221	161
3	174	244	155
Srednja vrijednost	179	242	159

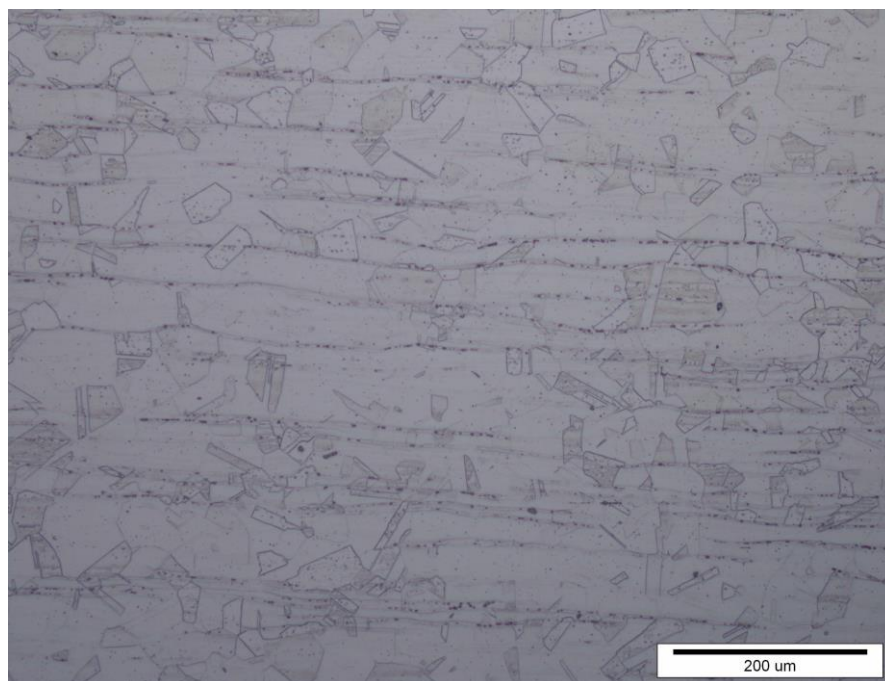


Slika 32. Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2

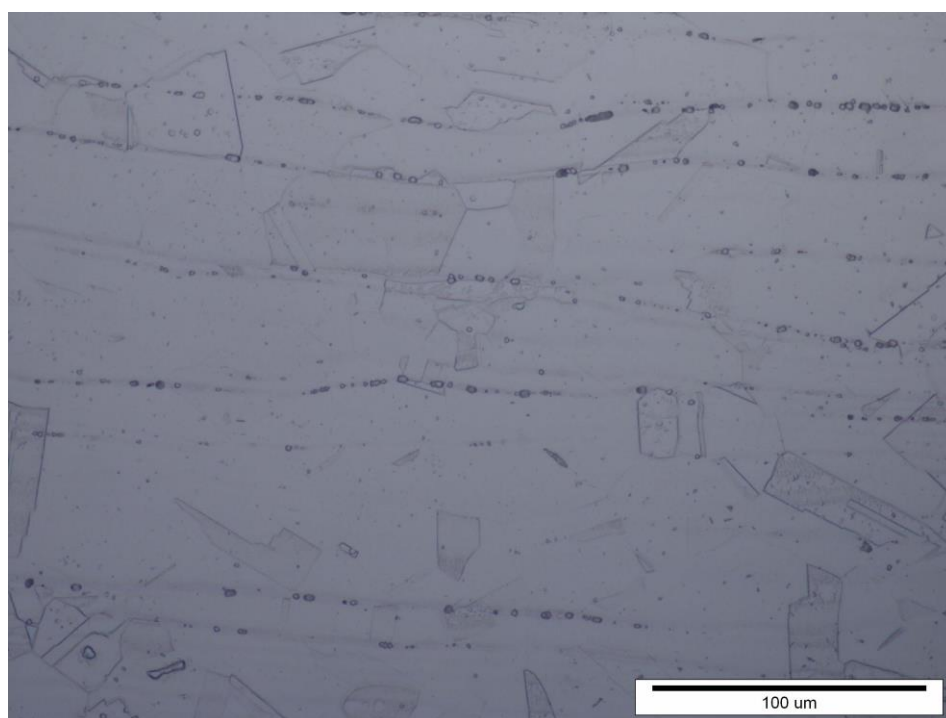
Na slikama od 33. do 35. prikazana je mikrostruktura uzorka 1 – ploče paralelno sa smjerom valjanja u nagriženom stanju pri različitim povećanjima.



Slika 33. Mikrostruktura uzorka 1 snimljena pri povećanju 100×

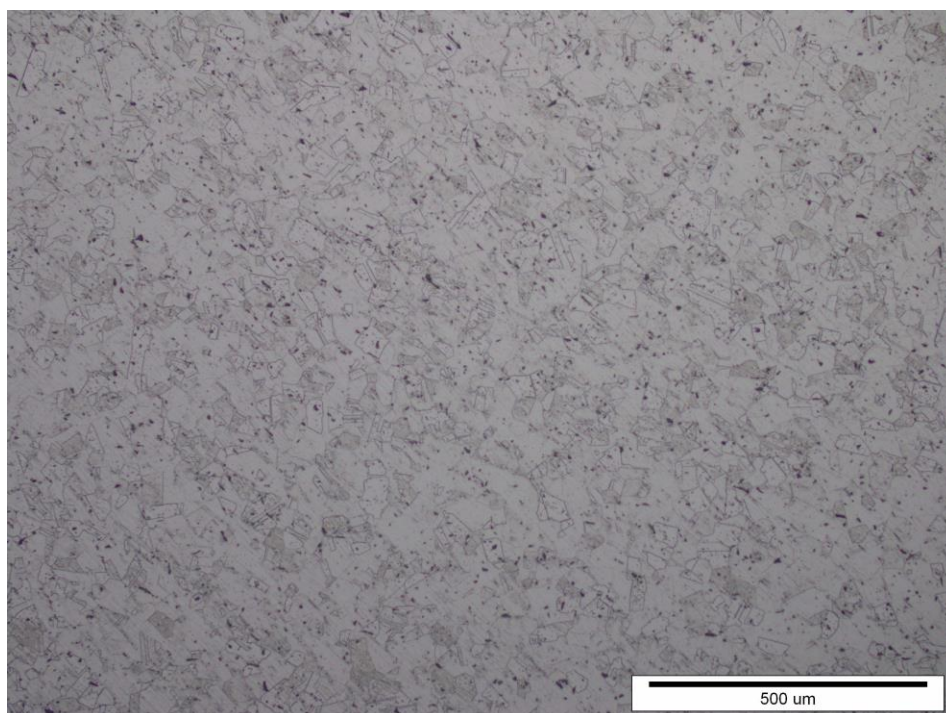


Slika 34. Mikrostruktura uzorka 1 snimljena pri povećanju 200×

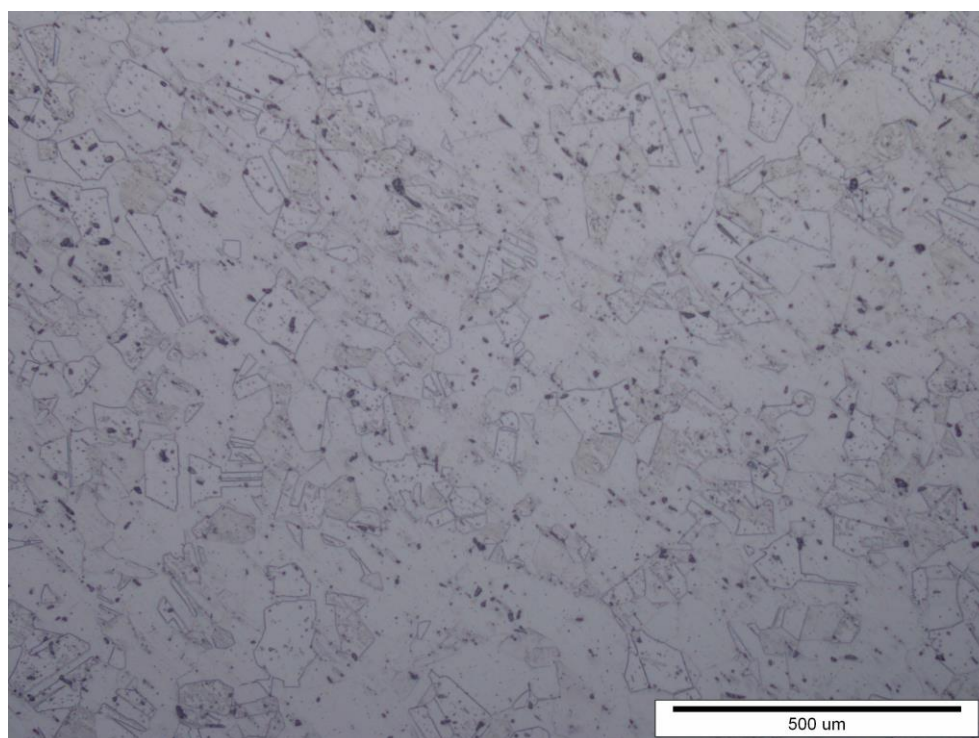


Slika 35. Mikrostruktura uzorka 1 snimljena pri povećanju 500×

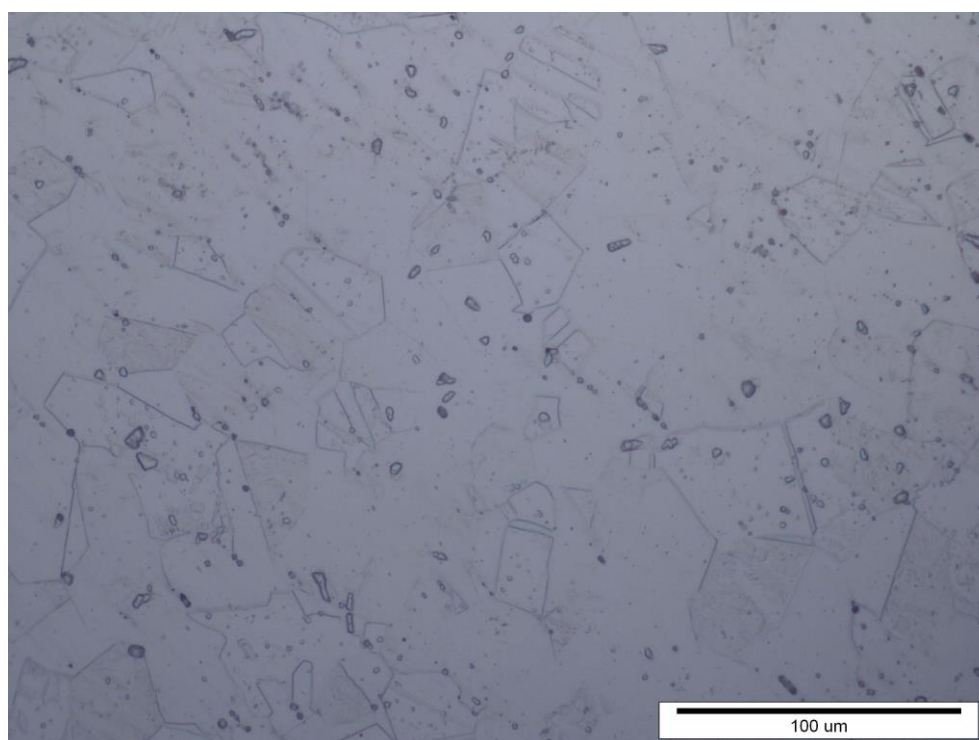
Mikrostruktura uzorka 2 u nagriženom stanju, snimljena pri različitim povećanjima, vidi se na slikama od 36. do 38. To je mikrostruktura ploče okomito na smjer valjanja.



Slika 36. Mikrostruktura uzorka 2 snimljena pri povećanju 100×

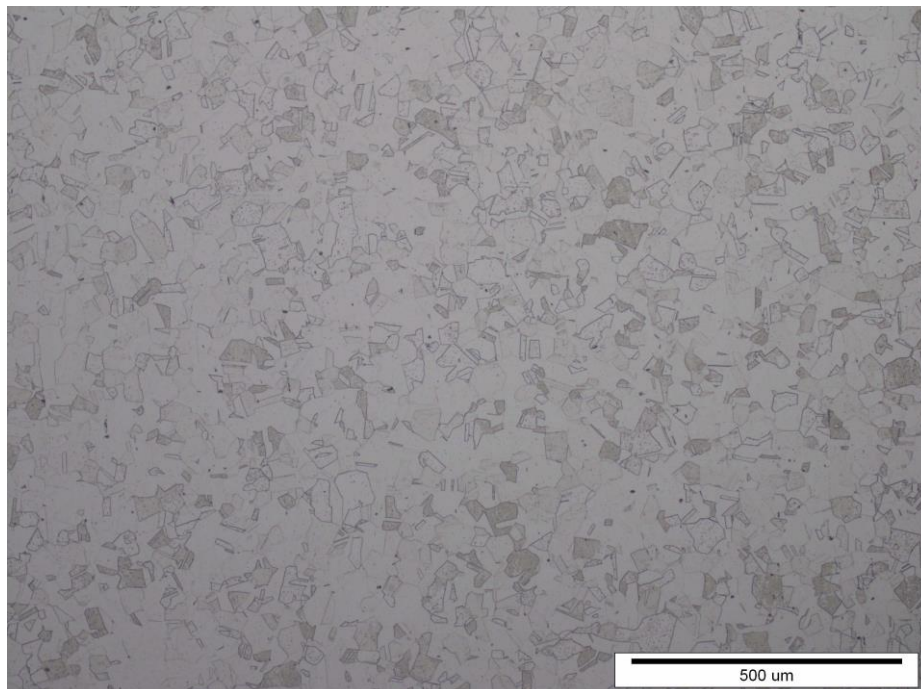


Slika 37. Mikrostruktura uzorka 2 snimljena pri povećanju 200×

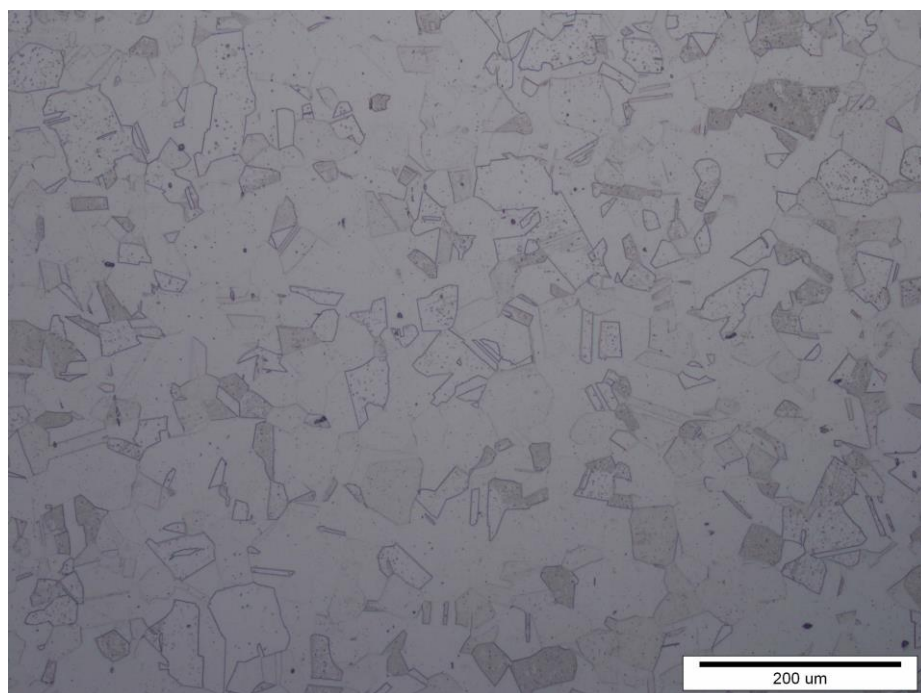


Slika 38. Mikrostruktura uzorka 2 snimljena pri povećanju 500×

Na slikama od 39. do 41. prikazana je mikrostruktura ploče u presjeku koji je paralelan s površinom ploče – uzorak 3.



Slika 39. Mikrostruktura uzorka 3 snimljena pri povećanju 100×



Slika 40. Mikrostruktura uzorka 3 snimljena pri povećanju 200×



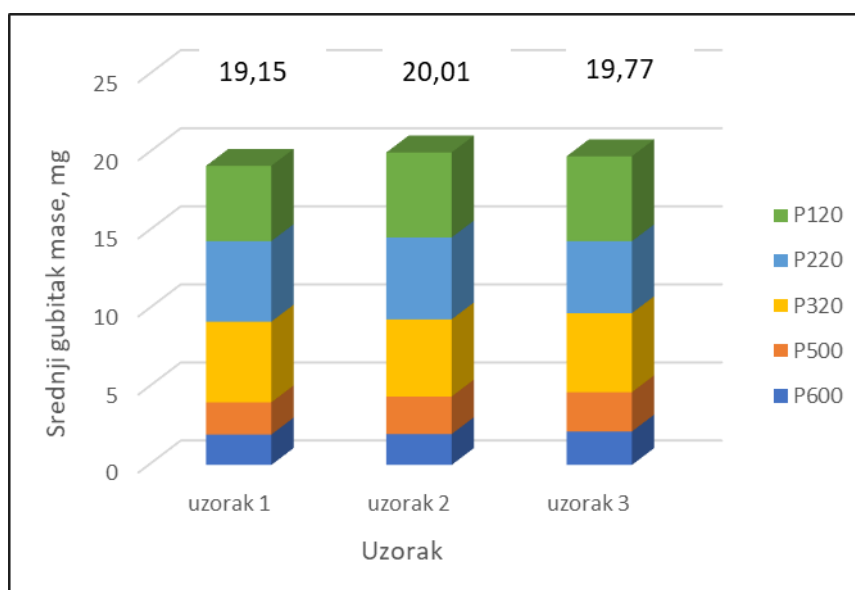
Slika 41. Mikrostruktura uzorka 3 snimljena pri povećanju 500×

Na sva tri uzorka se vidi tipična mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika sa smanjenim sadržajem ugljika. Mikrostruktura se sastoji od austenita i vrlo male količine delta ferita, oko 1 %. Zrna delta ferita vidljiva su u obliku trakastih nakupina, osobito kod uzorka 1 – u presjeku paralelno sa smjerom valjanja. U poprečnom presjeku delta ferit je ravnomjerno raspoređen po cijelom vidnom polju, a najteže ga je uočiti u presjeku paralelnom s površinom uzorka.

4.5. Analiza rezultata

Rezultati dobiveni pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje prikazani su na slici 42. Na slici se vidi ukupni gubitak mase na svim brusnih papirima kumulativno, s označenim gubicima mase za svaki brusni papir.

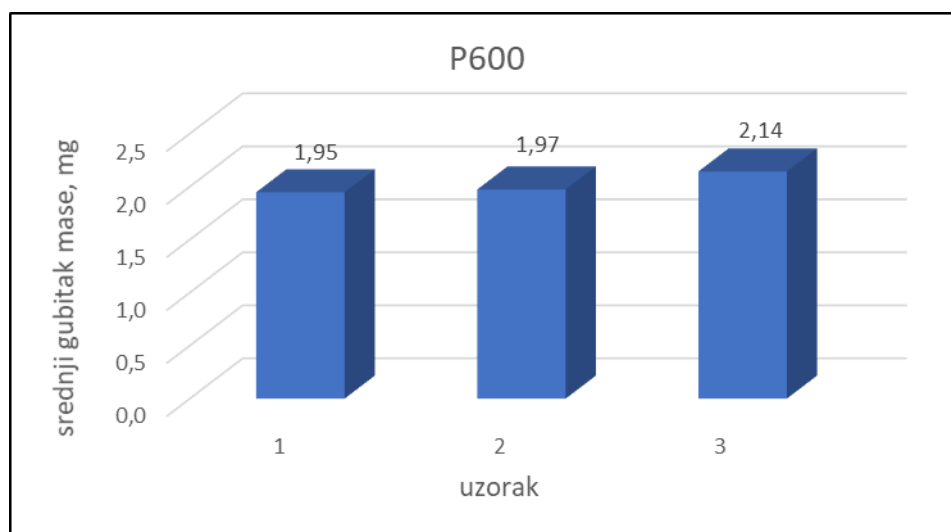
Količina abradiranog materijala podjednaka je na svim uzorcima.



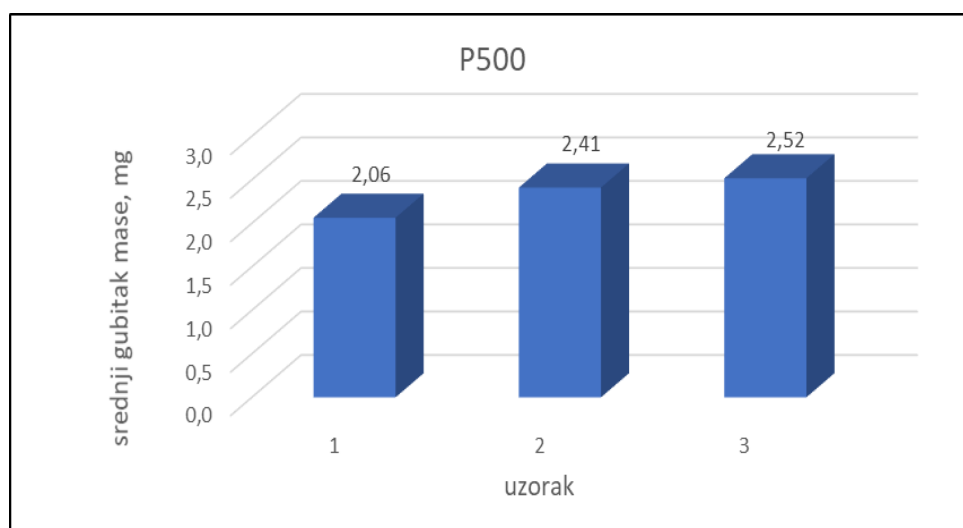
Slika 42. Ukupni gubitak mase s označenim vrijednostima za svaki brusni papir

Dobivene vrijednosti ne poklapaju se s vrijednostima dobivenim pri mjerenju mikrotvrdoće HV0,2. Uzorak 2 ima najveću izmjerenu tvrdoću, a kod njega je izmjerena najmanja otpornost na trošenje. Najmanju tvrdoću ima uzorak 3, a najveću otpornost na trošenje pokazao je uzorak 1. To je u skladu s poznatom činjenicom da je tvrdoća materijala usko povezana s otpornošću na abrazijsko trošenje, ali se ova dva svojstva ne mogu uvijek direktno povezati.

Na slici 43. prikazan je dijagram na kojem se vidi gubitak mase sva tri uzorka na brusnom papiru kvalitete P600. S obzirom na dobivene vrijednosti tvrdoće, ovdje je podudarnost između otpornosti na trošenje i izmjerene tvrdoće puno bolja. Uzorak s najmanjom izmjerenom tvrdoćom ima najveći gubitak mase. Slično je dobiveno i na brusnom papiru kvalitete P500, slika 44. Kod uzorka 2 izmjerena je najveća tvrdoća, ali kod njega nije izmjeren najmanji gubitak mase.

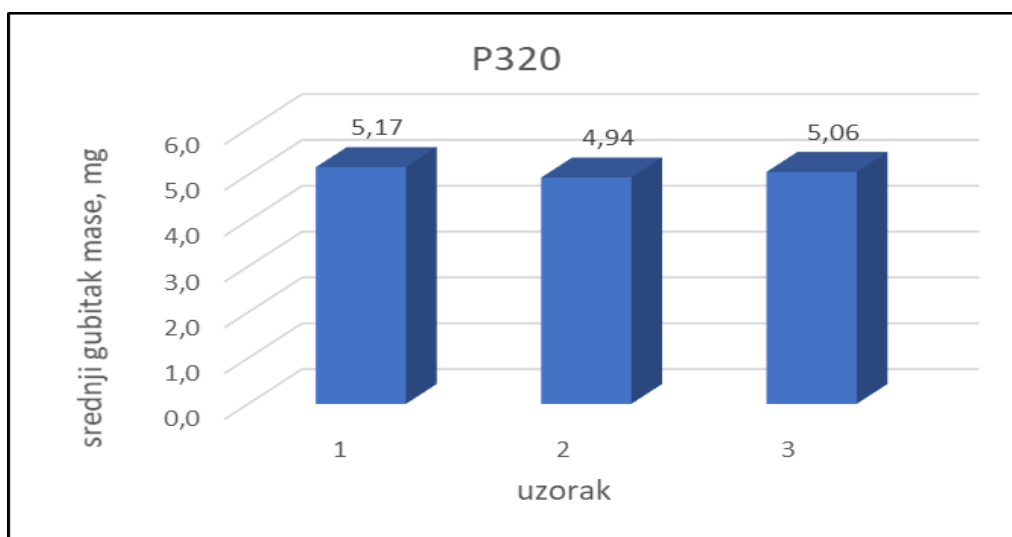


Slika 43. Gubitak mase na brusnom papiru P600



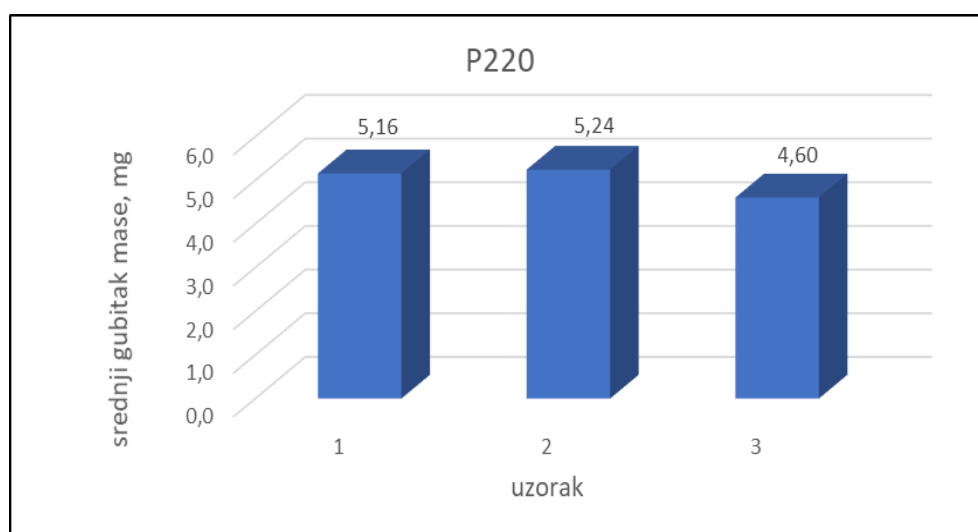
Slika 44. Gubitak mase na brusnom papiru P500

Za brusni papir kvalitete P320 gubitak mase za sve uzroke prikazan je na slici 45. Uzorak 2, kod kojeg je izmjerena najveća tvrdoća, najmanje se troši, a kod druga dva uzorka nema direktne povezanosti između tvrdoće i abrazijske otpornosti.

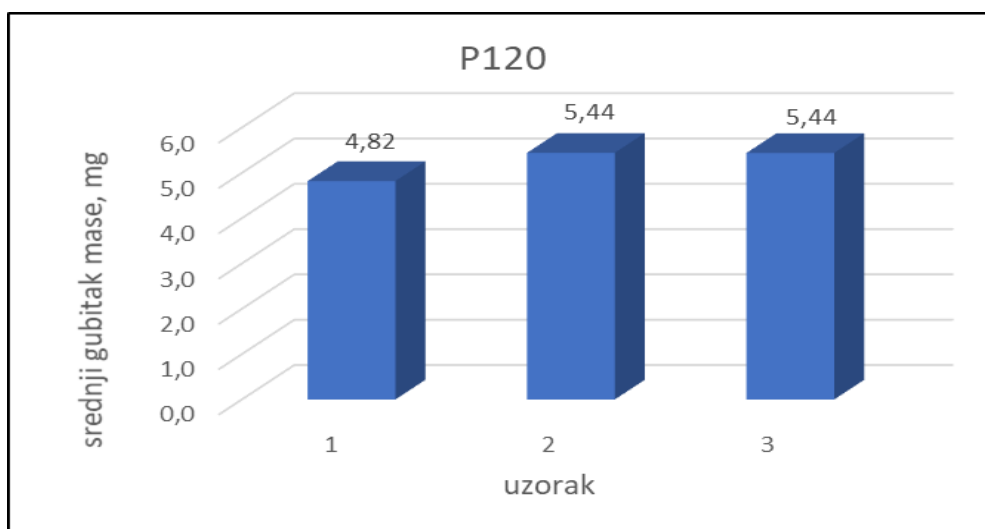


Slika 45. Gubitak mase na brusnom papiru P320

Kod brusnih papira P220 i P120 nema nikakve korelacije između izmjerene tvrdoće i otpornosti na abrazijsko trošenje, slike 46. i 47.



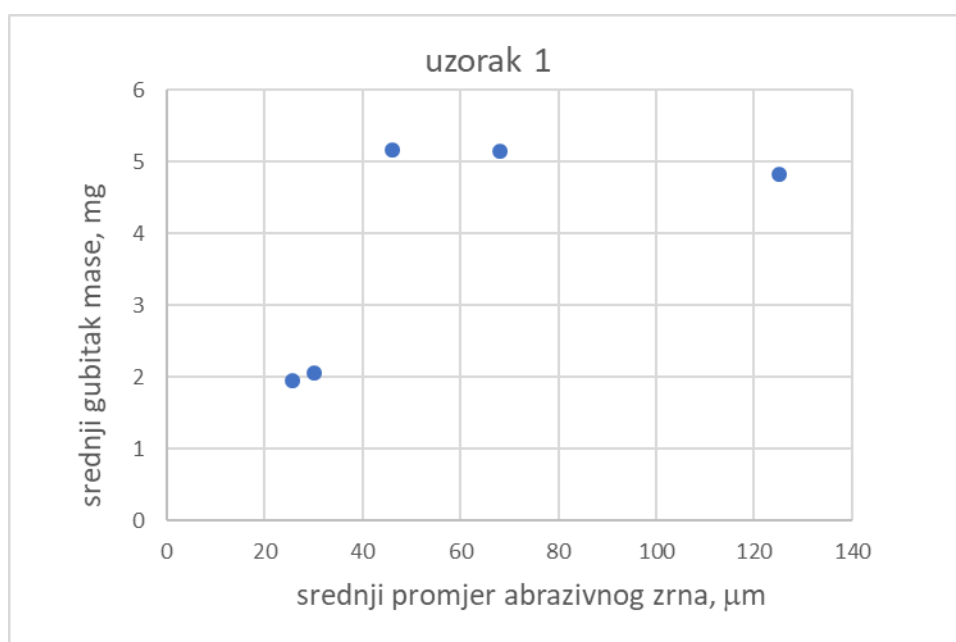
Slika 46. Gubitak mase na brusnom papiru P220



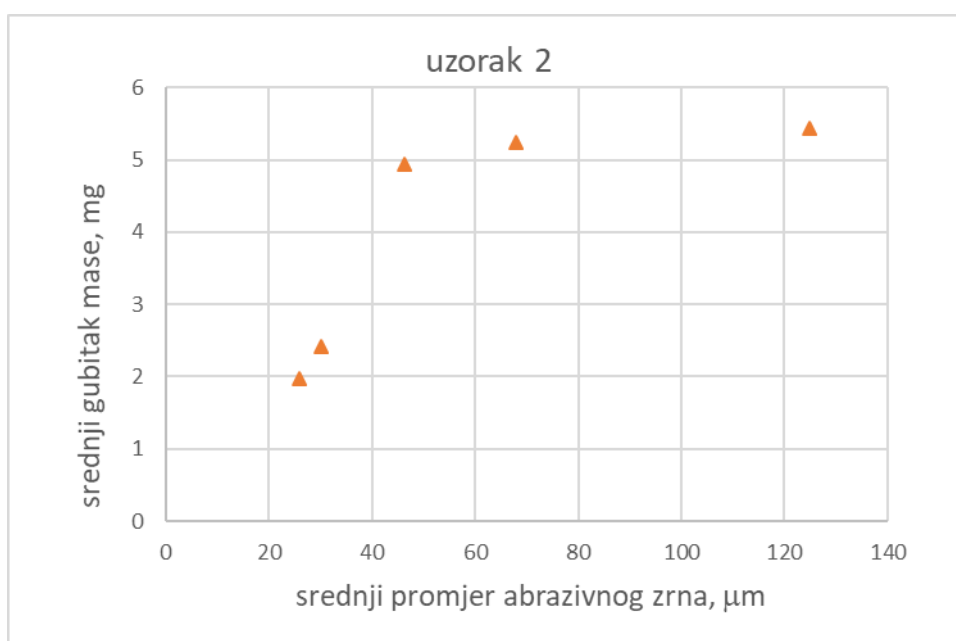
Slika 47. Gubitak mase na brusnom papiru P120

Ako usporedimo gubitak mase pojedinih uzoraka s obzirom na različite kvalitete brusnih papira, može se uočiti da uzorak 1 ima najmanji gubitak mase na tri od pet primjenjenih brusnih papira.

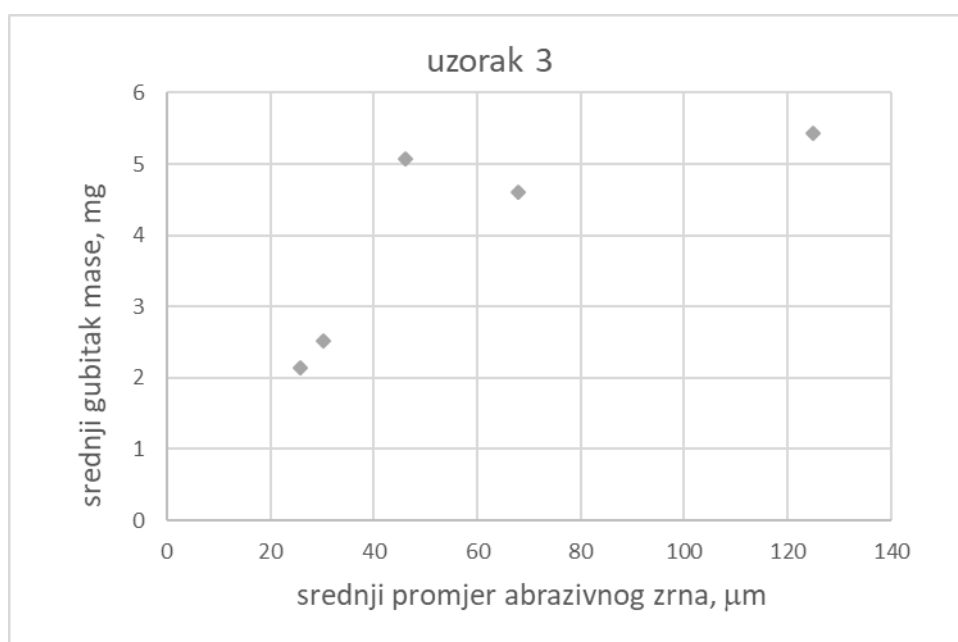
Na slikama od 48. do 50. prikazana je ovisnost abrazijskog trošenja o veličini abrazivnog zrna za sva tri uzorka pojedinačno. Porastom abrazivnog zrna od najfinijih prema grubljima vidi se prirast gubitka mase kod svih uzoraka za prva tri brusna papira. Nakon toga dolazi do pada trošenja kod uzorka 1, a kod uzorka 2 i 3 do stagnacije trošenja, iako abrazivno zrno raste. Ovaj fenomen poznat je pod nazivom kritična veličina abrazivnog zrna. Vrijednost kritične veličine abrazivnog zrna u ovom ispitivanju može se procijeniti na približno 50 μm .



Slika 48. Ovisnost abrazijskog trošenja o veličini abrazivnog zrna za uzorak 1



Slika 49. Ovisnost abrazijskog trošenja o veličini abrazivnog zrna za uzorak 2



Slika 50. Ovisnost abrazijskog trošenja o veličini abrazivnog zrna za uzorak 3

5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i pritom dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- usmjerenost mikrostrukture valjane ploče austenitnog nehrđajućeg čelika utječe na mikrotvrdoću i na abrazijsku otpornost
- najveća tvrdoća izmjerena je u presjeku okomitom na smjer valjanja
- kumulativni gubitak mase na svim brusnim papirima najmanji je na presjeku paralelnom sa smjerom valjanja; na tri kvalitete brusnog papira ovaj presjek je pokazao najveću otpornost na abrazijsko trošenje
- otpornost na trošenje jako ovisi o kvaliteti brusnog papira; za finije brusne papire trošenje je niže i postoji direktna ovisnost između gubitka mase i veličine abrazivnog zrna
- kod svih uzoraka izražen je fenomen kritične veličine abrazivnog zrna čiji srednji promjer iznosi oko 50 μm ; porastom abrazivnih zrna preko kritične vrijednosti trošenje se ili smanjuje ili stagnira kod svih uzoraka
- otpornost na abrazijsko trošenje nije uvijek u direktnoj korelaciji s tvrdoćom; što je brusni papir grublji, to je nepodudarnost veća.

LITERATURA

- [1] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2001.
- [2] Rede, V.: Nehrđajući čelici, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [3] <http://www.bennink-tencate.com/en/industrial-castings/material-range/stainless-steel/martensitic-stainless-steel/> (dostupno 19. 2. 2020.)
- [4] Ramos, L. B, Simoni, L., Mielczarski, R. G., Ortega-Vega, M. R., Schroeder, R. M., Malfatti, C. F.,: Tribocorrosion and Electrochemical Behavior of DIN 1.4110 Martensitic Stainless Steels After Cryogenic Heat Treatment, *Mat. Res.* 20, 2017.
- [5] Saluja, K, Moeed, K. M, Depiction of detrimental metallurgical effects in grade 304 austenitic stainless steel arc welds, *International Journal of Mechanical and Production*, Vol. 8, Issue 6, 207-218, 2018.
- [6] Hesam, A. R., Shaban, M., Eghbali, B: Effect of post deformation annealing on the microstructure and mechanical properties of cold rolled AISI 321 austenitic stainless steel, *Materials Science and Engineering A*, 736:364-374, 2018
- [7] <https://www.steelindopersada.com/2017/06/duplex-stainless-steel-uns-s31803-aisi-2205.html> (dostupno na dan 19. 2. 2020.)
- [8] Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication - tribology, OECD Publications, Paris, 1969.
- [9] Ivušić, V.: Tribologija, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2002.
- [10] Grilec, K., Jakovljević, S.: Tribologija, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [11] Coronado, J. J.: Effect of Abrasive Size on Wear, Research Group of Fatigue and Surfaces, Mechanical Engineering School, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2012.
- [12] Nathan, G. K., Jones, W. J. D.: The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions, *Wear*, 9, 300-309, 1966.
- [13] Coronado, J. J. Sinatora, A.: Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 1. *Wear* 271, 2011a, p. 1794– 1803.

PRILOZI

I. CD-R disc