Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsku otpornost nehrđajućih čeličnih ljevova

Brkić, Robert

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:235:958693

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Robert Brkić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Vera Rede Robert Brkić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na uloženom trudu i vremenu tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem se laborantu Ivanu Vovku i asistentici Tajani Horvat na pomoći prilikom provedbe eksperimentalnog dijela rada.

Robert Brkić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske 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: **Robert Brkić** Mat. br.: 0035206787

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsku otpornost nehrđajućih čeličnih ljevova**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of abrasive grain size on the abrasive wear resistance of cast stainless steels**

Opis zadatka:

Nehrđajući čelični ljevovi pripadaju skupini visokolegiranih FeC-legura, a njihova temeljna značajka je izvrsna korozijska postojanost. U nekim područjima primjene osim izvrsne korozijske postojanosti, nehrđajući čelični ljevovi trebaju imati i što bolja tribološka svojstva, osobito otpornost na abrazijski mehanizam trošenja. Intenzitet abrazijskog trošenja ovisi o puno čimbenika, a jedan od njih je i veličina abrazivnog zrna.
U završnom radu potrebno je istražiti kako veličina abrazivnih čestica utječe na intenzitet abrazijskog trošenja austenitnog i dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva. Ispitivanja treba provesti na uređaju *Taber abrader*, na brusnim papirima različite kvalitete. Dobivene rezultate potrebno je analizirati i na temelju toga donijeti 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. KOROZIJSKI POSTOJANI ČELIČNI LJEVOVI 2
2.1. Označivanje 5
2.2 Klasifikacija nehrđajućih čeličnih ljevova 6
2.3. Austenitni nehrđajući čelični ljevovi 7
2.4. Dupleks nehrđajući čelični ljevovi 8
3. TROŠENJE 9
3.1. Mehanizmi trošenja 9
3.2. Abrazija 9
3.3. Otpornost na abraziju 15
3.4. Kritična veličina abrazivnog zrna 17
4. EKSPERIMENTALNI DIO 19
4.1. Cilj rada 19
4.2. Materijali za ispitivanje 19
4.3. Provođenje ispitivanja 22
4.3.1. Ispitivanje abrazijske otpornosti 22
4.3.2. Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2 24
4.3.3. Analiza mikrostrukture 25
4.4. Rezultati ispitivanja 26
4.5. Analiza rezultata 31
5. ZAKLJUČAK 38
LITERATURA 39
PRILOZI 40

POPIS SLIKA

Slika 1. Oksidni sloj na običnom i nehrđajućem čeličnom lijevu [1] 2
Slika 2. Schaefflerov dijagram [2] 4
Slika 3. Različiti dijelovi za plinovode, rafinerije i napojne pumpe izliveni od nehrđajućeg čeličnog lijeva [3] 4
Slika 4. Slovne oznake za kemijski sastav prema ACI i ASTM [3] 5
Slika 5. Mikrostruktura austenitnog čeličnog lijeva [3] 7
Slika 6. Mikrostruktura dupleks čeličnog lijeva[3] 8
Slika 7. Jedinični događaj abrazije [2] 9
Slika 8. Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [4] 10
Slika 9. Shematski prikaz mikrobrazdanja i mikrorezanja [4] 11
Slika 10. Shematski prikaz mikronaprsnuća i mikroumora [4] 11
Slika 11. „Čista“ abrazija [4] 12
Slika 12. Selektivna abrazija [4] 13
Slika 13. „Nulta“ abrazija [4] 14
Slika 14. Ovisnost abrazijskog trošenja o međusobnom odnosu tvrdoća 16
Slika 15. Kritična veličina abrazivnog zrna, utjecaj veličine zrna na abrazivno trošenje [5] ... 17
Slika 16. Intenzitet trošenja u ovisnosti o srednjoj vrijednosti promjera abrazivnih zrna za različite materijale [6] 18
Slika 17. Izrezani uzorci austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva 20
Slika 18. Izrezani uzorci dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva 20
Slika 19. Uređaj za mjerenje gustoće 21
Slika 20. Taber abrader 22
Slika 21. Uređaj za mjerenje mase (digitalna vaga) 23
Slika 22. Uređaj za mjerenje tvrdoće 24
Slika 23. Optički mikroskop 25
Slika 24. Mikrostruktura uzorka A_v, snimljena pri povećanju 100× 27
Slika 25. Mikrostruktura uzorka A_v, snimljena pri povećanju 200× 27
Slika 26. Mikrostruktura uzorka A_u, snimljena pri povećanju 100× 28

Slika 27. Mikrostruktura uzorka A_u, snimljena pri povećanju 200× 28

Slika 28. Mikrostruktura uzorka D_v, snimljena pri povećanju 50× 29

Slika 29. Mikrostruktura uzorka D_v, snimljena pri povećanju 200× 29

Slika 30. Mikrostruktura uzorka D_u, snimljena pri povećanju 50× 30

Slika 31. Mikrostruktura uzorka D_v, snimljena pri povećanju 200× 30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tvrdoća abraziva i faznih konstituenata [3] 15
Tablica 2. Kemijski sastav austenitnog nehrđajućeg lijeva oznake GX5CrNi19-10 [5] 19
Tablica 3. Kemijski sastav dupleks nehrđajućeg lijeva oznake GX2CrNiMoN25-6-3 [6] 19
Tablica 4. Kvalitete brusnih papira i srednji promjeri abrazivnog zrna (ISO/FEPA) 23
Tablica 5. Gubitak mase pri ispitivanju abrazijskog trošenja za sve brusne papire 26
Tablica 6. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 26

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F_n	N	Normalna komponenta sile
F_t	N	Tangencijalna komponenta sile
w	mm^3	Intenzitet trošenja
H_a	HV	Tvrdoća abraziva
H_m	HV	Tvrdoća materijala
d_{sr}	µm	Srednji promjer abrazivnog zrna
d_{krit}	µm	Kritični promjer abrazivnog zrna
R_e	N/mm^2	Granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća

SAŽETAK

Osnovni cilj završnog rada bio je ispitati abrazijsku otpornost austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva oznake GX5CrNi 19-10 i dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva oznake GX2CrNiMoN 25-6-3 te utvrditi postoji li kritična veličina abrazivnog zrna. Također je analizirana mikrostruktura i izmjerena mikrotvrdoća HV0,2.

U teorijskom dijelu rada opisani su uvjeti korozijske postojanosti čeličnih ljevova, podjela po vrstama, mikrostruktura i svojstva. Opisan je abrazijski mehanizam trošenja i objašnjen fenomen kritične veličine abrazivnog zrna.

Utvrđeno je da intenzitet trošenja kod oba lijeva ovisi o veličini abrazivnog zrna. Dupleks čelični lijev ima višu mikrotvrdoću i veću otpornost na abrazijsko trošenje od austenitnog čeličnog lijeva. Kod oba lijeva rubovi su tvrđi i manje se troše u odnosu na sredinu odljevka. Ove razlike su posljedica grublje mikrostrukture na rubu odljevaka. Kod svih ispitanih uzoraka izražen je fenomen kritične veličine abrazivnog zrna. Kritični promjer abrazivnog zrna iznosi oko 52 μm.

Ključne riječi: nehrđajući čelični ljevovi, abrazivno trošenje, kritična veličina zrna, mikrotvrdoća

SUMMARY

The objective of this paper was to investigate abrasive wear of austenitic cast stainless steel grade GX5CrNi 19-10 and duplex cast stainless steel grade GX2CrNiMoN 25-6-3 and to determine critical particle size. Microstructure and microhardness of these materials was analysed as well.
The conditions in which cast steels are corrosion resistant were described in theoretical part. Classification of cast stainless steels, their microstructure and properties, wear mechanisms and critical abrasive particle size were also explained in theoretical part of this paper.
It is determined that wear rate of both casts depends on abrasive particle size. Duplex cast steel exhibits higher microhardness and therefore higher resistance to abrasive wear than austenitic cast steel. In both casts the corners of cast steels are harder which is due to smaller grain size. Critical particle size phenomenon is present in every sample and its value is around 52 μm.

Keywords: cast stainless steels, abrasive wear, critical particle size, microhardness

1. UVOD

Nehrđajući čelični ljevovi ističu se u odnosu na ostale čelične ljevove po svojoj odličnoj korozijskoj postojanosti. Korozijska postojanost postiže se prvenstveno legiranjem kromom kojeg mora biti barem 12 %, otopljenog u krutoj otopini. Osim kromom, ovi ljevovi legiraju se i drugim kemijskim elementima kao što su nikal, molibden, dušik, titanij i bakar koji osiguravaju što bolju kombinaciju korozijskih, mehaničkih, tehnoloških i drugih svojstava.

Općenito svojstva ljevova, pa tako i nehrđajućih čeličnih ljevova, ne ovise samo o kemijskom sastavu već i o načinu ohlađivanja te eventualno provedenoj toplinskoj obradi.

Područje primjene nehrđajućih čeličnih ljevova je široko i uključuje naftnu, kemijsku, prehrambenu, procesnu i petrokemijsku industriju. Ljevovi se ponajviše koriste za izradu dijelova kompliciranijeg oblika i kod proizvodnje većeg broja istovrsnih komada.

Vrlo važna skupina svojstava kod ovih materijala jesu tribološka svojstva, ponajprije otpornost na abrazijsko trošenje. Abrazija je najčešći mehanizam trošenja i neophodno je znati u kojoj mjeri je materijal podložan abrazivnom trošenju. Otpornost na abrazijsko trošenje direktno ovisi o tvrdoći materijala. Što je tvrdoća materijala veća i otpornost na abrazijsko trošenje bi trebala biti veća.

Otpornost na abrazijsko trošenje izražava se najčešće preko intenziteta trošenja. Na intenzitet abrazijskog trošenja utječe niz čimbenika a jedan od važnijih je veličina abrazivnog zrna. Povećanjem abrazivnog zrna intenzitet trošenja raste sve do točke koja se naziva kritična veličina abrazivnog zrna.

Nakon kritične veličine abrazivnog zrna moguća su tri slučaja. Intenzitet trošenja može nastaviti rasti ali manjom stopom rasta, može ostati konstantan i neovisan o daljnjem povećanju abrazivnog zrna ili se može smanjivati.

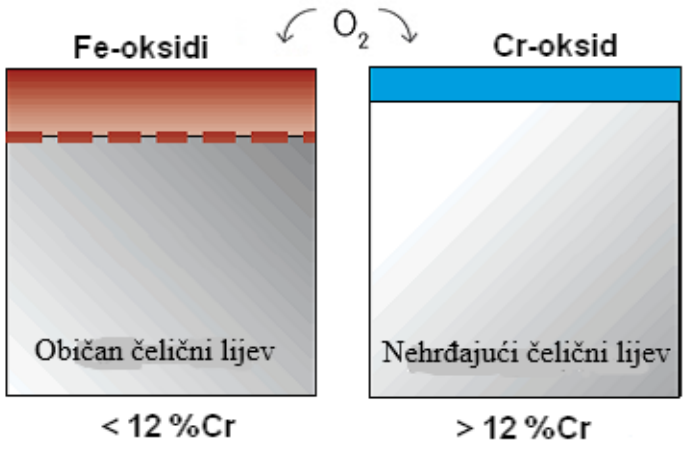
2. KOROZIJSKI POSTOJANI ČELIČNI LJEVOVI

Korozijska postojanost definira se kao sposobnost materijala da se suprotstavi korozijskoj agresiji medija ili okoline, većim ili manjim usporenjem njegova djelovanja. Postoje dva uvjeta korozijske postojanosti čelika. Prvi je da maseni udio kroma u čeliku bude barem 12 %. Krom u potpunosti mora biti otopljen u kristalu mješancu, a ne smije biti dio karbida ili drugih strukturnih tvorevina. Drugi uvjet antikorozivnosti je monofazna mikrostruktura čime se izbjegava opasnost od nastanka galvanskih članaka koji u vodljivom mediju mogu prouzročiti korozijsko trošenje materijala. Ovaj uvjet nije u potpunosti nužan jer postoje nehrđajući čelici i ljevovi čija se mikrostruktura sastoji od dvije i više faza [1].

Glavna razlika između čelika i ljevova je u postupku izrade poluproizvoda. Čelik se nakon lijevanja plastično deformira nekom od tehnologija obrade (valjanje, savijanje, provlačenje), dok je lijev odljevak koji nakon skrućivanja nije pretrpio nikakvu plastičnu deformaciju. Odljevci se mogu po potrebi dorađivati obradom odvajanjem čestica s ciljem postizanja konačnog oblika proizvoda.

Nehrđajući čelični ljevovi pripadaju skupini visokolegiranih FeC-legura. Njihova osnovna karakteristika je izvrsna korozijska otpornost. Kao i nehrđajući čelici i ljevovi moraju sadržavati minimalno 12 % Cr u krutoj otopini (u kristalu mješancu) da bi se na površini formirao zaštitni sloj kromovog oksida. Ovaj pasivni film, debljine 1-5 nanometara, predstavlja mehaničku barijeru između potencijalno agresivnog medija i površine čeličnog lijeva, ima sposobnost samoobnavljanja u vrlo različitim medijima te vrlo dobro prianja uz površinu lijeva.

Na slici 1 prikazana je razlika u formiranju oksidnog sloja na površini kod običnog i nehrđajućeg čeličnog lijeva.



Slika 1. Oksidni sloj na običnom i nehrđajućem čeličnom lijevu [1]

Kod običnog čeličnog lijeva koji ne sadrži 12 % kroma na površini se formiraju željezni oksidi koji ne prianjaju dobro uz površinu, nisu kompaktni i izazivaju stalno korozijsko trošenje.

Većina čeličnih ljevova sadrži i više od minimalnog sadržaja kroma, neki do 30 %. U sastavu čeličnih ljevova nalaze se i drugi legirni elementi koji se dodaju s ciljem dobivanja željene mikrostrukture i najbolje kombinacije korozijske postojanosti, mehaničkih i drugih svojstava. Većina ljevova sadrži nikal, molibden i dušik čime se povećava korozijska otpornost. Nikal također pozitivno djeluje na žilavost, a molibden, dušik, titanij, bakar i aluminij povisuju čvrstoću. Čvrstoća se povisuje i dodavanjem ugljika (koji je osnovni, a ne legirni element), posebno kod ljevova namijenjenih za rad na višim temperaturama. Za poboljšanje obradivosti odvajanjem česticama dodaje se selen [2].

Mangan i silicij prisutni su kao primjese u gotovo u svim čelicima i ljevovima, ne samo u nehrđajućim. Mangan sprečava stvaranje željeznog sulfida koji loše utječe na mehanička svojstva, a silicij poboljšava livljivost. Fosfor i sumpor neizostavne su nečistoće u sastavu ljevova i njihov sadržaj treba biti čim niži, ovisno o zahtijevanoj kvaliteti lijeva. Neki od navedenih elemenata promiču austenitnu, a neki feritnu mikrostrukturu. Na formiranje mikrostrukture bitno utječe i režim toplinske obrade pa se temperatura žarenje i brzina hlađenja moraju pomno kontrolirati.

Svojstva nehrđajućih čeličnih ljevova ovise prije svega o kemijskom sastavu. Korozijska postojanost ljevova je podjednaka s ekvivalentnim gnječenim legurama, a i mehanička svojstva (R_e, R_m) su također usporediva s gnječenim legurama sličnog sastava i mikrostrukture. Ljevovi su u odnosu na gnječene legure istog sastava osjetljiviji na mikrosegregacije, nečistoće i nehomogenosti u sastavu.

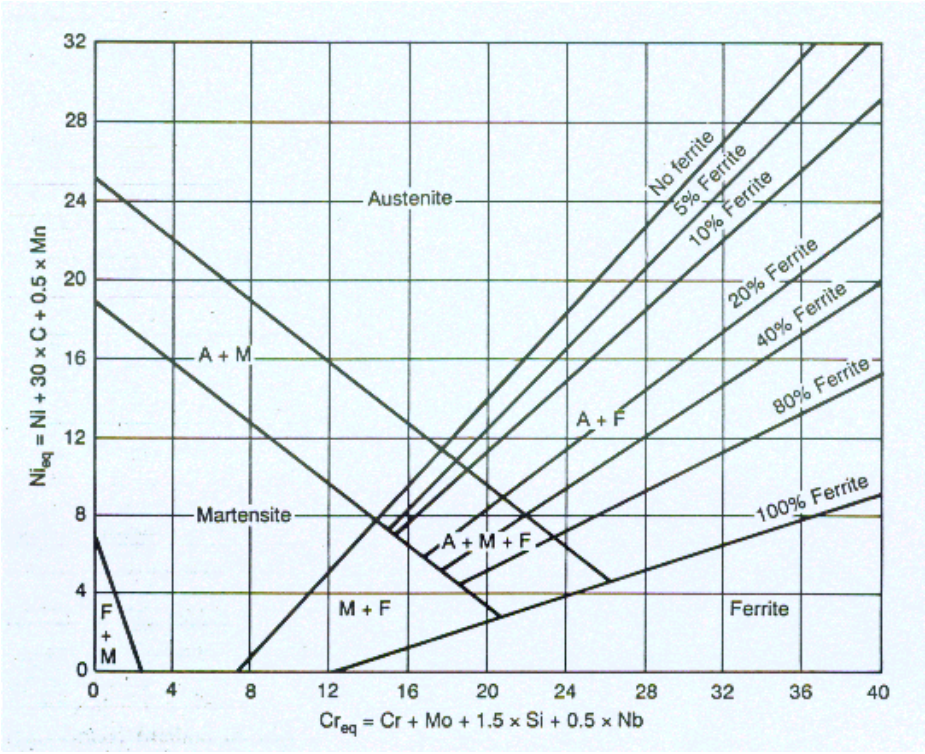
Poznavanjem kemijskog sastava, mikrostruktura lijeva može se odrediti iz Schaefflerovog dijagrama. Na x-osi nalaze se vrijednosti Cr-ekvivalenta, a na y-osi vrijednosti Ni-ekvivalenta. Ovaj dijagram nije ravnotežni nego prikazuje mikrostrukturu dobivenu naglim hlađenjem s temperature 1050°C do sobne temperature.

Schaefflerov dijagram može se vidjeti na slici 2.

Cr- i Ni-ekvivalent mogu se odrediti prema dolje navedenim izrazima:

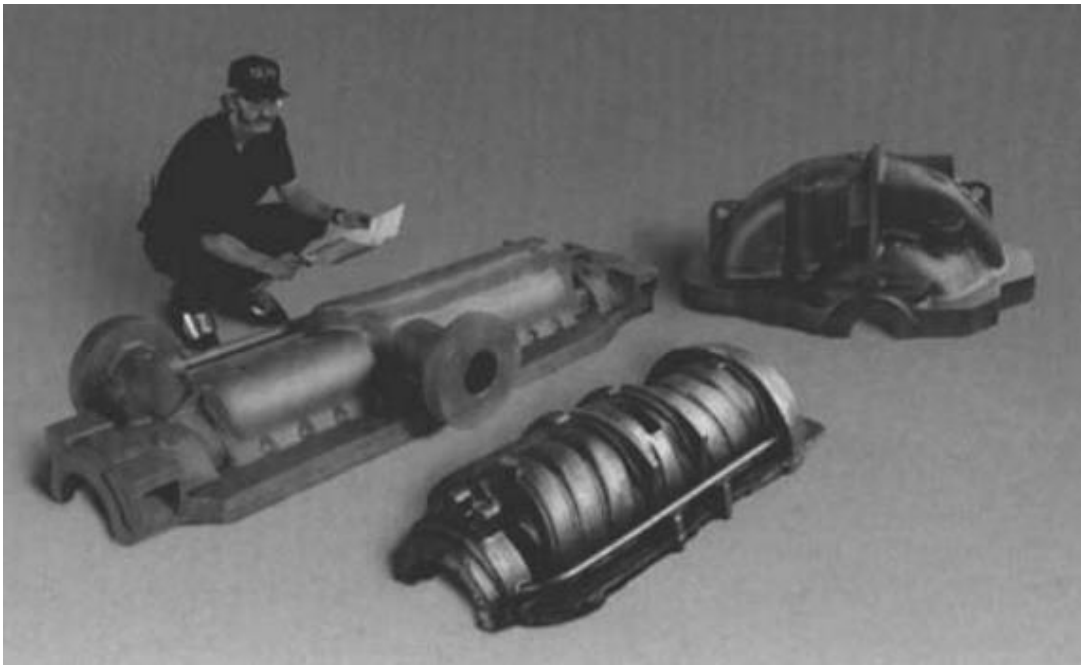
$$Cr_{ekv} = \%Cr + 2(\%Si) + 1{,}5(\%Mo) + 5(\%V) + 5{,}5(\%Al) + 1{,}75(\%Nb) + 1{,}5(\%Ti) + 0{,}75(\%W)$$

$$Ni_{ekv} = \%Ni + \%Co + 30(\%C) + 25(\%N) + 0{,}5(\%Mn) + 0{,}3(\%Cu)$$



Slika 2. Schaefflerov dijagram [2]

Na slici 3 prikazani su razni strojni dijelovi izliveni od nehrđajućeg čeličnog lijeva. Primjena ljevova naročito je opravdana kada se radi o dijelovima složene geometrije u velikoserijskoj proizvodnji.



Slika 3. Različiti dijelovi za plinovode, rafinerije i napojne pumpe izliveni od nehrđajućeg čeličnog lijeva [3]

2.1. Označivanje

Prema hrvatskoj i europskoj normi oznake ljevova počinju velikim slovom G, nakon čega slijedi sve isto kao kod označivanja nehrđajućih čelika. S obzirom da se radi o visokolegiranim čeličnim ljevovima, oznaka se nastavlja s velikim slovom X iza kojeg slijedi sadržaj ugljika pomnožen sa 100 te kemijski simboli i maseni udjeli legirnih elemenata poredani po veličini masenih udjela.

Na primjer:

GX6CrNi 13-4 - oznaka za visokolegirani lijev s 0,06 % C, oko 13 % Cr i oko 4 % Ni

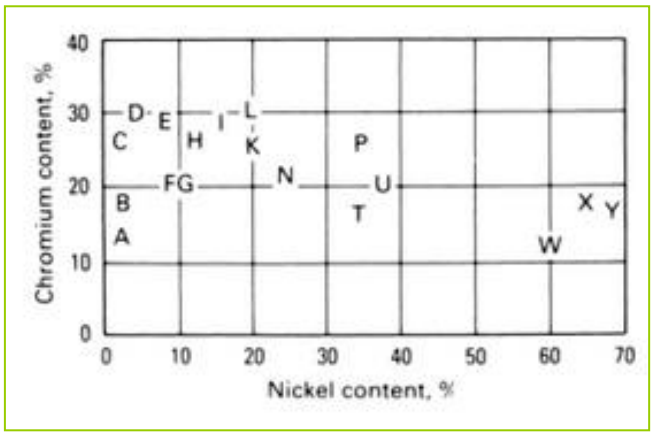
GX5CrNiNb 19-10 – oznaka za visokolegirani lijev s 0,05 % C, oko 19 % Cr, oko 10 % Ni i manje od 1 % Nb

Prema američkim normama ACI (American Concrete Institute) i ASTM (American Society for Testing and Materials), oznaka počinje slovnim simbolom C za korozijski postojane ljevove za primjenu do 650°C ili H za korozijski postojane ljevove za primjenu iznad 650°C. Na drugom mjestu je slovni simbol koji ukazuje na kemijski sastav (udio kroma i nikla) prema slici 4. Slijedi broj koji ukazuje na sadržaj ugljika pomnožen sa 100. Iza toga slijedi slovo koje ukazuje na ostale legirne elemente.

Na primjer:

CF-8M - korozijski postojan lijev, 17-21 %Cr, 8-12 %Ni, najviše 0,08 %C, prisutan molibden

CD-4MCu - korozijski postojan lijev, 26-30 %Cr, 4-7 %Ni, najviše 0,04%C, prisutan molibden i bakar



Slika 4. Slovne oznake za kemijski sastav prema ACI i ASTM [3]

2.2 Klasifikacija nehrđajućih čeličnih ljevova

Nehrđajući čelični ljevovi se klasificiraju na tri načina: prema temparaturi primjene, prema kemijskom sastavu i prema tipu mikrostrukture.

Prema temperaturi primjene nehrđajući čelični ljevovi dijele se u dvije skupine:

- korozijski postojani ljevovi za primjenu do 650 °C
- korozijski i toplinski postojani ljevovi za primjenu iznad 650 °C.

Najbitnija razlika između ove dvije skupine je u sadržaju ugljika. Ljevovi za primjenu do 650 °C sadrže puno manje ugljika (manje od 0,2 %, a ponekad manje i od 0,03 %) i imaju bolju korozijsku otpornost. Ljevovi za primjenu iznad 650 °C sadrže više ugljika zbog čega imaju bolju otpornost na puzanje i veću čvrstoću na povišenim temperaturama, ali su osjetljiviji na koroziju. Povišeni udio ugljika osigurava nastanak toplinski stabilnih karbida.

Prema kemijskom sastavu nehrđajući čelični ljevovi dijele se na:

- ljevove legirane kromom
- ljevove legirane kromom i niklom kod kojih je krom dominantni legirni element
- ljevove legirane niklom i kromom kod kojih je nikal dominantni legirni element.

Svi korozijski postojani čelični ljevovi sadrže više od 12 % kroma, a većina sadrži između 1 i 30 % Ni. Nikal je gamageni legirni element što znači da promiče austenitnu mikrostrukturu. Legiranje niklom povisuje duktilnost i čvrstoću, također povećava otpornost na koroziju u neutralnim kloridnim otopinama i slabim oksidirajućim kiselinama. Dodatkom bakra dolazi do povećanja čvrstoće i tvrdoće formiranjem finih precipitata [1].

Prema mikrostrukturi nehrđajući čelični ljevovi dijele se, kao i gnječene FeC-legure, na:

- austenitne
- feritne
- martenzitne
- dupleks
- precipitacijski očvrsnute.

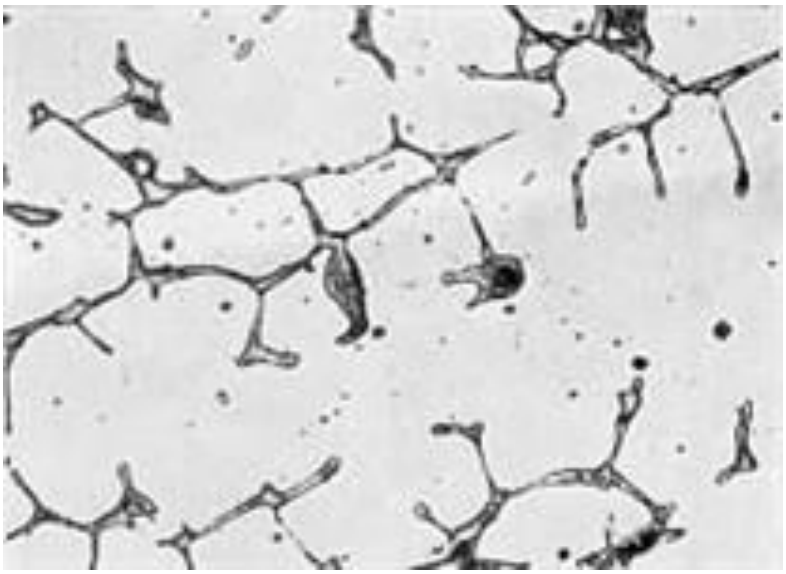
2.3. Austenitni nehrđajući čelični ljevovi

Austenitni nehrđajući čelični ljevovi najbrojnija su skupina nehrđajućih čeličnih ljevova i najviše ih se proizvodi. Mikrostruktura na sobnoj temperaturi im se najvećim dijelom sastoji od austenita, ali mogu sadržavati i značajnu količinu delta-ferita. Ferita može biti od 5 do 40 %. Zahvaljujući feritnoj fazi ovi ljevovi imaju višu čvrstoću i dobru zavarljivost te bolju otpornost na napetosnu i interkristalnu koroziju. Optimalna korozijska otpornost ovih ljevova postiže se kada je ugljik potpuno otopljen u kristalu mješancu.

Ukoliko se tijekom primjene ili pri zavarivanju austenitni nehrđajući lijev zadrži dovoljno dugo u temperaturnom području između 425 °C i 870 °C, može doći do senzibilizacije mikrostrukture. Senzibilizacija podrazumijeva formiranje kromovih karbida po granicama zrna zbog čega lijev postaje osjetljiv na interkristalnu koroziju. Ovo se može spriječiti na dva načina; snižavanjem udjela ugljika ili legiranjem stabilizirajućim elementima koji imaju jači afinitet prema ugljiku od kroma (Nb, Ti, Ta).

Ovi ljevovi imaju dobru otpornost na većinu organskih kiselina. Primjenjuju se većinom u kemijskoj i farmaceutskoj industriji te u industriji hrane. Izbjegava se primjena u mirujućoj morskoj vodi jer postoji opasnost od rupičaste korozije (engl. *pitting*).

Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva može se vidjeti na slici 4.

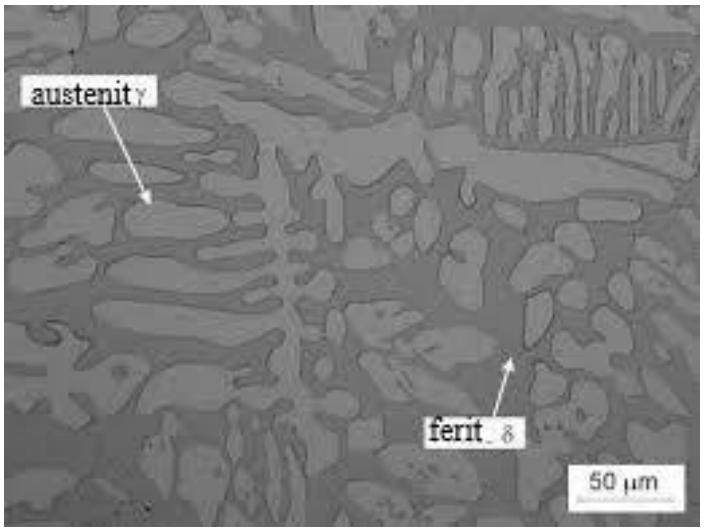


Slika 5. Mikrostruktura austenitnog čeličnog lijeva [3]

2.4. Dupleks nehrđajući čelični ljevovi

Dupleks nehrđajući čelični ljevovi su najmlađa skupina nehrđajućih čeličnih ljevova. Njihova mikrostruktura sastoji se od ferita i austenita u podjednakim volumnim udjelima. Idealni omjer je 50:50 ali je dovoljno i 40 % ferita da bi se postignu zadovoljavajuća mehanička i korozijska svojstva. Zbog višeg udjela ferita ovi ljevovi pokazuju feromagnetna svojstva, imaju višu toplinsku vodljivost i nižu toplinsku rastezljivost od austenitnih čelika.

Njihova glavna značajka je izvanredna kombinacija korozijske postojanosti i mehaničkih svojstava. Dupleks čelici i ljevovi imaju puno višu granicu razvlačenja (oko 425 N/mm^2) u odnosu na austenitne (oko 210 N/mm^2). Tvrdoća im je također viša, a shodno tome i otpornost na abrazijsko trošenje [1].



Slika 6. Mikrostruktura dupleks čeličnog lijeva[3]

3. TROŠENJE

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela poradi dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [4].

Trošenje se može opisati i kao reakcija materijala na vanjski podražaj mehaničkog i/ili kemijskog karaktera. Posljedice trošenja su promjene geometrije površina između međusobno pokretnih dijelova. Većina zastoja strojarskih sustava uzrokovano je zbog posljedica trošenja i zbog neadekvatnih mjera sprečavanja trošenja i održavanja.

3.1. Mehanizmi trošenja

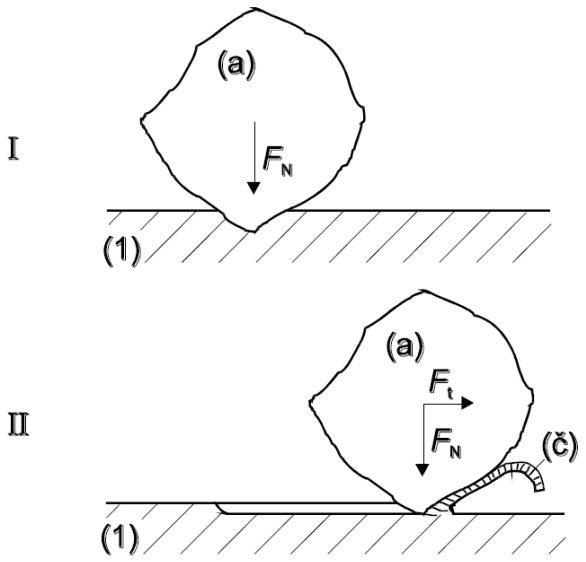
Postoje četiri osnovna mehanizma trošenja:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija

Svi mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima koji predstavljaju slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine.

3.2. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja [4]. Jedinični događaj abrazije može se vidjeti na slici 7.



Slika 7. Jedinični događaj abrazije [2]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze:

I. prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponentne sile F_n

II. istiskivanje materijala u obliku čestice trošenja (č) uslijed tangencijalne komponente sile F_t

Abraziju je moguće analizirati s nekoliko različitih gledišta:

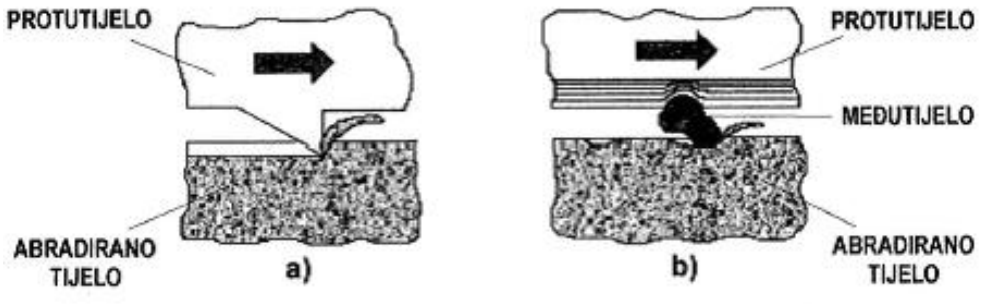
- prema strukturi tribosustava u kojem se zbiva abrazija
- prema međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine
- prema tvrdoći abraziva i materijala

I. Ovisno o strukturi tribosustava u kojem se zbiva abrazija

a) abrazija u dodiru dvaju tijela – tribosustav se sastoji od dva dijela, abrazivno tijelo i abrazivno protutijelo

b) abrazija u dodiru triju tijela – tribosustav se sastoji od tri dijela, abrazivnog tijela, abrazivnog protutijela i slobodnih čestica (međutijela). Čestice se gibaju između funkcionalnih dijelova i pritom djeluju abrazijski.

Odnošenje materijala u dodiru dva tijela puno je intenzivnije nego u slučaju abrazije tri tijela. Razlog tome je što čestice samo mali dio vremena provode u odnošenju materijala a ostatak vremena se slobodno kotrljaju u međuprostoru. Abrazija u dodiru dva tijela i tri tijela može se vidjeti na slici 8.

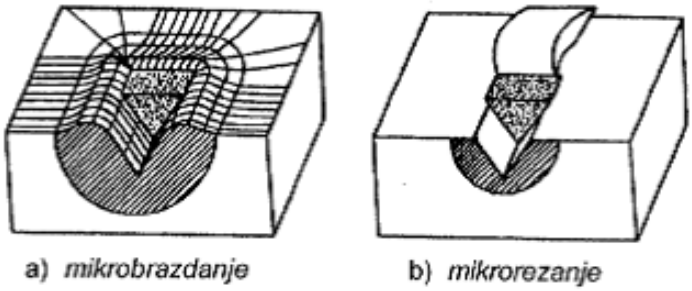


Slika 8. Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [4]

II. Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine

a) Mikrobrazdanje – predstavlja odnošenje materijala razmjerno volumenu brazde (udubine) nastale plastičnom deformacijom pri prolaze jedne abrazijske čestice, rubovi brazde odvajaju se kao produkti trošenja. U povoljnijem slučaju materijal može samo biti potisnut u stranu u obliku bočnih „grebena“, bez da nastanu produkti trošenja.

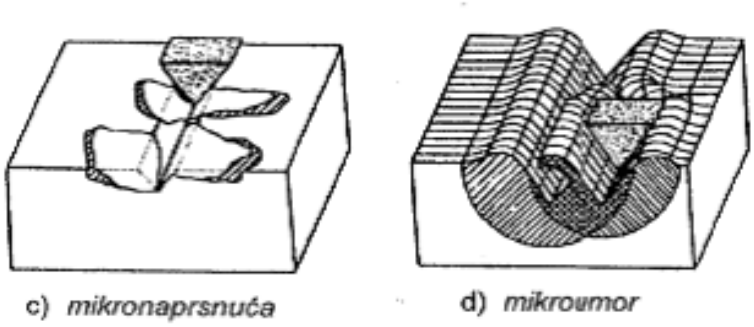
b) Mikrorezanje – odnošenje materijala razmjerno volumenu zareza nastalog prolaskom abrazivne čestice. Shematski prikaz može se vidjeti na slici 9.



Slika 9. Shematski prikaz mikrobrazdanja i mikrorezanja [4]

c) Mikronaprsnuća – odnošenje materijala s krhke površine trošenja mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina. S površine se u ovom slučaju odnose veći djelići materijala.

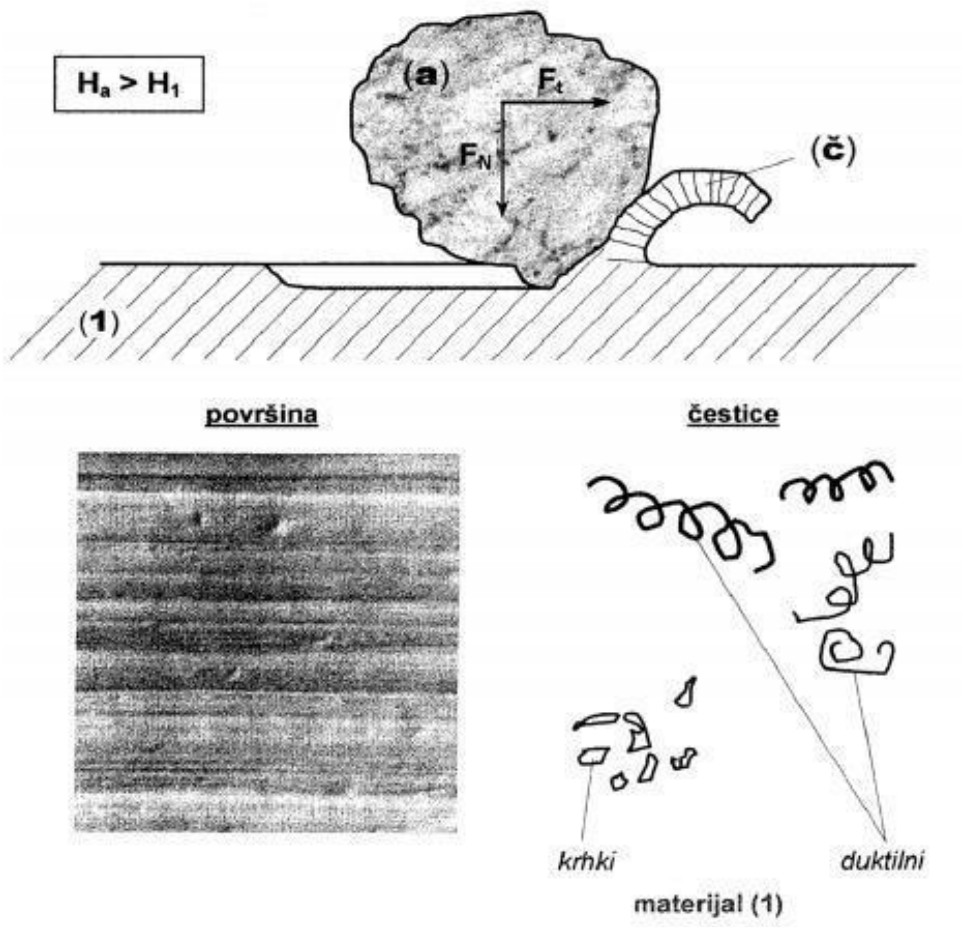
d) Mikroumor – odnošenje materijala mehanizmom umora površine uslijed promjenjivog opterećenja. Zbog trenutne deformacije materijala nastaju mikropukotine koje se šire i koje kasnije uzrokuju odvajanje dijelova materijala trošene površine. Mikroumor nastaje i zbog višestrukog i ponavljajućeg mehanizma mikrobrazdanja. Shematski prikaz na slici 10.



Slika 10. Shematski prikaz mikronaprsnuća i mikroumora [4]

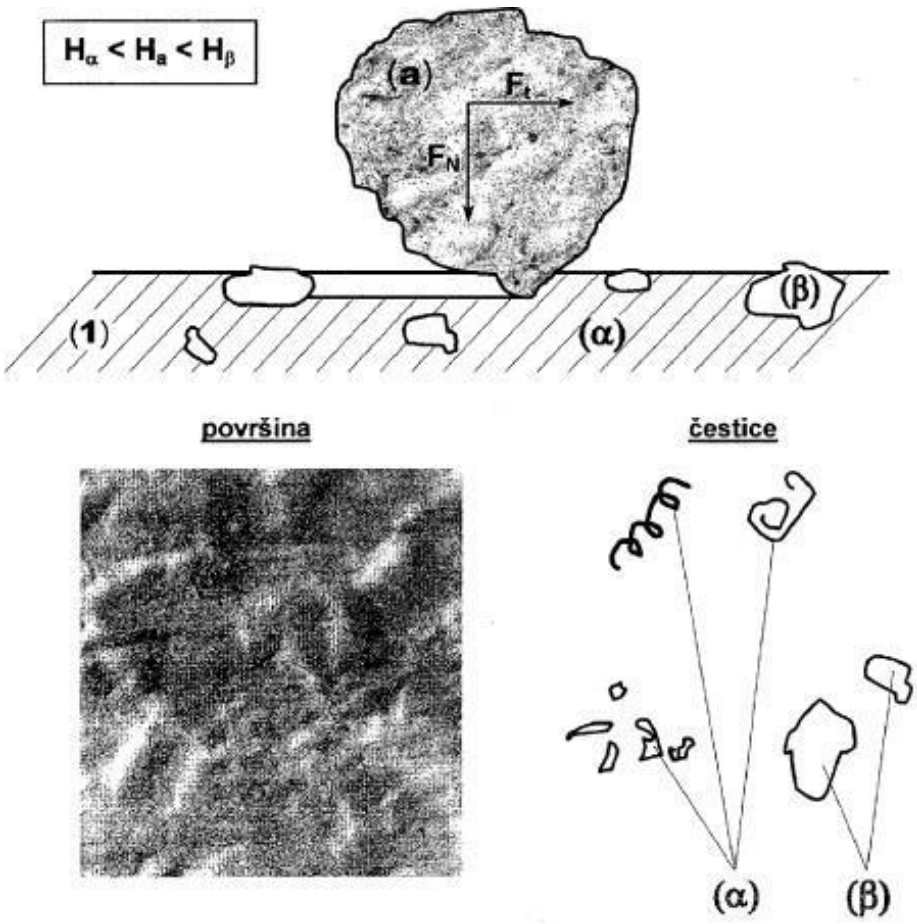
III. Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala koji se troši

a) „Čista abrazija“ – događa se kada je tvrdoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge (1). Površina trošenja izgleda izbrazdano, a čestice trošenja mogu izgledati kao spiralne strugotine ukoliko je abradirani materijal duktilan (žilav) ili kao lomljene strugotine ako je abradirani materijal krhak. Žilavi materijal može podnijeti puno veću deformaciju prije loma (može apsorbirati više energije), što je razlog kontinuirane strugotine.
Shematski prikaz „čiste“ abrazije može se vidjeti na slici 11. Prikazan je i izgled trošene površine i oblik strugotine.



Slika 11. „Čista“ abrazija [4]

b) Selektivna abrazija – događa se kada je tvrdoća abraziva veća samo od nekih dijelova trošene površine. U abradiranom materijalu postoji faza koja je tvrđa od abraziva i ona se ne troši. Troši se samo zahvaćen sloj mekše faze. Površina izgleda izbrazdano, s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze dijelovi tvrđe faze.
Shematski prikaz selektivne abrazije može se vidjeti na slici 12.

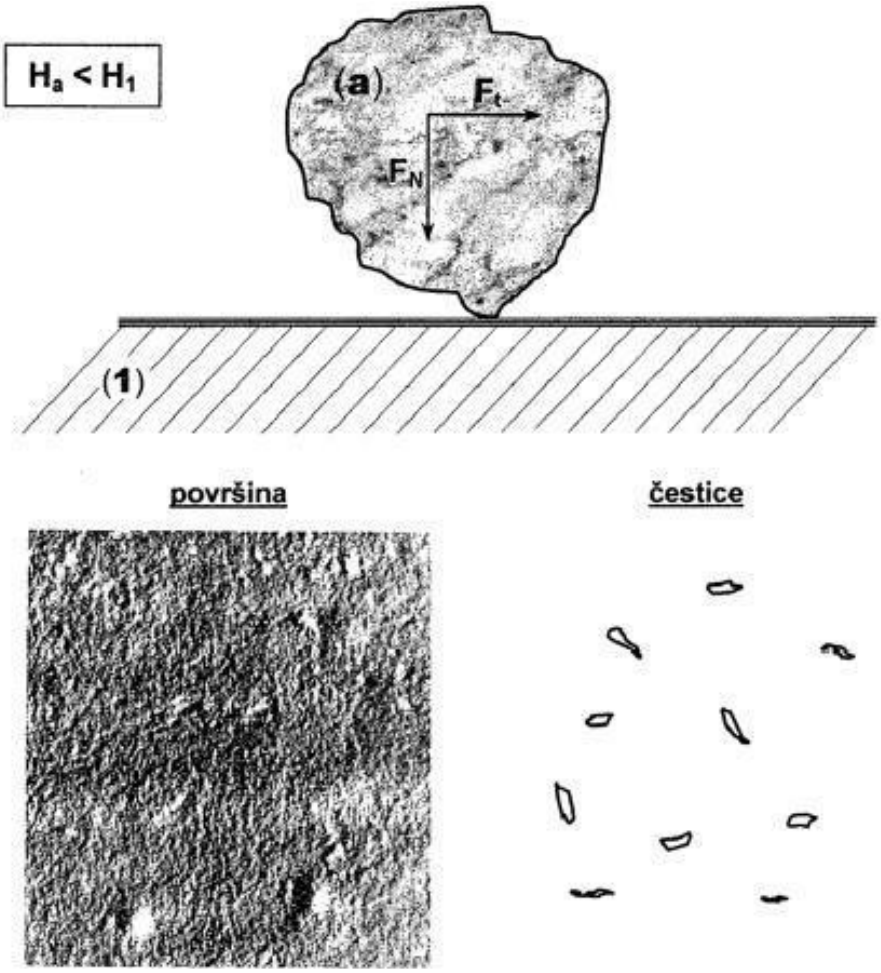


Slika 12. Selektivna abrazija [4]

c) „Nulta“ abrazija – nastupa kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina trošenja ima polirani izgled, a čestice trošenja izgledaju kao sitne ljuskice koje potječu od vanjskog graničnog sloja trošenog materijala.

Nulta abrazija najčešće će se pojaviti na površinama koje su prevučene ili modificirane jednom od tehnologija inženjerstva površina (nitriranje, boriranje, vanadiranje, PVD, CVD, itd.).

Shematski prikaz nulte abrazija može se vidjeti na slici 13.



Slika 13. „Nulta“ abrazija [4]

3.3. Otpornost na abraziju

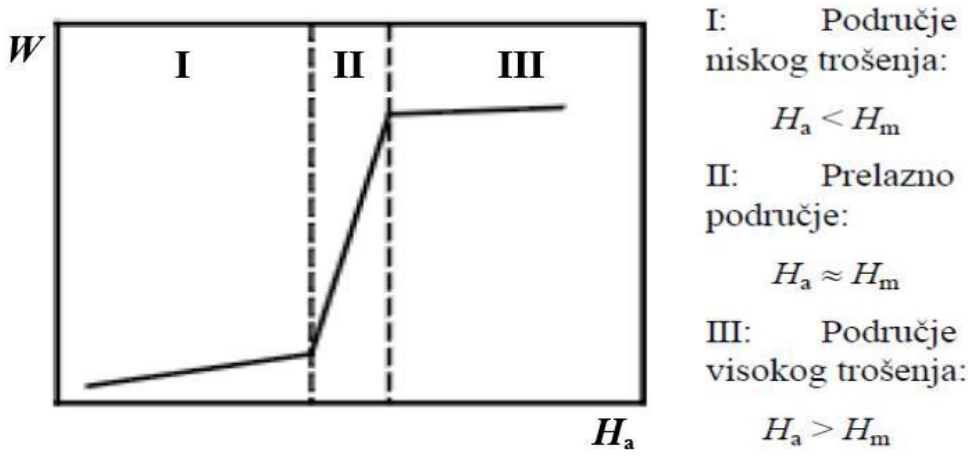
Najznačajniji čimbenik otpornosti na I. fazu abrazije (prodiranje abraziva u površinu) jest omjer tvrdoće abraziva i tvrdoće materijala trošene površine. Materijal će biti otporniji na abrazijsko trošenje što je njegova tvrdoća veća. Utjecajni čimbenik na II. fazu abrazije (istiskivanje materijala) jest način napredovanja pukotine u materijali koji može biti duktilni, krhki ili umor površine.

U tablici 1. mogu se vidjeti iznosi tvrdoće nekih abraziva i faznih konstituenata.

Tablica 1. Tvrdoća abraziva i faznih konstituenata [4]

Minerali (abrazivi)	Tvrdoća *HV*		Materijali (strukturni konstituenti)
Gips	36		
		70 - 200	Ferit
Vapnenac, $CaCO_3$	140		
Fluorit, CaF_2	190		
		170 - 230	Austenit, 12% Mn
		250 - 320	Perlit, nelegirani
		250 - 350	Austenit, niskolegirani
Dolomit	370	300 - 460	Perlit, legirani
		300 - 600	Austenit, ljevovi s visokim % Cr
Staklo	500 - 795	500 - 1010	Martenzit
Apatit	540		
Feldspat	600 - 750		
Kremen	800 - 950	840 - 1100	Cementit
Kvarc, SiO_2	900 - 1750		
		1200 - 1600	Cr-karbid, $(Fe, Cr)_7C_3$
Topaz	1430		
		1300 - 1500	Fe-borid, Fe_2B
		1500	Mo-karbid, Mo_2C
		1650	Cr-karbid, $Cr_{23}C_6$
Korund, Al_2O_3	1800 - 2100	1800	Cr-karbid, $(Fe, Cr)_{23}C_6$
		1600 - 2100	Fe-borid, FeB
		1800 - 2250	Cr-borid, CrB_2
		2000 - 2400	Nb-karbid
		2150	Cr-borid, CrB
		2200	Cr-karbid, Cr_7C_3
		2280	Cr-karbid, Cr_3C_2
		2400	W-karbid, WC
		2700	W-borid, W_2B_5
Karborund, SiC	2600 - 3500	2700 - 3800	Cr-karboborid, $Cr_2(BC)$
		2800 - 2940	V-karbid, VC
		3000	W-karbid, W_2C
		3200	Ti-karbid, TiC
		3400	Ti-borid, TiB_2
		3700	B-karbid, B_4C
		3750	W-borid, WB
Dijamant	10000		

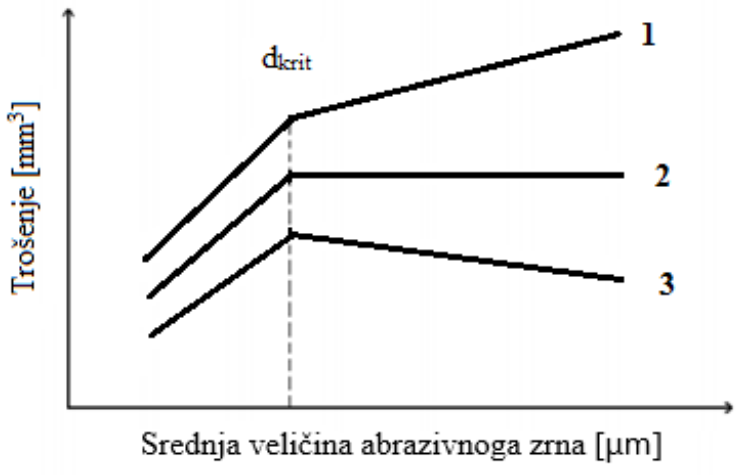
Intenzitet abrazije u ovisnosti o tvrdoćama abraziva i materijala koji se troši može se vidjeti na slici 14. Iz slike je vidljivo da će do trošenja doći čak i ako je tvrdoća abraziva (H_a) manja od tvrdoće materijala (H_m) ali u vrlo malom iznosu. Kad tvrdoća abraziva dosegne tvrdoću materijala intenzitet trošenja (W) naglo raste i ostaje visok s daljnjim povećanjem tvrdoće abraziva.



Slika 14. Ovisnost abrazijskog trošenja o međusobnom odnosu tvrdoća

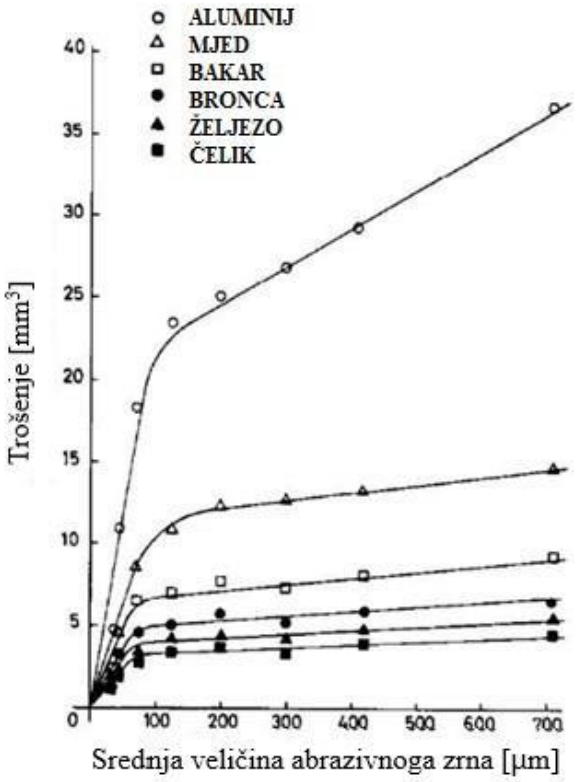
3.4. Kritična veličina abrazivnog zrna

Fenomen kritične veličine abrazivnog zrna vrlo je bitan faktor pri ispitivanju i analizi rezultata abrazijskog trošenja. Povećanjem veličine abrazivnog zrna linearno se povećava trošenje materijala (gubitak mase). Ovo vrijedi sve do određene točke koja se naziva kritična veličina abrazivnog zrna (eng. Critical particle size - CPS) nakon koje se gubitak mase smanjuje. Moguće su tri varijante nakon dostizanja kritične veličine abrazivnog zrna. Gubitak mase se nastavlja ali u manjoj mjeri, gubitak mase ostaje konstantan i moguće je smanjenje gubitka mase daljnjim povećanjem veličine zrna. Dijagramski prikaz ove tri krivulje može se vidjeti na slici 15.



Slika 15. Kritična veličina abrazivnog zrna, utjecaj veličine zrna na abrazivno trošenje [5]

Veličina abrazivnih zrna najčešće se izražava kao srednji promjer abrazivnih zrna d_{sr} u mikrometrima. Shodno tomu kritična veličina abrazivnih zrna izražava se kao kritični promjer zrna d_{krit} također u mikrometrima. Različiti metalni materijali imaju različitu vrijednost kritičnog promjera zrna i drukčije se ponašaju nakon prelaska te točke što se može vidjeti na slici 16. Ponašanje nakon prelaska kritične točke ovisi o mnogo faktora kao što je vrsta materijala, mikrostruktura, režim toplinske obrade, itd.



Slika 16. Intenzitet trošenja u ovisnosti o srednjoj vrijednosti promjera abrazivnih zrna za različite materijale [6]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Cilj rada

Osnovni cilj rada je ispitati abrazijsku otpornost nehrđajućih čeličnih ljevova i utvrditi postoji li kritična veličina abrazivnog zrna. Istovremeno će se analizirati mikrostruktura i mikrotvrdoća ispitnih uzoraka te će ovi rezultati povezati s rezultatima ispitivanja abrazijske otpornosti.

U tu svrhu provedena su sljedeća ispitivanja:

- Ispitivanje abrazijske otpornosti
- Analiza mikrostrukture
- Mjerenje mikrotvrdoće

4.2. Materijali za ispitivanje

Kao materijal za ispitivanje korištena su dva uzorka od korozijski postojanih čeličnih ljevova. Jedan je austenitni nehrđajući čelični lijev oznake GX5CrNi 19-10, a drugi je dupleks nehrđajući čelični lijev oznake GX2CrNiMoN 25-6-3.

Njihov kemijski sastav može se vidjeti u tablicama 2 i 3.

Tablica 2. Kemijski sastav austenitnog nehrđajućeg lijeva oznake GX5CrNi19-10 [7]

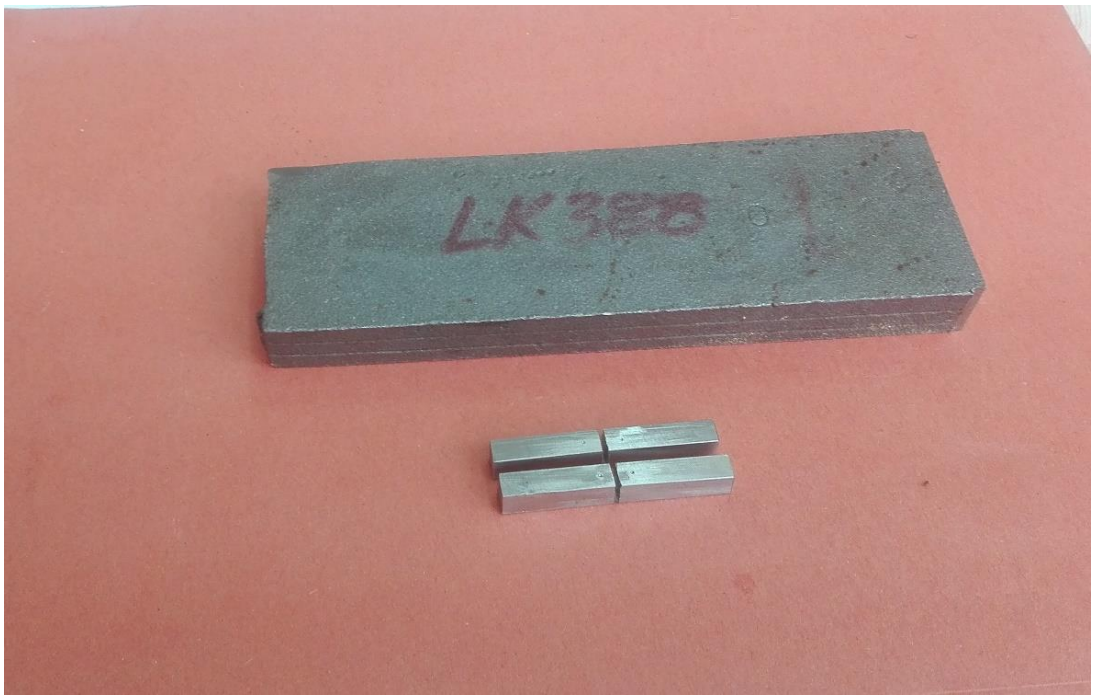
Kemijski element	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	Fe
Udio, %	max 0,07	18-20	9-11	max 1,5	max 1,5	max 0,04	max 0,03	ostatak

Tablica 3. Kemijski sastav dupleks nehrđajućeg lijeva oznake GX2CrNiMoN25-6-3 [8]

Kemijski element	C	Cr	Ni	Mo	N	Si	Mn	P	S	Fe
Udio, %	max 0,03	24,5-26,5	5,5-7	2,5-3,5	0,12-0,25	max 1	max 2	max 0,035	max 0,025	ostatak

Uzorci za sva potrebna ispitivanja izrezani su izrezani u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Izrezana su po dva uzorka iz svakog odljevka, jedan je korišten je za ispitivanje trošenja, a na drugom je mjerena mikrotvrdoća i analizirana mikrostruktura. Uzorci su kvadratnog poprečnog presjeka 5×5 mm^2, austenitni uzorak je kraći a

dupleks uzorak je duži. Dupleks čelični lijev pokazuje magnetna svojstva dok austenitni čelični lijev nije magnetičan. Izrezani uzorci mogu se vidjeti na slikama 17 i 18.



Slika 17. Izrezani uzorci austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva



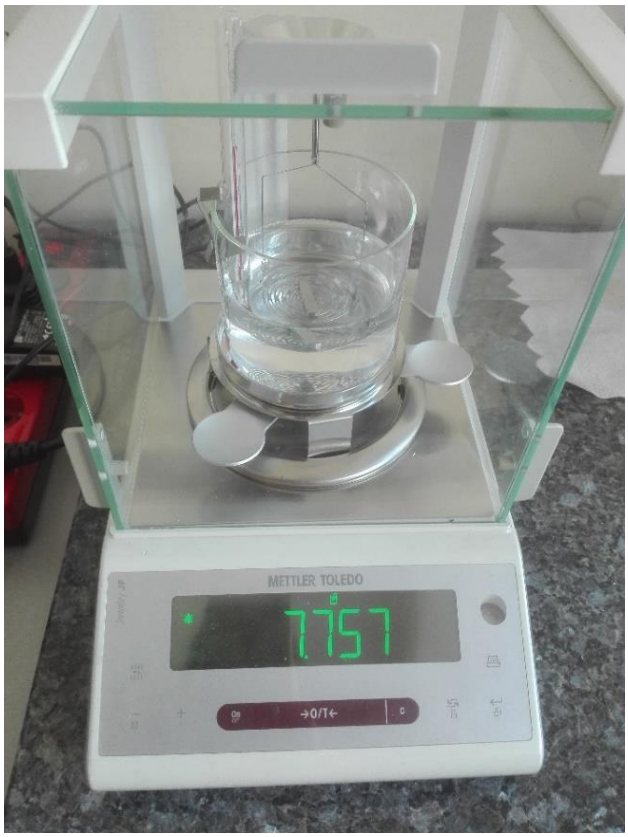
Slika 18. Izrezani uzorci dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva

U sklopu planiranih ispitivanja izmjerena je gustoća materijala kako bi se iz promjene mase uzoraka mogao odrediti gubitak volumena pri ispitivanju abrazijskog trošenja. To je nužno ako se želi uspoređivati abrazijska otpornost materijala s različitom gustoćom. Gustoća uzoraka je izmjerena na analitičkoj vagi *Mettler Toledo JP703C* u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Princip rada vage temelji se na Arhimedovu zakonu koji kaže da je tijelo uronjeno u tekućinu lakše za težinu istisnute tekućine. Prvo je potrebno izvagati težinu uzorka na zraku, a nakon toga se ponovno važe, ali u mediju poznate gustoće, koji je u ovom slučaju voda pomiješana sa medijem za smanjenje površinske napetosti.

Gustoća je izmjerena pri temperaturi od 26,6°C; nakon tri mjerenja srednja vrijednost gustoće autenitnog i dupleks uzorka iznosi:

- ρ_a = 7,8883 g/cm^3
- ρ_d = 7,7293 g/cm^3

Uređaj za mjerenje gustoće može se vidjeti na slici 19.



Slika 19. Uređaj za mjerenje gustoće

4.3. Provođenje ispitivanja

4.3.1. Ispitivanje abrazijske otpornosti

Abrazijska otpornost ispitana je na uređaju *Taber abrader* u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Prilikom izrezivanja posebno su označene vanjske površine odljevka, a posebno unutarnje površine (sredina odljevka) pretpostavljajući da postoji razlika u mikrostrukturi zbog različitog vremena skrućivanja koje bi moglo utjecati na rezultate ispitivanja. Kraće vrijeme hlađenja uzrokuje nastanak krupnijeg kristalnog zrna u mikrostrukturi materijala, dok duže vrijeme hlađenja uzrokuje sitnije kristalno zrno.

Ukupno su ispitana četiri uzorka označena simbolima: A_v, A_u, D_v, i D_u. Uzorci izrezani iz austenitnog odljevka označeni su simbolima A, a uzorci izrezani iz dupleks čeličnog lijeva označeni su sa simbolom D. Indeksi „v“ i „u“ predstavljaju vanjsku odnosno unutarnju površinu odljevka. Na svim uzorcima ispitivanje otpornosti na abraziju provedeno je na pet različitih kvaliteta brusnih papira, ukupno dvadeset ispitivanja.

Jedno ispitivanje sastoji se od tri ciklusa trošenja po 100 okretaja za svaku kvalitetu brusnog papira. Ispitni uzorak postavlja se u nosač, steže se te se oslanja na površinu abrazivnog papira konstantnom silom tijekom svih ispitivanja. Uređaj rotira brzinom od 1 o/s dok je obodna brzina na rubu diska, promjera 125 mm, 0,251 m/s. Uzorci su pritisnuti na brusni papir silom od 4,91 N. Uređaj, zajedno s uzorkom i brusnim papirom, može se vidjeti na slici 20.



Slika 20. Taber abrader

Početna masa i promjena mase ispitnih uzoraka izmjereni su u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na uređaju *OHAUS Analytical Plus* (točnost na pet decimala) koji se može vidjeti na slici 21.



Slika 21. Uređaj za mjerenje mase (digitalna vaga)

Abrazijsko ispitivanje provedeno je na pet brusnih papira različitih granulacija. Materijal abrazivnih čestica brusnih papira je SiC. Broj u nazivu kvalitete brusnog papira označava broj otvora na situ kvadratnom inču. Što je papir veće granulacije srednji promjer abrazivnog zrna je manji, što se može vidjeti u tablici 4.

Tablica 4. Kvalitete brusnih papira i srednji promjeri abrazivnog zrna (ISO/FEPA)

Kvaliteta brusnog papira	Srednji promjer abrazivnog zrna d_{sr} [μm]
P600	25,8
P400	35,0
P280	52,2
P120	125
P80	201

Svakom uzorku se nakon tri ciklusa po 100 okretaja na određenom brusnom papiru mjeri promjena mase. Preko gustoće dolazi se do promjene volumena. Dijeljenjem promjene volumena s površinom poprečnog presjeka dolazi se do intenziteta trošenja. Ukoliko se stvarna površina presjeka na poklapa s geometrijskom površinom, intenzitet trošenja može se izraziti samo preko promjene volumena u mm^3.

4.3.2. Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2

Abrazijska otpornost i tvrdoća materijala su usko povezana svojstva, ali nisu potpuno jednoznačna. Što je tvrdoća materijala veća, otpornost na abrazijsko trošenje trebala bi također biti veća. Kako bi se pružio bolji uvid u povezanost ovih svojstava, na svim uzorcima provedeno je mjerenje mikrotvrdoće.

Mjerenje tvrdoće provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na uređaju PMT-3, metodom prema Vickersu gdje je indentor četverostrana dijamantna piramida. Izmjerene su vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 pri opterećenju utegom mase od 200 g.

Provedena su tri mjerenja mikrotvrdoće na svakom uzorku te je izračunata srednja vrijednost.

Uređaj za mjerenje tvrdoće može se vidjeti na slici 22.



Slika 22. Uređaj za mjerenje tvrdoće

4.3.3. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju, na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitni uzorci najprije su zaliveni u polimernu masu, zatim su brušeni, polirani i nagriženi kako bi se jasno vidjela mikrostruktura uzoraka.

Površina poliranih uzoraka analizirana je na optičkom mikroskopu OLYMPUS GX 51 pri povećanjima 50×, 100× i 200×. U poliranom stanju nisu uočene nikakve nepravilnosti na analiziranoj površini.

Kako bi se otkrila mikrostruktura materijala, provedeno je elektrokemijsko nagrizanje.

Na slici 23 može se vidjeti optički mikroskop.



Slika 23. Optički mikroskop

4.4. Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje prikazani su u tablici 5.

Za sva četiri uzorka navedene su srednje vrijednosti gubitka mase pri ispitivanju s brusnim papirima različite kvalitete, od finijeg prema grubljem.

Tablica 5. Gubitak mase pri ispitivanju abrazijskog trošenja za sve brusne papire

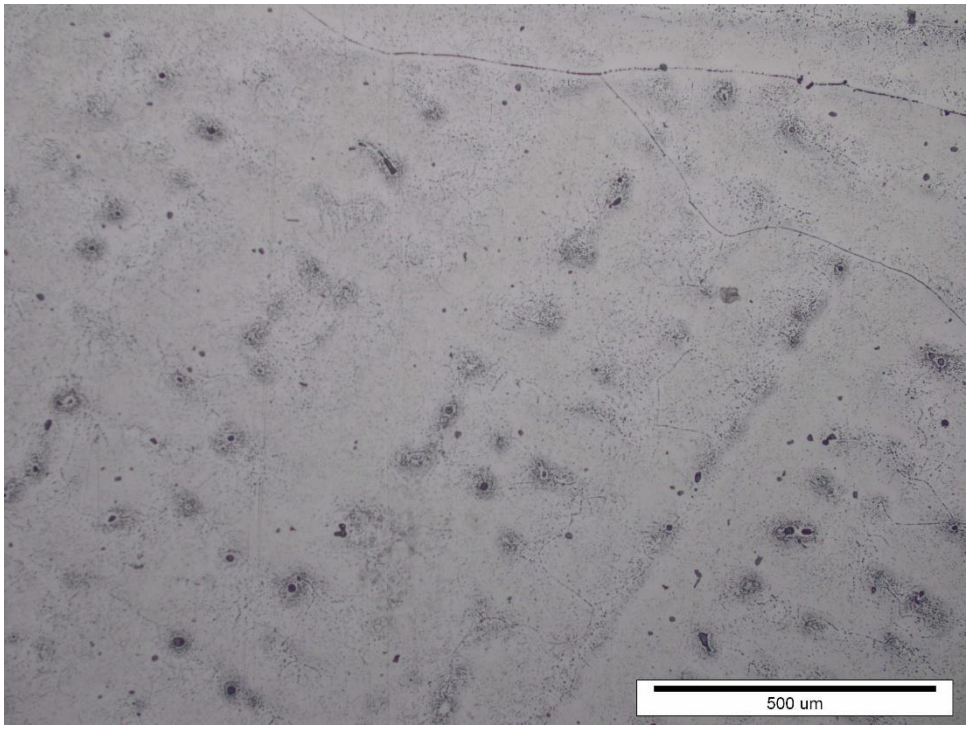
Brusni papiri	Gubitak mase, mg			
	Uzorak A_v	Uzorak D_v	Uzorak A_u	Uzorak D_u
P600	0,31	0,22	0,31	0,42
P400	0.37	0,18	1,26	0,52
P280	1,79	1,18	0,99	0,75
P120	1,57	0,74	1,02	1,17
P80	0,85	0,59	1,38	1,26
Ukupno	**4,89**	**2,91**	**4,96**	**4,12**

Rezultati mjerenja tvrdoće prikazani su u tablici 6. Provedena su 3 mjerenja i izračunata je srednja vrijednost mikrotvrdoće.

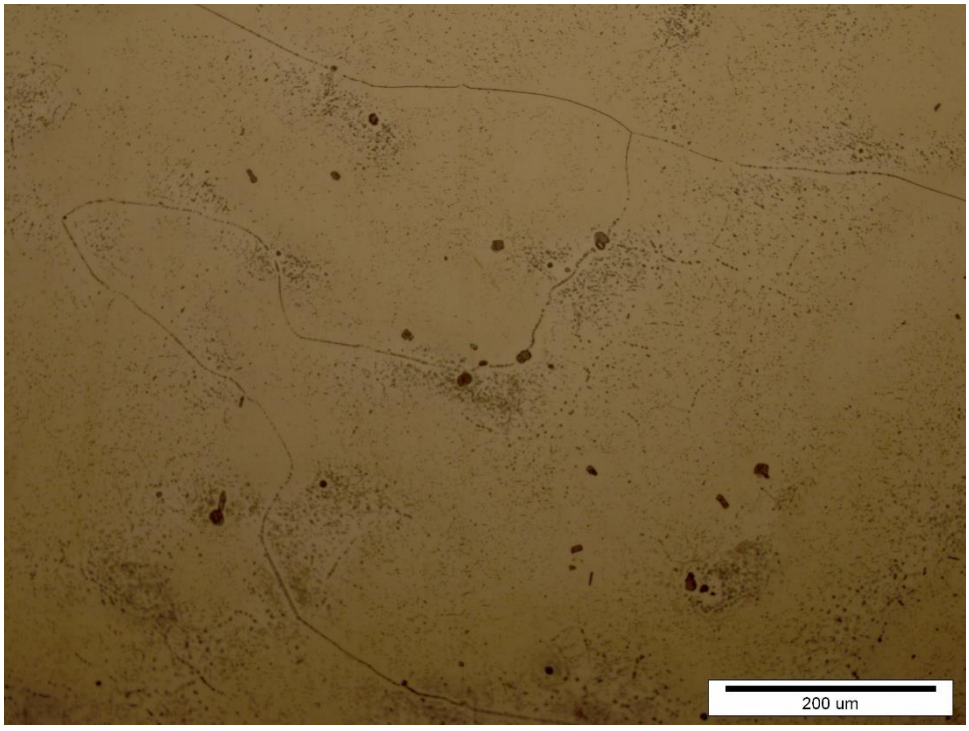
Tablica 6. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2

Mjerenje	Mikrotvrdoća uzoraka			
	Uzorak A_v	Uzorak D_v	Uzorak A_u	Uzorak D_u
1	188	376	148	415
2	181	355	155	369
3	176	432	146	362
Srednja vrijednost	**181,7**	**387,7**	**149,7**	**380,6**

Na slikama 24 i 25 vidljiva je mikrostrukura austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva s ruba odljevka u nagriženom stanju, snimljena pri različitim povećanjima. Mikrostruktura je monofazna i sastoji se samo od austenita.

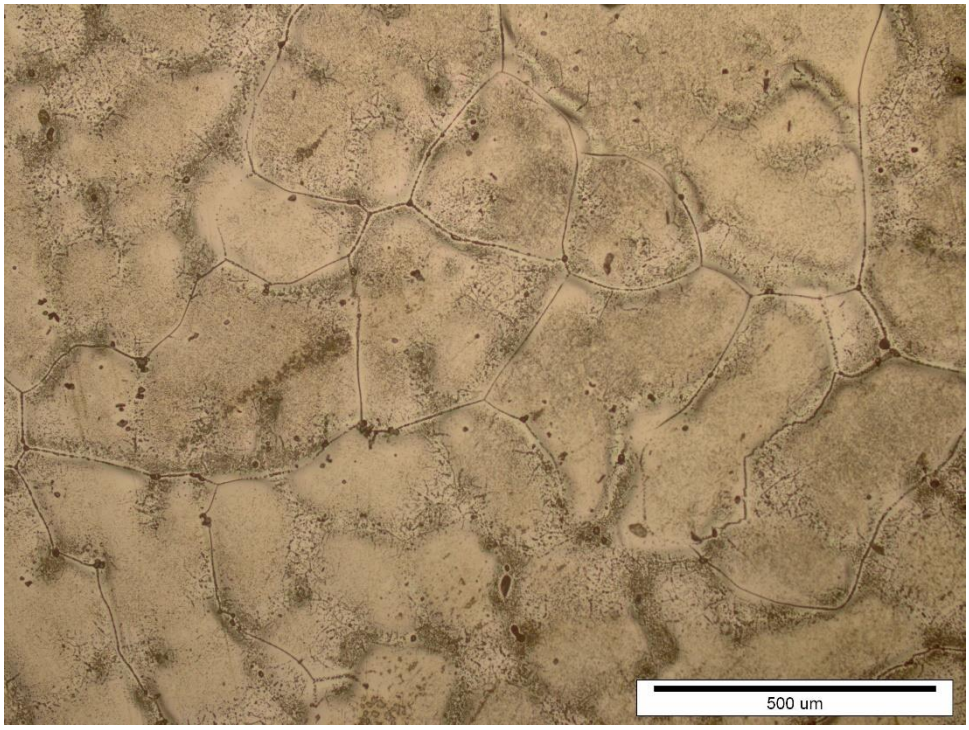


Slika 24. Mikrostruktura uzorka A_v, snimljena pri povećanju 100×

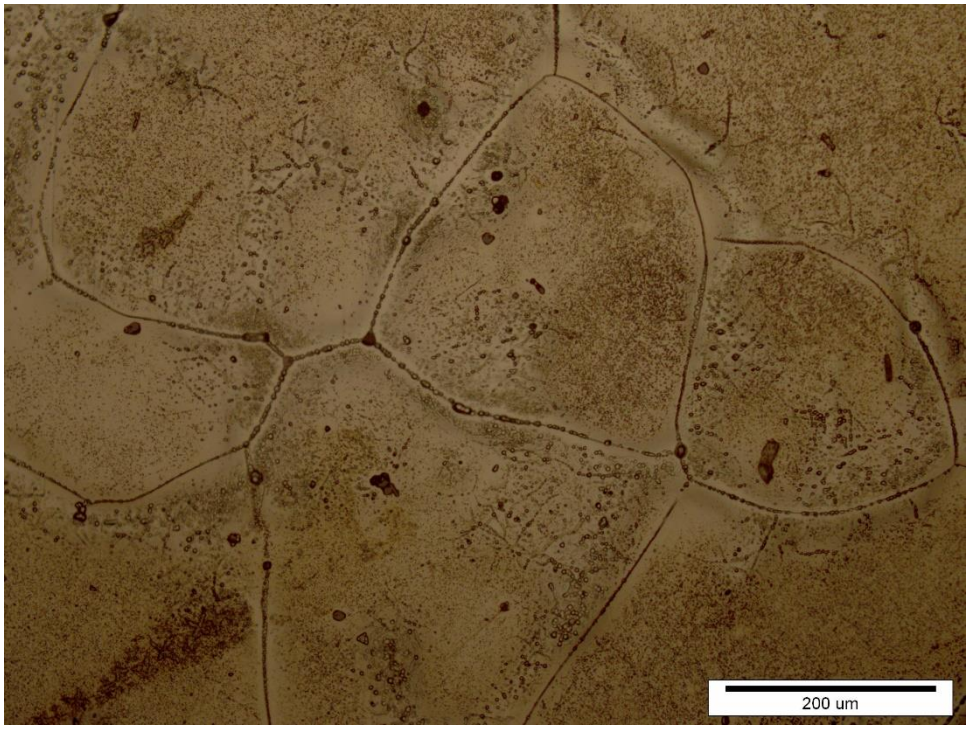


Slika 25. Mikrostruktura uzorka A_v, snimljena pri povećanju 200×

Na slikama 26 i 27 vidljiva je mikrostrukura austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva iz sredine odljevka, u nagriženom stanju. I ovdje je mikrostruktura monofazna i sastoji se samo od austenita. Kristalna zrna su nešto sitnija nego na rubu uzorka.

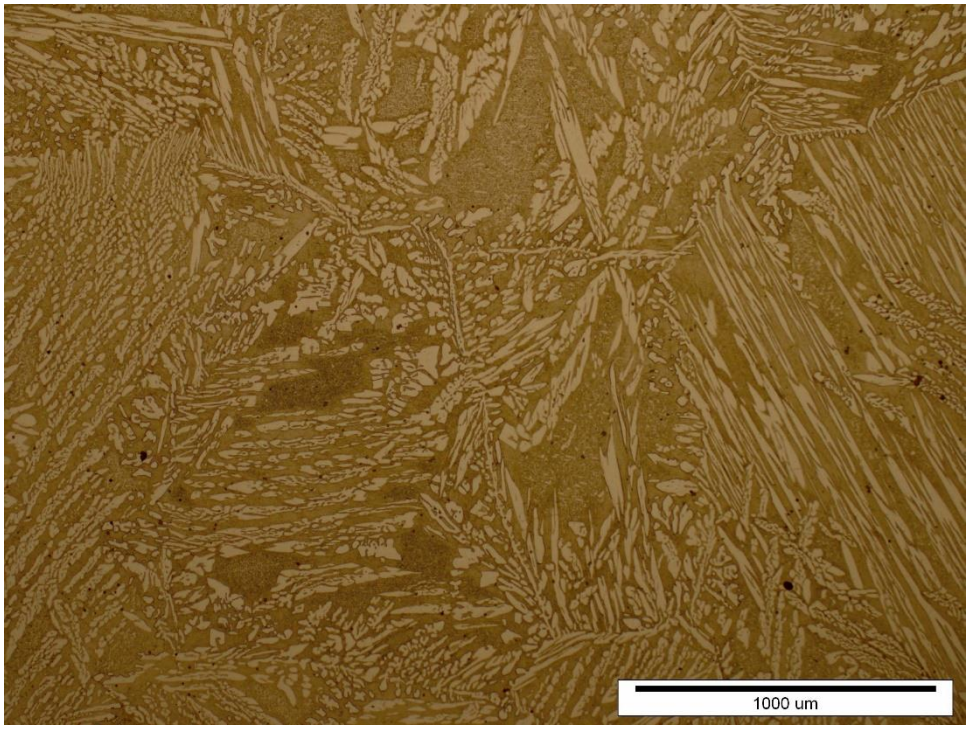


Slika 26. Mikrostruktura uzorka A_u, snimljena pri povećanju 100×

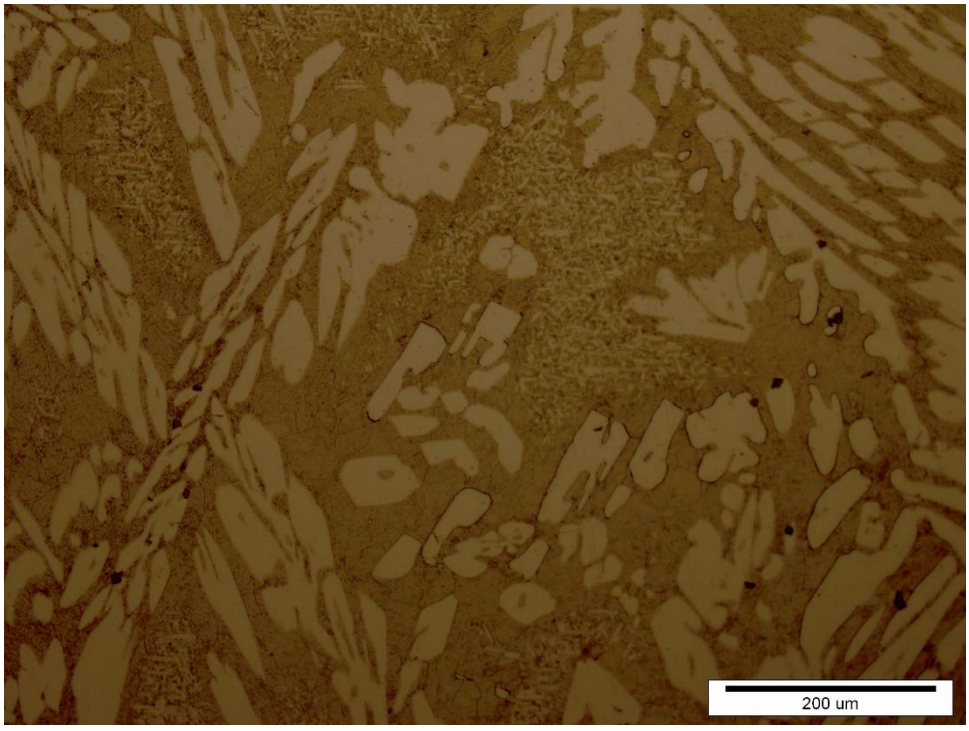


Slika 27. Mikrostruktura uzorka A_u, snimljena pri povećanju 200×

Na slikama 28 i 29 vidljiva je mikrostrukura dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva s ruba odljevka u nagriženom stanju. Mikrostruktura je tipična ljevačka i sastoji se od austenita (svjetlija zrna) i ferita (tamnija područja) u podjednakoj količini (50:50).

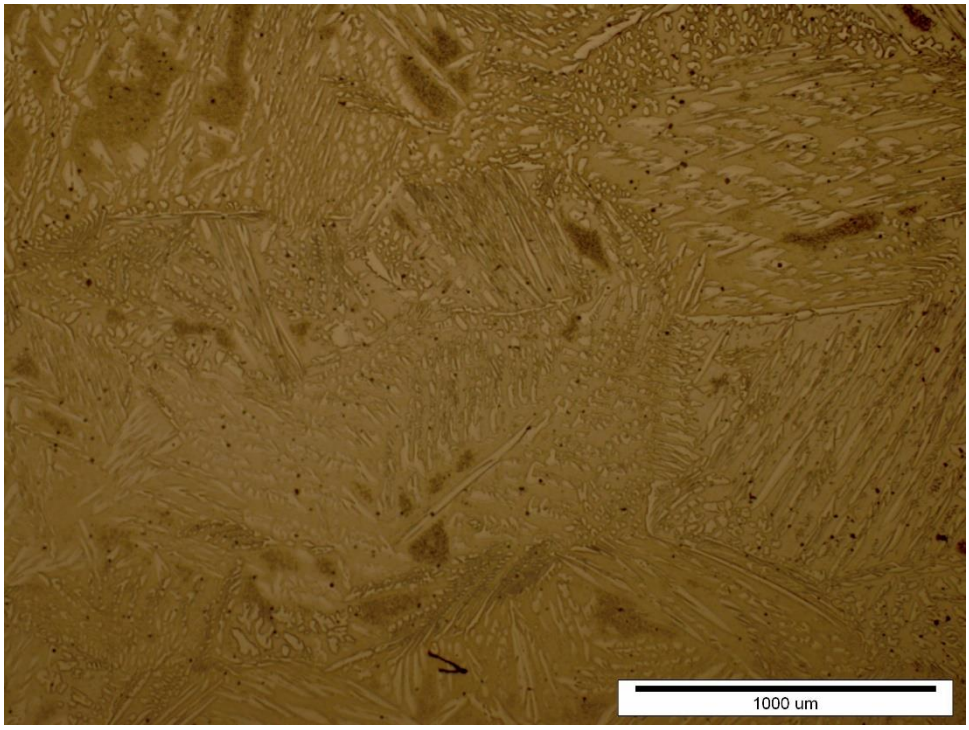


Slika 28. Mikrostruktura uzorka D_v, snimljena pri povećanju 50×

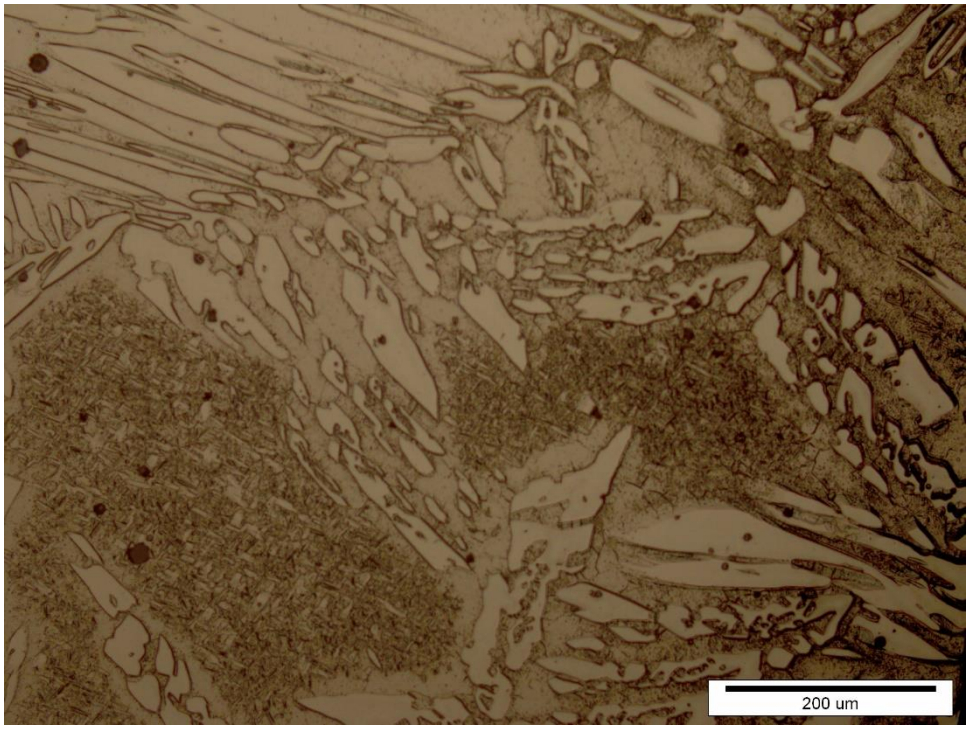


Slika 29. Mikrostruktura uzorka D_v, snimljena pri povećanju 200×

Na slikama 30 i 31 vidljiva je mikrostrukura dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva iz sredine odljevka u nagriženom stanju. U odnosu na rub uzorka kristalna zrna su nešto sitnija a omjer ferita i austenita je i ovdje izbalansiran.



Slika 30. Mikrostruktura uzorka D_u, snimljena pri povećanju 50×



Slika 31. Mikrostruktura uzorka D_v, snimljena pri povećanju 200×

4.5. Analiza rezultata

Kada se uspoređuje abrazijska otpornost materijala različite gustoće nužno je rezultate mjerenja gubitka mase prevesti u gubitak volumena.

Na slikama od 32 do 36 dijagramski su prikazane vrijednosti gubitka volumena svih uzoraka za pojedinačne brusne papire, a na slici 37 prikazan je kumulativni gubitak volumena na svim brusnim papirima za sva četiri uzorka.

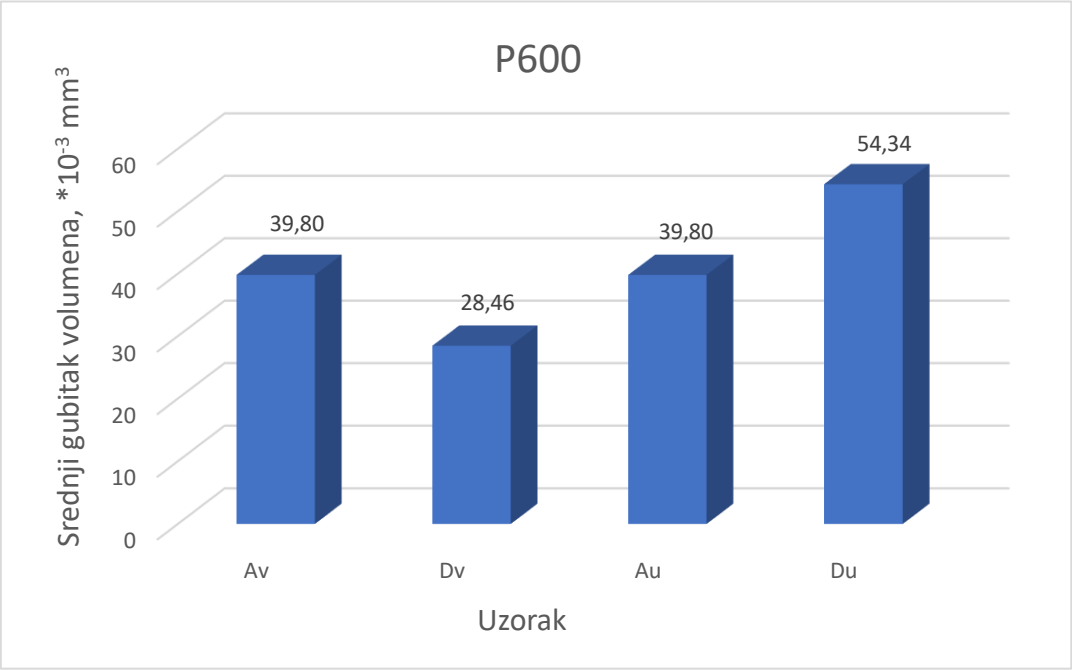
Na svim brusnim papirima trošenje vanjskog ruba dupleks čeličnog lijeva u odnosu na vanjski rub austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva je znatno manje. To se podudara s vrijednostima izmjerene mikrotvrdoće rubnih dijelova kod oba lijeva, koja je puno veća kod dupleks čelika.

Kod većine brusnih papira (P400, P280 i P80) gubitak volumena u sredini odljevka veći je kod austenitnog nego kod dupleks čeličnog lijeva, što se podudara s vrijednostima mikrotvrdoće koja je kod dupleks čelika znatno viša.

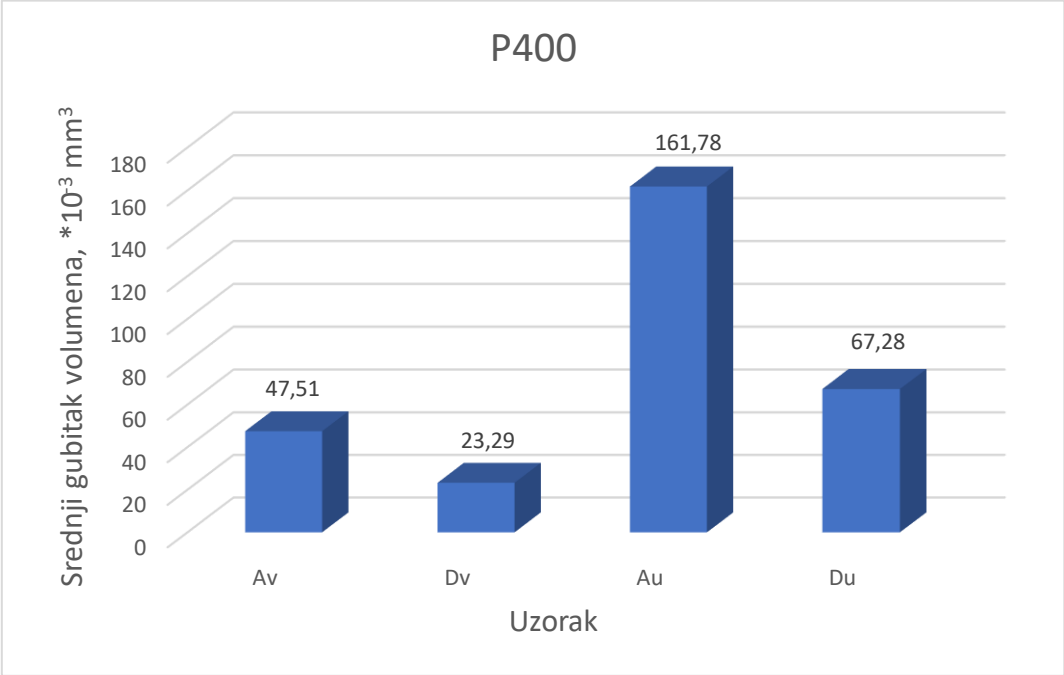
Ako se usporedi otpornost na trošenje iste vrste lijeva na rubu i u sredini odljevka može se zaključiti da se vrijednosti kod dupleks čelika podudaraju s vrijednostima tvrdoće (na 4 od ukupno 5 kvaliteta brusnih papira). Kod austenitnog čeličnog lijeva, kod kojeg je tvrdoća na rubu viša nego u sredini, nema direktne veze između vrijednosti tvrdoće i otpornosti na abrazijsko trošenje.

Ako se promatra i usporedi kumulativni gubitak volumena za sve uzorke uočava se veće trošenje austenitnog u odnosu na dupleks čelični lijev. Razlika između intenziteta trošenja na rubu i u sredini odljevka kod austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva je vrlo mala (9 $mm^3 \times 10^{-3}$), dok je kod dupleks lijeva puno veća (157 $mm^3 \times 10^{-3}$). Razlike u tvrdoći rub-sredina su puno veće kod austenitnog (32HV0,2) nego kod dupleks čeličnog lijeva (7HV0,2), što nije u suglasju s rezultatima ispitivanja abrazijskog trošenja.

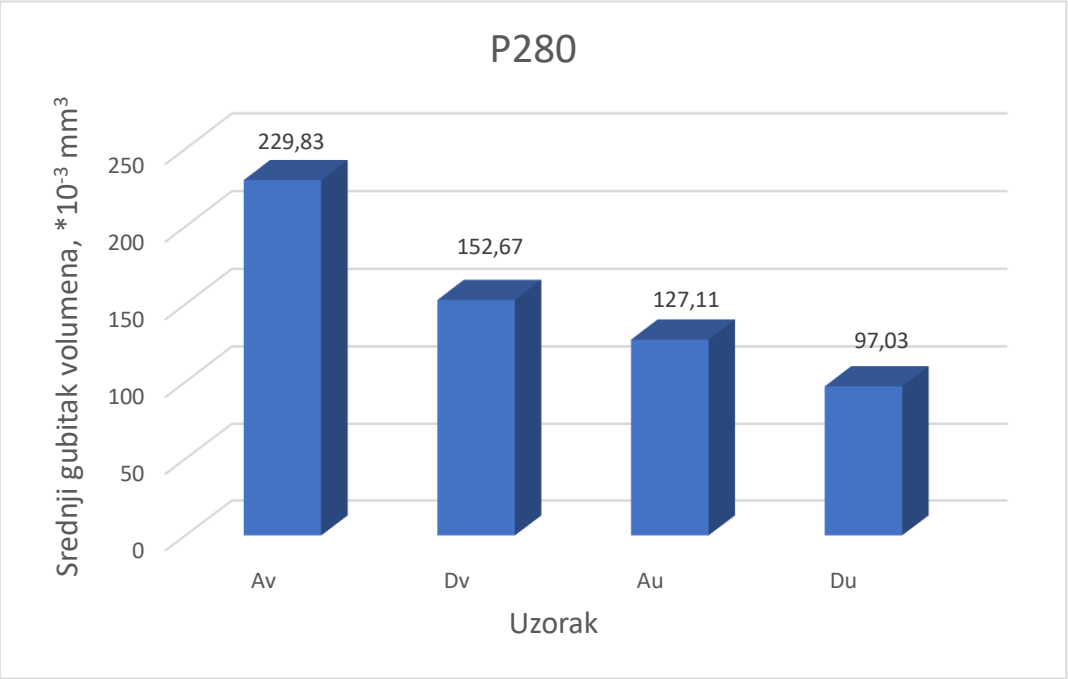
Na slikama 38 do 41 prikazan je gubitak volumena na svim brusnim papirima, pojedinačno za sve uzorke. Na najfinijim brusnim papirima (P600 i P400) trošenje je znatno niže nego kod grubljih brusnih papira. Maksimalno trošenje izmjereno je za vanjske rubove odljevka kod obje vrste lijeva na papiru kvalitete P280, dok je maksimalno trošenje sredine odljevaka ostvareno na papiru P80.



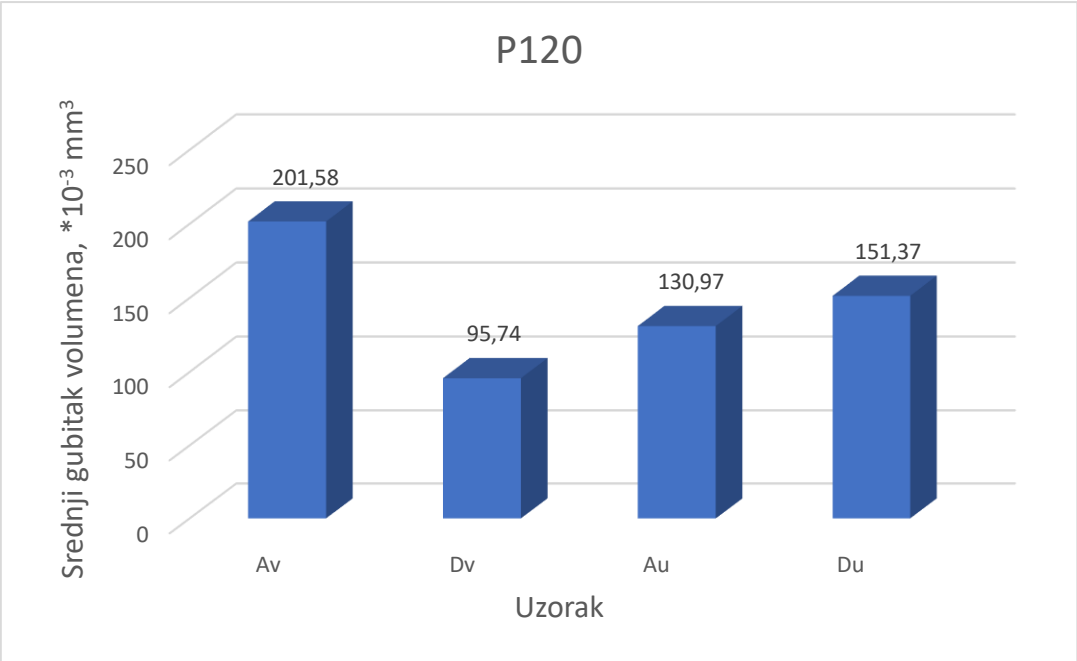
Slika 32. Gubitak volumena na brusnom papiru P600



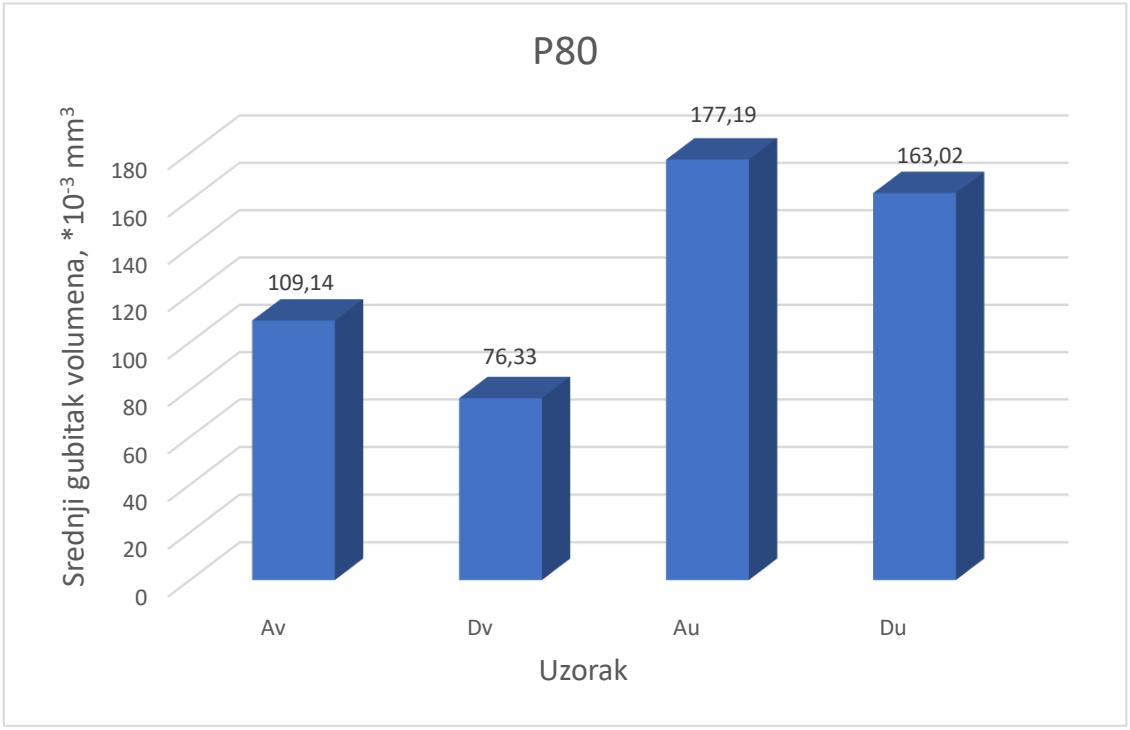
Slika 33. Gubitak volumena na papiru P400



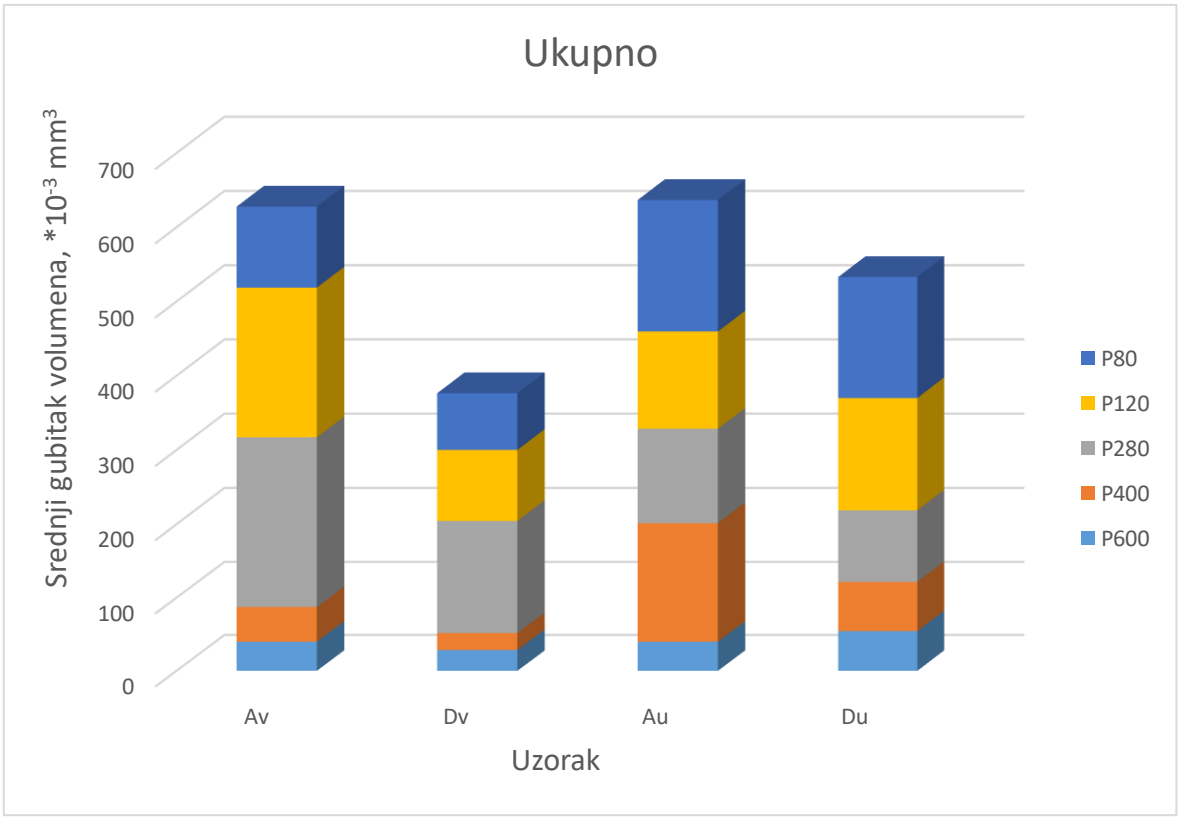
Slika 34. Gubitak volumena na papiru P280



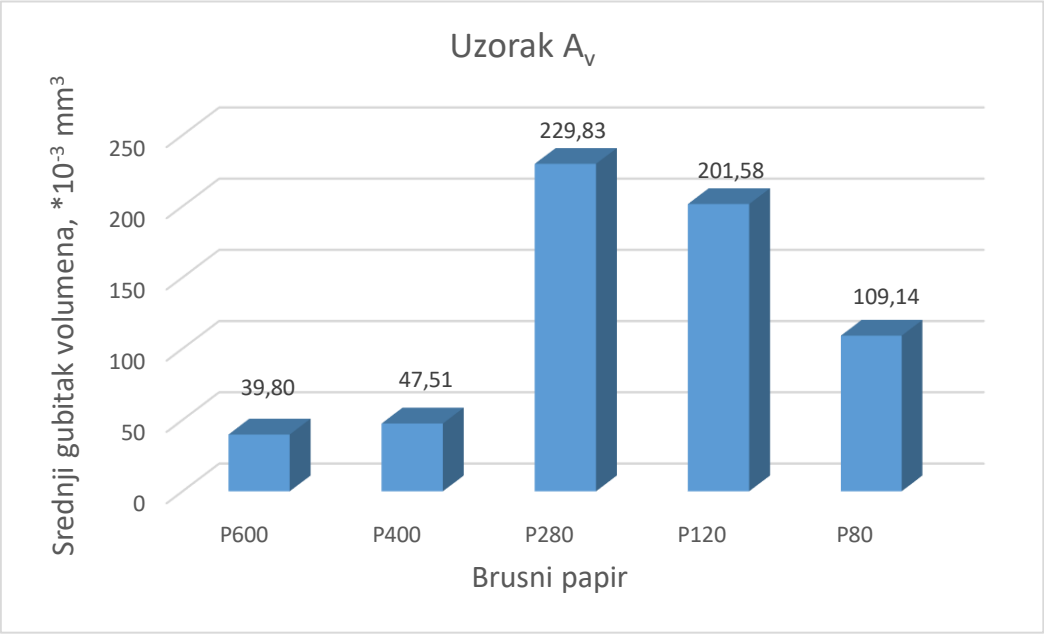
Slika 35. Gubitak volumena na papiru P120



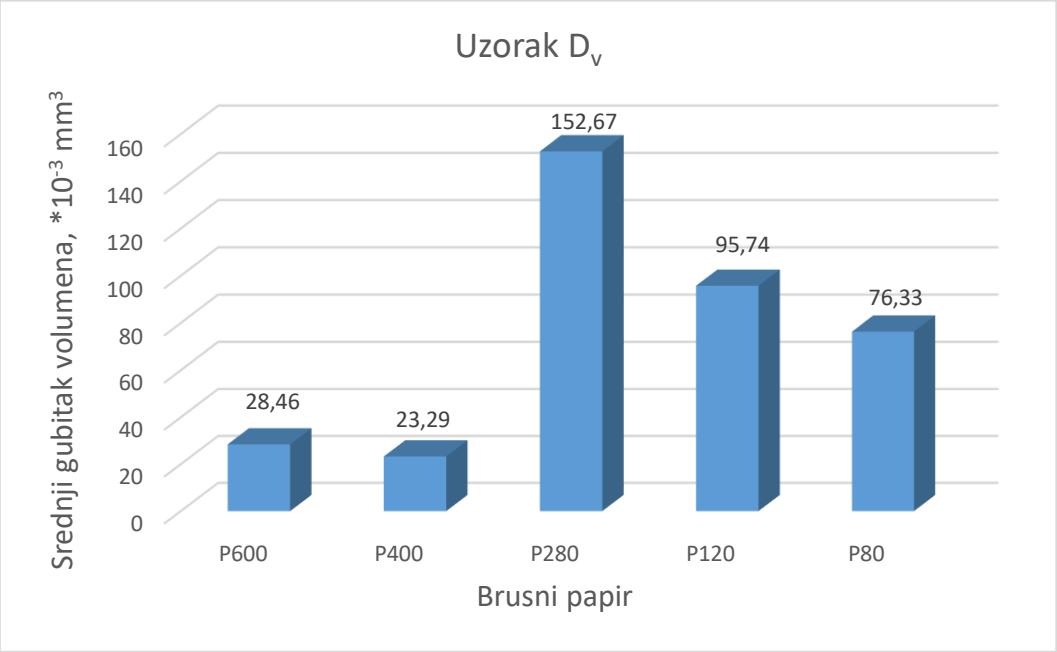
Slika 36. Gubitak volumena na papiru P80



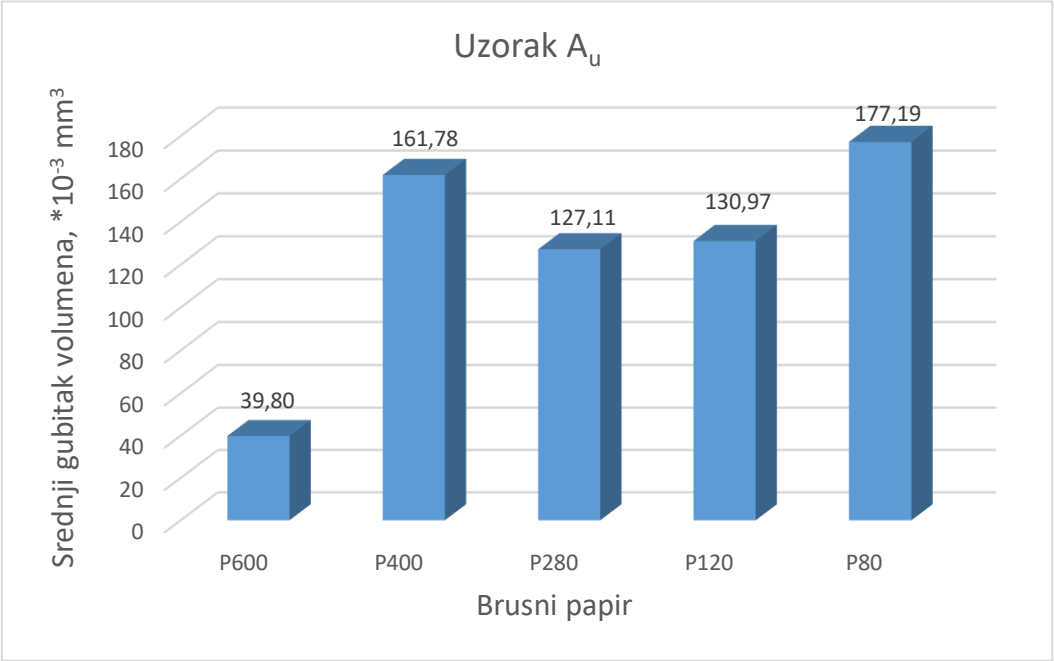
Slika 37. Ukupni gubitak volumena na svim brusnim papirima



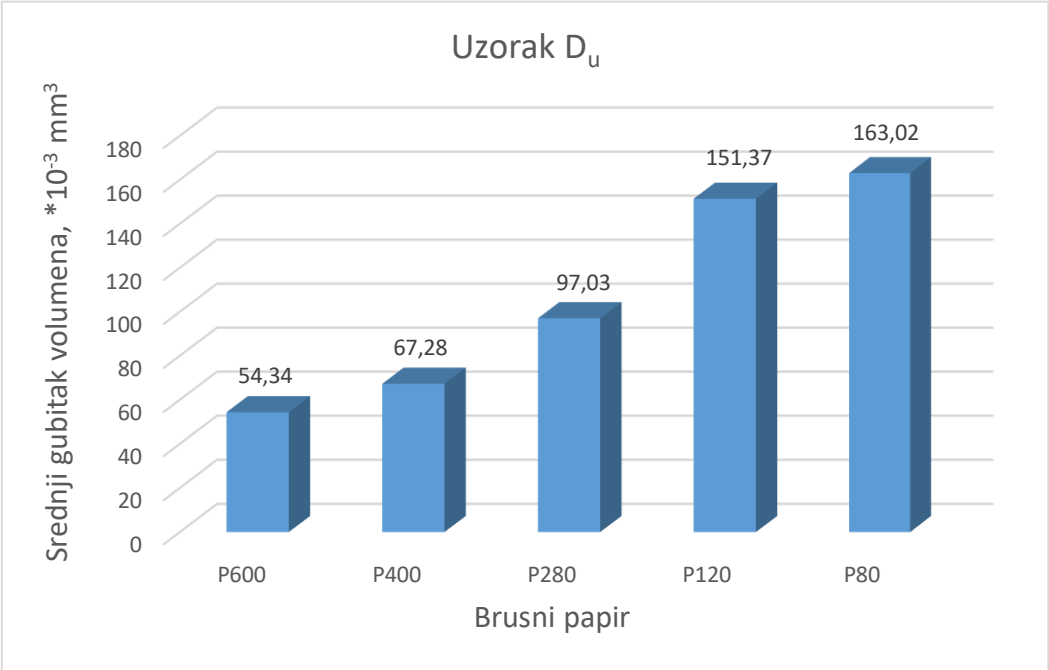
Slika 38. Gubitak volumena za svaki brusni papir, uzorak A_v



Slika 39. Gubitak volumena za svaki brusni papir, uzorak D_v

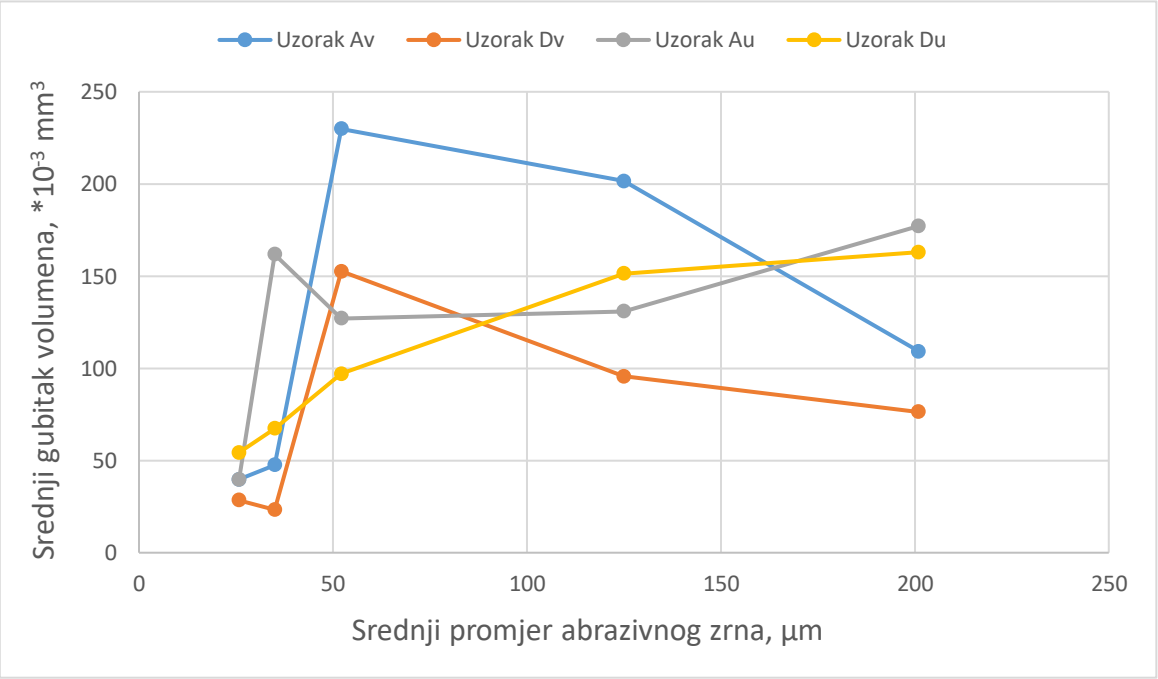


Slika 40. Gubitak volumena za svaki brusni papir, uzorak A_u



Slika 41. Gubitak volumena za svaki brusni papir, uzorak D_u

Ako se u korelaciju stavi gubitak volumena pri abrazijskom trošenja sa srednjim promjerom abrazivnog zrna dobije se dijagram prikazan na slici 42. Kod sva 4 uzorka izražena je fenomen kritične veličine abrazivnog zrna. Kod uzorka austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva izrezanog iz sredine odljevka (uzorak A_u), kritična veličina abrazivnog zrna niža je nego kod ostalih uzoraka i nalazi se između 35 i 52,2 µm. Kod preostalih uzoraka kritična veličina abrazivnog zrna veća je od 52,2 µm. Kod uzoraka s rubova odljevaka obaju ljevova, porastom abrazivnog zrna preko kritične vrijednosti intenzitet trošenja pada. Kod austenitnog uzorka iz sredine odljevka intenzitet trošenja nakon kritične veličine abrazivnog zrna manje-više stagnira, dok kod dupleks uzorka iz sredine odljevka intenzitet trošenje i dalje raste ali s nižom stopom rasta.



Slika 42. Ovisnost abrazijskog trošenja o srednjem promjeru abrazivnog zrna

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata moguće je zaključiti sljedeće:

- Intenzitet trošenja svih uzoraka ovisi o veličini abrazivnog zrna. Kod najfinijih brusnih papira (P600 i P400) trošenje je znatno niže nego kod grubljih. Najveće trošenje izmjereno je na papiru kvalitete P280 (za vanjske rubove odljevka kod obje vrste lijeva) i na papiru P80 (za sredine odljevaka).
- Mikrotvrdoća HV0,2 kao i otpornost na abrazijsko trošenje viši su kod dupleks nego kod austenitnog čeličnog lijeva. Kod oba lijeva rubovi su tvrđi i manje se troše u odnosu na sredinu uzorka. Pritom je razlika u intenzitetu trošenja rub-sredina kod austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva neznatna, dok je kod dupleks lijeva puno veća. Razlike u tvrdoći rub-sredina su puno veće kod austenitnog nego kod dupleks čeličnog lijeva, što nije u suglasju s rezultatima ispitivanja abrazijskog trošenja.
- Razlike u mikrotvrdoći i intenziteta trošenja između ruba i sredina kod oba lijeva posljedica su razlike u mikrostrukturi koja je grublja na rubu nego u sredini odljevka što je posljedica bržeg ohlađivanja.
- Kod svih uzoraka izražen je fenomen kritične veličine abrazivnog zrna. Najmanja vrijednost ove veličine uočena je kod austenitnog nehrđajućeg čeličnog lijeva izrezanog iz sredine odljevka (između 35 i 52,2 μm), dok ostali uzorci imaju nešto veće vrijednosti (>52,2 μm). S porastom abrazivnog zrna preko kritične vrijednosti intenzitet trošenja na rubovima odljevaka obaju ljevova pada, u sredini austenitnog odljevka intenzitet trošenja stagnira, a u sredini dupleks odljevka intenzitet trošenja i dalje raste, ali sa znatno manjim intenzitetom.

LITERATURA

[1] V. Rede: Nehrđajući čelici, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[2] V. Rede, Z. Šokčević: Nehrđajući čelični ljevovi, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[3] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/?action=view&site_id=50&id=6020 [1.2.2020.]

[4] K. Grilec, S. Jakovljević, G. Marić: Tribologija u strojarstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[5] J. J. Coronado, A. Sinatora: Effect of abrasive size wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 1, Surface Phenomena Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil, 2011.

[6] J. J. Coronado, A. Sinatora: Effect of abrasive size wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: Part 2, Surface Phenomena Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil, 2011.

[7] https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.4308-GX5CrNi19-10-Cast-Stainless-Steel [preuzeto 7. 2. 2020.]

[8] https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.4468-GX2CrNiMoN25-6-3-Cast-Stainless-Steel [preuzeto 7. 2. 2020.]

PRILOZI

I. CD-R disk