Utjecaj parametara precipitacijskog očvrsnuća na abrazijsku otpornost aluminijeve legure

Jelenski, Antonio Dominik

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:235:451189

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

DIPLOMSKI RAD

Antonio Dominik Jelenski

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Vera Rede

Student:

Antonio Dominik Jelenski

Zagreb, 2019.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se vlastitim znanjem stečenim na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, uz pomoć navedene literature.

Zahvaljujem svojoj mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na mentorstvu, stručnoj pomoći, savjetima, utrošenom vremenu te trudu.

Zahvaljujem tvrtki Haberkorn d.o.o. na potpori i donaciji brusnih papira za provedbu eksperimentalnoga dijela ovoga rada.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji i kolegama na strpljenju, povjerenju i iznimnoj podršci tijekom studiranja.

Antonio Dominik Jelenski

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **ANTONIO DOMINIK JELENSKI** Mat. br.: 0035193678

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj parametara precipitacijskog očvrsnuća na abrazijsku otpornost aluminijeve legure**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The effect of precipitation-hardening conditions on abrasion resistance of aluminium alloy**

Opis zadatka:

Očvrsnuće precipitacijskim mehanizmom ima vrlo važnu ulogu u postizanju visokih čvrstoća kod različitih tehničkih legura, a osobito se često provodi kod aluminijevih legura. Precipitacijsko očvrsnuće može se provesti samo kod onih legura kojima se topljivost legirnih elemenata u osnovnom metalu mijenja s promjenom temperature. Također je nužno da legura sadrži određenu količinu legirnih dodataka koji će u polaznom stanju osigurati heterogenu mikrostrukturu sastavljenu od kristala mješanaca i intermetalnog spoja, a koji će se zagrijavanjem u fazi homogenizacije potpuno rastvoriti u kristalu mješancu. Na konačna svojstva legure odlučujući utjecaj imaju temperatura i vrijeme grijanja u fazi dozrijevanja. O njima ovisi količina i oblik te veličina precipitiranih čestica intermetalnog spoja, što u konačnici određuje čvrstoću i tvrdoću precipitacijski očvrsnute legure.
U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je odrediti kako na abrazijsku otpornost precipitacijski očvrsnute aluminijeve legure utječu brzina gašenja u fazi homogenizacije te temperatura i vrijeme grijanja u fazi dozrijevanja.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
26. rujna 2019.

Rok predaje rada:
28. studenog 2019.

Predviđeni datum obrane:
04. prosinca 2019.
05. prosinca 2019.
06. prosinca 2019.

Zadatak zadao:
Rede
prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
SAŽETAK VI
SUMMARY VII
1. UVOD 1
2. PRECIPITACIJSKO OČVRSNUĆE 2
2.1. Precipitacijski očvrstive Al-legure 7
2.1.1. Durali – legure serije 2XXX 8
2.1.2. Konstrukali – legure serije 7XXX 9
2.1.3. Pantali – legure serije 6XXX 9
2.1.4. Legure serije 8XXX 10
3. TROŠENJE 11
3.1. Mehanizmi trošenja 11
3.2. Abrazija 11
3.2.1. Teorijska abrazija 12
3.2.1. Realna abrazija 13
3.2.1. Mehanizmi trošenja abrazijom 14
3.3. Kritična veličina abrazivnoga zrna 21
4. EKSPERIMENTALNI DIO 23
4.1. Cilj rada 23
4.2. Materijal za ispitivanje 23
4.3. Provođenje ispitivanja 25
4.3.1. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje 26
4.3.2. Mjerenje tvrdoće HV3 28
4.3.3. Analiza mikrostrukture 29
4.4. Rezultati ispitivanja 31
4.5. Analiza rezultata 44
5. ZAKLJUČAK 48
LITERATURA 49
PRILOZI 50

POPIS SLIKA

Slika 1. Postupak precipitacijskoga očvrsnuća [1] .....**Error! Bookmark not defined.**
Slika 2. Tipovi precipitata [2].....5
Slika 3. Gibanje dislokacija – zaobilaženje precipitata [3].....6
Slika 4. Gibanje dislokacija – rezanje precipitata [4].....6
Slika 5. Proces abrazije [6].....12
Slika 6. Teorijski model abrazije [7].....12
Slika 7. Jedinični događaj abrazije [5].....13
Slika 8. Abrazija u dodiru dvaju (a) i triju tijela (b) [8].....14
Slika 9. Čista abrazija [5].....15
Slika 10. Selektivna abrazija [5].....16
Slika 11. Nulta abrazija [5].....17
Slika 12. Deformacija materijala izazvana mikrobrazdanjem [8].....18
Slika 13. Deformacija materijala izazvana mikrorezanjem [8].....18
Slika 14. Deformacija materijala izazvana mikronaprsnućima [8].....19
Slika 15. Deformacija materijala izazvana mikroumorom površine [8].....19
Slika 16. Ovisnost otpornosti na abrazijsko trošenje o tvrdoći materijala [9].....20
Slika 17. Ovisnost abrazijskoga trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala [10].....20
Slika 18. Utjecaj veličine abrazivnoga zrna na abrazijsko trošenje materijala [11].....21
Slika 19. Utjecaj veličine abrazivnoga zrna na gubitak mase trošenoga materijala [12].....22
Slika 20. Uređaj za mjerenje gustoće.....24
Slika 21. Geometrija ispitnih uzoraka.....24
Slika 22. Uređaj za mjerenje mase.....26
Slika 23. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje.....27
Slika 24. Brusni papiri.....27
Slika 25. Uređaj za mjerenje tvrdoće.....29
Slika 26. Ispitni uređaji u polimernoj masi.....29
Slika 27. Uređaj za fotografiranje mikrostrukture.....30
Slika 28. Gubitak volumena na brusnom papiru P180.....32
Slika 29. Gubitak volumena na brusnom papiru P240.....32
Slika 30. Gubitak volumena na brusnom papiru P600.....33
Slika 31. Ukupni gubitak volumena (kumulativno za sva tri brusna papira).....33
Slika 32. Intenzitet trošenja za brusni papir P180.....34
Slika 33. Intenzitet trošenja za brusni papir P240.....34
Slika 34. Intenzitet trošenja za brusni papir P600.....35
Slika 35. Ukupni intenzitet trošenja (kumulativno na sva tri brusna papira).....35
Slika 36. Rezultati mjerenja tvrdoće.....36
Slika 37. Polirana površina uzorka 1.....37
Slika 38. Polirana površina uzorka 4.....37
Slika 39. Mikrostruktura uzorka 1.....38
Slika 40. Mikrostruktura uzorka 2.....38
Slika 41. Mikrostruktura uzorka 3.....39
Slika 42. Mikrostruktura uzorka 4.....39
Slika 43. Mikrostruktura uzorka 5.....40
Slika 44. Mikrostruktura uzorka 6.....40
Slika 45. Mikrostruktura uzorka 7.....41

Slika 46. Mikrostruktura uzorka 8 41
Slika 47. Mikrostruktura uzorka 9 42
Slika 48. Mikrostruktura uzorka 10 42
Slika 49. Mikrostruktura uzorka 11 43
Slika 50. Intenzitet abrazijskoga trošenja svih uzoraka 44
Slika 51. Uzorci s rastućim trendom trošenja 46
Slika 52. Trend trošenja uzoraka s izraženom kritičnom veličinom abrazivnoga zrna 47
Slika 53. Ovisnost abrazijskoga trošenja o veličini abrazivnoga zrna 47

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav Al-legure.....23
Tablica 2. Parametri toplinske obrade uzoraka.....25
Tablica 3. Usporedba kvalitete brusnoga papira i srednjega promjera abrazivnoga zrna.....28
Tablica 4. Gubitak mase pri abrazijskom trošenju.....31
Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće.....36

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
α	°	kut upada pravilne četverostrane piramide u površinu trošenoga materijala
H_a	HV	tvrdoća abraziva
W	[mm^3/mm^2]	intenzitet trošenja
H_m	HV	tvrdoća trošenoga materijala
d_{krit}	[μm]	kritična veličina abrazivnoga zrna
ρ	[g/cm^3]	gustoća
F	N	ispitna sila

SAŽETAK

Cilj ovoga rada bio je utvrditi kako parametri precipitacijskoga očvrsnuća utječu na abrazijsku otpornost precipitacijski očvrsnute aluminijske legure Al-Zn-Mg. Pod parametrima precipitacijskoga očvrsnuća podrazumijevaju se brzina gašenja u fazi homogenizacije te temperatura i vrijeme grijanja u fazi dozrijevanja.

U teorijskom dijelu rada opisano je precipitacijsko očvrsnuće, precipitacijski očvrstive Al-legure te trošenje, osnovni mehanizmi trošenja, abrazijsko trošenje i fenomen kritične veličine abrazivnoga zrna.

U eksperimentalnom dijelu utvrđeno je da brzina gašenja u fazi homogenizacije te temperatura i vrijeme grijanja u fazi dozrijevanja imaju veliki utjecaj na konačna svojstva materijala. Najviša tvrdoća i najveća otpornost na abrazijsko trošenje izmjereni su kod uzorka koji je homogeniziran na 490 °C i dozrijevan 4 sata na 130 °C. Viša postignuta tvrdoća materijala uglavnom znači i veću otpornost na abrazijsko trošenje. Kod većine ispitnih uzoraka izražen je fenomen kritične veličine abrazivnoga zrna.

Ključne riječi: Al-legure, precipitacijsko očvrsnuće, kritična veličina abrazivnoga zrna, tvrdoća

SUMMARY

The purpose of this paper was to determinate how the parameters of precipitation hardening affect on abrasion wear of precipitation hardened aluminum alloy Al-Zn-Mg. The parameters of precipitation hardening are quenching speed after homogenization as well as the heating temperature and time in the ageing phase.

Precipitation hardening, precipitation hardened Al-alloys as well as wear, wear mechanisms, abrasive wear and the critical abrasive particle size phenomenon are explained in the theoretical part.

During the experimental part it was determined that the quenching speed after homogenization as well as the ageing temperature and time in the ageing phase have a great influence on the final material properties. Maximum hardness and maximun abrasive wear ressistance were meassured for the sample that were homogenizated at 490 °C and aged 4 hours at 130 °C. Higher material hardness mostly means higher abrasive wear ressistance. The majority of the samples displayed the critical abrasive particle size phenomenon.

Key words: Al-alloys, precipitation hardening, critical abrasive particle size, hardness

1. UVOD

Nelegirani aluminij ima usko područje primjene zbog slabijih mehaničkih svojstava. Područje primjene aluminija može se proširiti legiranjem aluminij s drugim metalima. Jedan od načina poboljšanja mehaničkih svojstava aluminijevih legura je proces precipitacijskoga očvrsnuća. Ovaj proces toplinske obrade može se provesti kod određenih aluminijskih legura, a temelji se na izlučivanju sitnih precipitata intermetalnoga spoja u kristalu mješancu. Precipitati predstavljaju učinkovite prepreke gibanju dislokacija čime se povisuju čvrstoća i tvrdoća legura. Konačna svojstva aluminijevih legura nakon precipitacijskoga očvrsnuća najviše ovise o parametrima toplinske obrade u fazama homogenizacije i dozrijevanja.

Otpornost na abrazijsko trošenje usko je povezana s tvrdoćom materijala pa se očekuje da parametri precipitacijskoga očvrsnuća utječu i na ovo svojstvo. U pravilu je otpornost na abrazijsko trošenje veća što je tvrdoća materijala viša. Otpornost na abrazijsko trošenje može se prikazati preko intenziteta trošenja. Na intenzitet abrazijskoga trošenja utječu mnogi faktori, a neki od njih su veličina i tvrdoća abrazivnoga zrna.

S porastom veličine abrazivnoga zrna gubitak volumena trošenoga materijala linearno raste sve do neke vrijednosti zrna. Kada abrazivno zrno prijeđe ovu kritičnu veličinu, ovisnost između gubitka volumena i veličine abrazivnoga zrna se mijenja. Gubitak volumena može i dalje rasti samo u manjoj mjeri, može ostati konstantan i neovisan o daljnjem povećanju abrazivnoga zrna ili se može smanjivati.

Ovaj fenomen vrijedi za sve metalne materijale te je poznat pod pojmom kritična veličina abrazivnoga zrna.

2. PRECIPITACIJSKO OČVRSNUĆE

Precipitacijsko očvrsnuće jedan je od glavnih mehanizama očvrsnuća metalnih materijala. Uz precipitacijsko očvrsnuće glavni su mehanizmi očvrsnuća metalnih materijala očvrsnuće stvaranjem kristala mješanaca (legiranjem), očvrsnuće faznom transformacijom (npr. kaljenje), očvrsnuće hladnom deformacijom i očvrsnuće granicama zrna (usitnjenjem zrna).

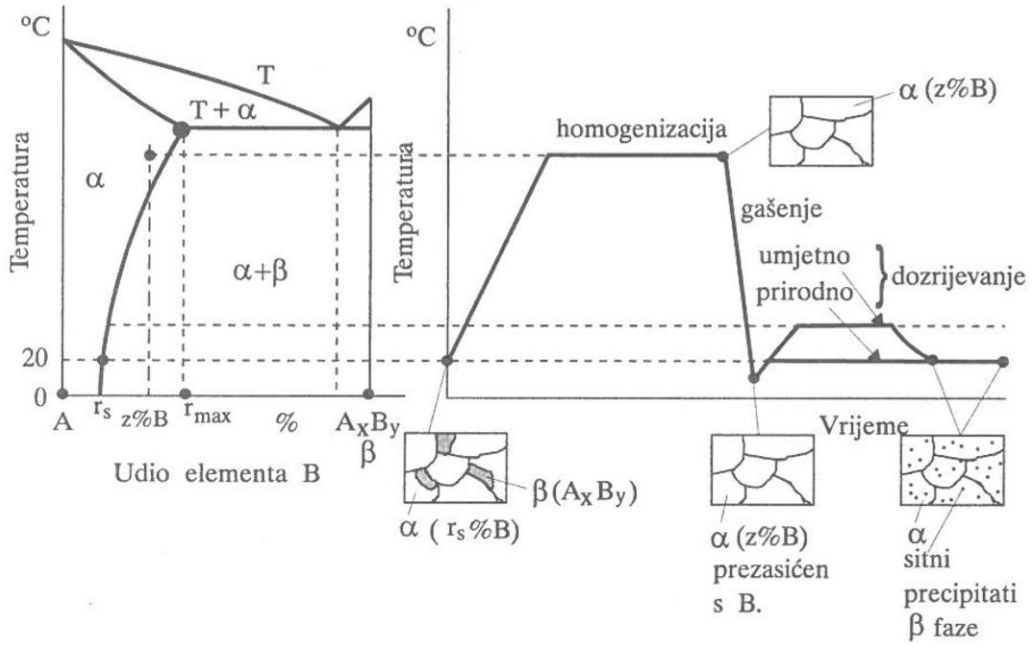
Kod mehanizma precipitacijskoga očvrsnuća moguće je, kod legura nekih metala, povećati mehaničku otpornost. Osnovni su preduvjeti za to povećanje topivosti legirajućega elementa B u čvrstoj otopini osnovnoga metala A s porastom temperature te da osnovni metal i legirajući element međusobno tvore intermetalni spoj.

Ovaj mehanizam očvrsnuća temelji se na trodimenzionalnim zaprekama, sitnim česticama koje se najčešće nazivaju precipitatima. Precipitati mogu biti različiti intermetalni spojevi (npr. Ni_3Ti), dispergirane čestice u obliku karbida i nitrida (npr. Mo_2C) te prijelazne čestice izlučene iz homogene čvrste otopine. Ove sitne submikroskopske čestice promjera su od 5 do 15 nm, a optimalno je da njihov međusobni razmak bude od 15 do 45 nm.

Precipitati nastaju u fazi dozrijevanja kada se prekorači granica topljivosti legirajućega elementa B u osnovnom metalu A.

Postupak precipitacijskoga očvrsnuća prikazan je na slici 1. Ovaj postupak toplinske obrade sastoji se od dviju faza – homogenizacijskoga (rastopnog) žarenja i dozrijevanja. Pri sobnoj temperaturi legura mora biti heterogena (α- i β-faza). Povišenjem temperature na temperaturu homogenizacije, zbog povećanja rastvorljivosti legirajućega elementa B u kristalima mješancima α, dolazi do rastvaranja intermetalnoga spoja (β-faza). Legura će nakon određenoga vremena na temperaturi homogenizacije postati monofazna (α-faza), tj. dolazi do ujednačenja kemijskoga sastava. U tom je trenutku legirajući element B potpuno otopljen u rešetki osnovnoga metala A. Navedeni se proces naziva homogenizacija.

Vrijeme homogenizacije najviše ovisi o vrsti legure i dimenzijama izratka. Ono mora biti dovoljno dugo da se difuzijom postigne ravnotežno stanje legure. U slučaju predugoga držanja na temperaturi homogenizacije dolazi do procesa oksidacije koji negativno utječe na svojstva legure.



Slika 1. Postupak precipitacijskoga očvrsnuća [1]

Temperatura homogenizacije mora biti malo ispod odgovarajuće temperature solidusa. Pri previsokoj temperaturi homogenizacije dolazi do nepoželjnoga taljenja izratka, a pri preniskoj temperaturi homogenizacije ne dolazi do potpunoga otapanja legirajućega elementa B u rešetki osnovnoga metala A, tj. legura će imati nižu čvrstoću.

Zbog niže rastvorljivosti legirajućega elementa B pri sobnoj temperaturi (r_s) od stvarne koncentracije u kristalima mješancima (z %B) dolazi do prezasićenja čvrste otopine legirajućim elementom B. Prezasićenje rešetke α-mješanaca atomima legirajućega elementa B nastaje zbog velike difuzijske pokretljivosti atoma u blizini temperature solidusa. U ovom je stanju u kristalnoj rešetki prisutan veliki udio nepravilnosti u obliku praznina ili vakancija.

U slučaju da se čvrsta otopina s temperature homogenizacije sporo hladi, nastala bi dvofazna (α+β) mikrostruktura. Takvu mikrostrukturu ne želimo jer posljedice mogu biti izrazito loša mehanička svojstva.

Kako bi onemogućili difuziju i zadržali stanje s velikim udjelom nepravilnosti (praznina) u kristalnoj rešetki, provodi se brzo hlađenje, tj. gašenje na sobnu temperaturu. U ovom slučaju ne dolazi do strukturnih promjena. Gašenje se može provesti na različite načine (npr. gašenje u hladnoj vodi, gašenje u toploj vodi, itd.), a ponajviše ovisi o vrsti legure i dimenzijama izratka.

Nakon provedenoga gašenja slijedi proces dozrijevanja ili starenja. Dozrijevanjem nastaju precipitati (izlučevine) intermetalnoga spoja (β-faza). Proces dozrijevanja difuzijski je proces i ovisi o temperaturi dozrijevanja i trajanju.

Moguće su dvije vrste dozrijevanja:

- Prirodno dozrijevanje – provodi se dugim držanjem na sobnoj temperaturi. Što se legura duže drži na sobnoj temperaturi, to će čvrstoća legure biti veća (sve do maksimalno moguće čvrstoće). Prirodno dozrijevanje može trajati od nekoliko dana sve do nekoliko mjeseci, ovisno o vrsti legure i željenim svojstvima. Tijekom prva 24 sata prirodnoga dozrijevanja postigne se velika većina željene čvrstoće zbog bržega izlučivanja precipitata. Nakon toga precipitati se izlučuju puno sporije.
- Umjetno dozrijevanje – provodi se kraćim držanjem na povišenoj temperaturi. Temperatura umjetnoga dozrijevanja aluminijskih legura najčešće je između 100 i 200 °C, ovisno o vrsti legure i željenim svojstvima. Što je temperatura dozrijevanja viša, to je vrijeme dozrijevanja kraće. Za postizanje najboljih rezultata umjetnoga dozrijevanja temperatura ne smije odstupati više od 3 °C. Umjetno dozrijevanje može trajati od nekoliko sati sve do nekoliko dana, ovisno o vrsti legure, temperaturi i željenim svojstvima. Preporuča se česta kontrola cijeloga procesa umjetnoga dozrijevanja.

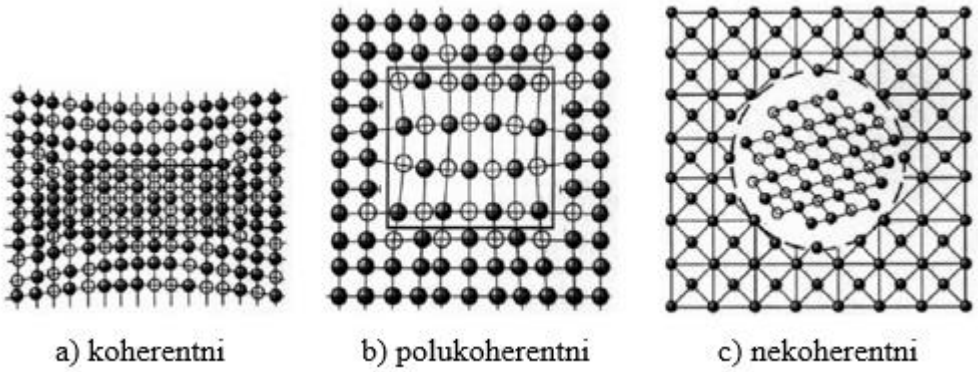
Umjetnim dozrijevanjem može se postići veća čvrstoća nego prirodnim dozrijevanjem jer je proces dozrijevanja difuzijski proces, tj. moguća je čvrstoća veća što je temperatura dozrijevanja viša.

Nakon provedenoga umjetnog dozrijevanja leguru je potrebno ohladiti na sobnu temperaturu. Hlađenje se najčešće provodi na zraku zbog najmanje opasnosti od pojave deformacija i ostalih neprihvatljivih efekata.

U početku procesa dozrijevanja atomi legirajućega elementa B nastoje izaći iz prezasićene čvrste otopine. Zaposjedaju položaje unutar kristalne rešetke α-kristala mješanaca kako bi stvorili klice (nukleuse) budućih čestica. Pomiču se iz područja veće napetosti kristalne rešetke u područja koja su prezasićena prazninama. Time nastaju nakupine rastvorenih atoma legirajućega elementa B unutar kristalne rešetke α-kristala mješanaca.

Navedene su klice dobro povezane i uklopljene unutar kristalne rešetke α-kristala mješanaca. To su koherentni precipitati, slika 2 a).

Tipovi precipitata prikazani su na slici 2.



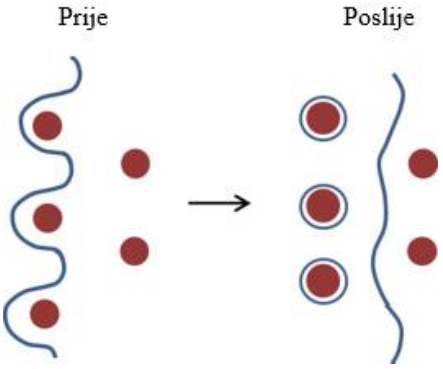
Slika 2. Tipovi precipitata [2]

Koherentni precipitati nastaju prirodnim i umjetnim dozrijevanjem, dok polukoherentni i nekoherentni mogu nastati samo umjetnim dozrijevanjem. Koherentni precipitati nastaju kada se prirodno dozrijevanje ispravno provede ili kada se umjetno dozrijevanje provede na nešto nižim temperaturama. Ako se umjetno dozrijevanje provede na nešto višim temperaturama, mjestimično je moguće pucanje kristalnih veza između matrice i precipitata. Tada nastaju polukoherentni precipitati koji su djelomično povezani s matricom, slika 2 b). U slučaju da se umjetno dozrijevanje provede na još višim temperaturama, zbog ubrzane difuzije nastaje nekoherentni precipitat koji najmanje uklopljen u kristalnu građu matrice, slika 2 c).

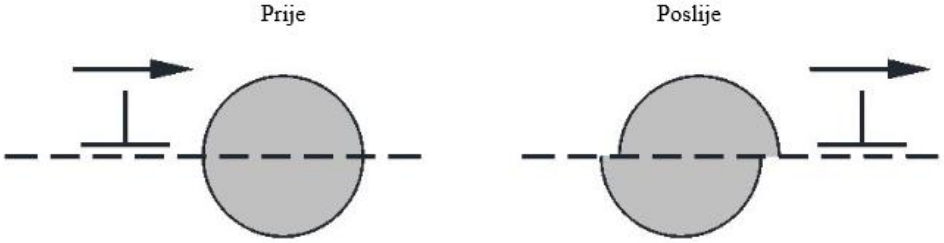
Ako parametri dozrijevanja nisu dobro određeni, može doći do nekontrolirane difuzije. U nekim slučajevima može doći do rasta precipitata i njihova spajanja, što dovodi do pada čvrstoće i tvrdoće.

Mehanička svojstva legure mijenjaju se ovisno o stupnju izlučivanja. Zbog otapanja velikih krhkih čestica intermetalne faze u fazi homogenizacije povećava se istezljivost, a uslijed deformacije kristalne rešetke, zbog izlučivanja precipitata u fazi dozrijevanja, dolazi do pojave unutarnjih naprezanja. To usporava i ometa gibanje dislokacija što dovodi do povećanja čvrstoće i tvrdoće. Što je više sitnih koherentnih precipitata i što su pravilnije raspoređeni u kristalima mješancima α-faze, to je veće povišenje granice tečenja i vlačne čvrstoće.

Primjeri gibanja dislokacija nakon precipitacijskoga očvrsnuća prikazani su na slikama 3. i 4.



Slika 3. Gibanje dislokacija – zaobilaženje precipitata [3]



Slika 4. Gibanje dislokacija – rezanje precipitata [4]

Na slici 3. shematski je prikazano gibanje dislokacija zaobilaženjem precipitata, dok je na slici 4. prikazano gibanje dislokacija rezanjem precipitata.

U slučaju da postoji dovoljan broj tvrdih, sitnih i dobro raspoređenih precipitata, dislokacije ih zaobilaze trošeći određenu energiju pri djelovanju vanjskoga opterećenja. Dislokacije se, pod djelovanjem smičnoga naprezanja, probijaju između dva precipitata i pritom formiraju dislokacijske prstenove oko precipitata.

U slučaju da precipitati nisu dovoljno tvrdi, bez obzira na njihovu veličinu i raspoređenost, dislokacije će ih odrezati i nastaviti s gibanjem. I u ovom slučaju troši se određena energija pri djelovanju vanjskoga opterećenja za rezanje precipitata.

Utrošena energija bi, bez prisustva precipitata, dovela do određene deformacije izratka. Ova će deformacija biti puno manja ako su u mikrostrukturi legure prisutni precipitati. Što su precipitati tvrđi, sitniji i bolje raspoređeni, to će pri djelovanju vanjskoga opterećenja doći do manjih deformacija.

2.1. Precipitacijski očvrstive Al-legure

Al-legure mogu se općenito podijeliti na sljedeće načine:

- prema tehnološkoj preradi – dijele se na dvije vrste: legure za gnječenje i legure za lijevanje. Legure za gnječenje prerađuju se plastičnim oblikovanjem, dok se legure za lijevanje nakon lijevanja plastično ne definiraju i primjenjuju se u odljevenom stanju.
- prema kemijskom sastavu – kemijski elementi koji imaju dovoljnu topivost u aluminiju su Cu, Mg, Si, Zn, Mn i Li. Navedeni su kemijski elementi najčešći legirni elementi aluminijevih legura. Njihovim legiranjem s aluminijem nastaju Al-Cu, Al-Mg, Al-Si, Al-Zn, Al-Mn i Al-Li legure. Moguće je i legiranje s više legirnih elemenata zbog poboljšanja svojstva osnovne legure.
- prema toplinskoj obradi – dijele se na dvije vrste: toplinski neočvrstive i toplinski očvrstive legure.

Al-legure za gnječenje mogu se podijeliti prema glavnim legirnim elementima i njihovim približnim udjelima:

- 1XXX – tehnički čisti aluminij (Min. 99,00 % Al)
- 2XXX – Al-Cu legure
- 3XXX – Al-Mn legure
- 4XXX – Al-Si legure
- 5XXX – Al-Mg legure
- 6XXX – Al-Mg-Si legure
- 7XXX – Al-Zn legure
- 8XXX – legure s drugim legirnim elementima.

Al-legure za lijevanje mogu se također podijeliti prema glavnim legirnim elementima i njihovim približnim udjelima:

- 1XX.0 – tehnički čisti aluminij (Min. 99,00 % Al)
- 2XX.0 – Al-Cu legure
- 3XX.0 – Al-Si-Cu i/ili Mg legure
- 4XX.0 – Al-Si legure
- 5XX.0 – Al-Mg legure
- 6XX.0 – Neiskorišteno
- 7XX.0 – Al-Zn legure
- 8XX.0 – Al-Sn legure
- 9XX.0 – legure s drugim legirnim elementima.

U obje podjele prva znamenka označava glavni legirni element u Al-leguri. Kod Al-legura za gnječenje druga znamenka označava modifikacije s obzirom na sastav izvorne legure, dok treća i četvrta znamenka označavaju specifičnu vrstu legure. Kod Al-legura za lijevanje druga i treća znamenka označavaju specifičnu vrstu legure. Najveća je razlika u sustavu označavanja između gnječenih i lijevanih Al-legura nula iza oznake Al-legura za lijevanje.

Navedene Al-legure za gnječenje mogu se, s obzirom na mehanizam očvrsnuća, podijeliti na Al-legure očvrstive hladnom deformacijom i precipitacijski očvrstive Al-legure. Precipitacijski očvrstive Al-legure postižu više vrijednosti čvrstoće i tvrdoće nego Al-legure očvrstive hladnom deformacijom.

2.1.1. Durali – legure serije 2XXX

Jedan od primjera najčešće korištenih precipitacijski očvrstivih Al-legura legure su iz serije 2XXX, poznatije pod imenom durali. Glavni legirni element kod ovih legura je bakar. Legiranje bakrom povećava čvrstoću, ali smanjuje otpornost na koroziju. Od ostalih legirnih elemenata, durali u značajnijim količinama sadrže magnezij, titanij te mangan, krom i/ili cirkonij. Magnezij ubrzava i pojačava prirodno ili umjetno dozrijevanje, titanij utječe na veličinu zrna, a ostali navedeni elementi reguliraju zrnatost gnječene strukture.

Završna svojstva durala ovise o legirnim elementima i toplinskoj obradi. Durali su poznati po dobroj čvrstoći i lomnoj žilavosti te po velikoj otpornosti prema širenju pukotina. Kako bi se povećala otpornost na koroziju, legure se često prevlače tankim slojem čistoga aluminija ili neke Al-legure.

Iz ove serije aluminijevih legura najviše se koristi legura oznake 2024. Legure iz ove serije najčešće se upotrebljavaju u svemirskoj tehnici i zrakoplovnoj industriji.

2.1.2. Konstruktali – legure serije 7XXX

Drugi primjer najčešće korištenih precipitacijski očvrstivih Al-legura legure su iz serije 7XXX, poznate pod imenom konstruktali. Glavni je legirni element konstruktala cink. Od ostalih legirnih elemenata, konstruktali u značajnijim količinama sadrže magnezij, bakar i krom. Ako konstruktali ne sadrže bakar, njihova je čvrstoća niža, no zato su žilaviji i bolje zavarljivi. Ako konstruktali sadrže bakar, uz male udjele kroma i mangana, legure postižu najveću moguću čvrstoću. Konstruktali su skloniji precipitacijskom očvrsnuću od durala te postižu najviše vrijednosti čvrstoće među svim Al-legurama. Svi konstruktali umjetno dozrijevaju zato što im nakon prirodnoga dozrijevanja čvrstoća varira, tj. nisu stabilni. Stabilni su samo ako umjetno dozrijevaju. Konstruktali imaju, zbog visoke mehaničke otpornosti, nižu lomnu žilavost od durala.

Kako bi se povećala otpornost na koroziju, legura se često anodizira čime se povećava debljina oksidnoga sloja koji prirodno nastaje na aluminiju i njegovim legurama. Anodizacija se provodi na očišćenom izratku, a debljina oksidnoga sloja je između 0,2 i 0,5 mm, ovisno o parametrima anodizacije.

Primjeri legura iz ove serije aluminijevih legura koje ne sadrže bakar legure su oznaka 7005 i 7029. Primjeri legura koje sadrže bakar legure su oznaka 7075 i 7475. Legure iz ove serije najčešće se upotrebljavaju u svemirskoj tehnici te zrakoplovnoj i vojnoj industriji.

2.1.3. Pantali – legure serije 6XXX

Još jedan primjer precipitacijski očvrstivih Al-legura legure su iz serije 6XXX, poznate pod imenom pantali. One imaju znatno bolju korozijsku otpornost od durala, ali slabija mehanička svojstva. Nedavno je razvijena legura 6013-T6, čija je čvrstoća 12 % veća od 2024-T3 legure, dok su im lomna žilavost i otpornost prema širenju pukotina podjednake.

Velika je prednost ovih legura njihova relativno dobra zavarljivost koja je kod durala i konstruktala ograničena.

2.1.4. Legure serije 8XXX

Zanimljiv primjer precipitacijski očvrstivih Al-legura legure su iz serije 8XXX. Ove se legure legiraju s drugim legirnim elementima kao što su željezo, nikal i litij. Željezo i nikal povećavaju čvrstoću, dok litij smanjuje gustoću i povećava krutost. Litij može biti prisutan kod durala kao prateći element u manjim količinama (npr. legure 2049 AlCuLiAgMgZr i 2091 AlCuMgLiZn).

U slučaju da legura iz ove serije sadrži 2-3 % litija kao glavnoga legirnog elementa, njezina je gustoća 8-10 % manja u odnosu na ostale Al-legure. Nedostatak su ovih legura slabija mehanička svojstva, smanjena žilavost i lomna žilavost te osjetljivost na napetosnu koroziju. Primjer takve legure je legura oznake 8090.

Legure iz ove serije najčešće se upotrebljavaju u zrakoplovnoj industriji.

3. TROŠENJE

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutoga tijeka uslijed dinamičkoga dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. [5]

Drugim riječima, trošenje je reakcija materijala na vanjski podražaj koji može biti mehaničke i/ili kemijske prirode. Brzina trošenja najviše ovisi o mehaničkom djelovanju prisutnih stranih tijela i o kemijski agresivnom djelovanju okoline.

Posljedice trošenja su promjene geometrije površina uzajamno pokretnih dijelova. Istraživanja su pokazala da je preko 50 % zastoja strojarskih sustava izazvano oštećenjima strojarskih pokretnih sklopova trošenjem. Sve vrste trošenja materijala, u većoj ili manjoj mjeri, ubrzava korozija. [6]

3.1. Mehanizmi trošenja

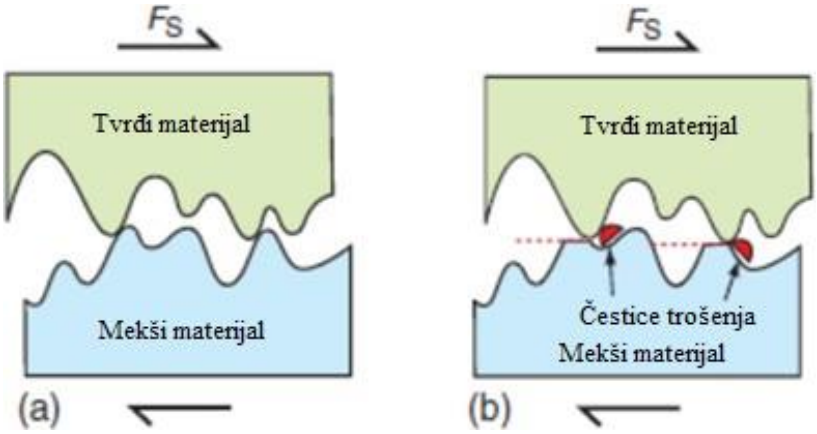
Iako postoje različiti načini trošenja, vrste trošenja dijelimo na četiri osnovna mehanizma trošenja materijala:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija.

3.2. Abrazija

Abrazija je najčešći mehanizam trošenja materijala. Nastaje kao posljedica prodiranja vrhova tvrđega materijala u površinske slojeve mekšega materijala i njihovoga međusobnog gibanja. Tvrde čestice ili tvrde izbočine nazivamo abrazivnim česticama, a mekši materijala koji se troši nazivamo abradirani materijal. Pri abraziji nastaju produkti ili čestice trošenja. Materijal abraziva može biti kamen, staklo, ugljen, cement, keramika i sl. Abrazivi su uglavnom mineralnoga podrijetla te se abrazija često zove i mineralno trošenje.

Proces abrazije prikazan je na slici 5.

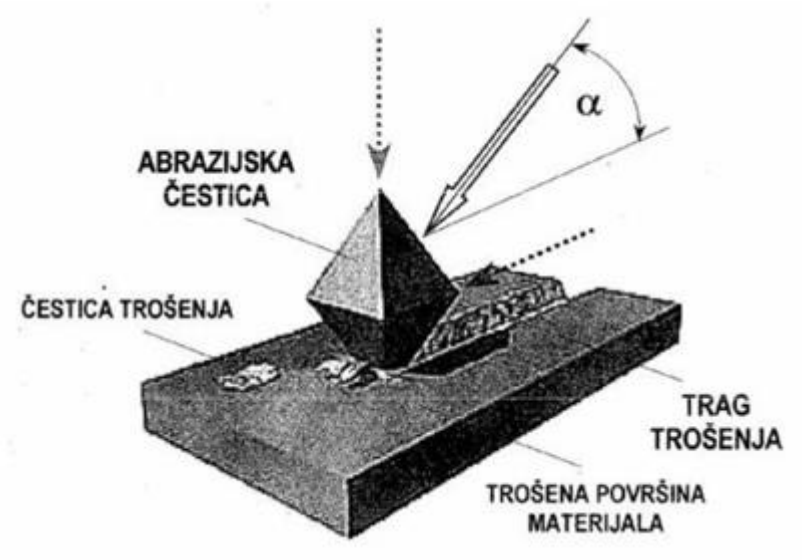


Slika 5. Proces abrazije [6]

3.2.1. Teorijska abrazija

Abrazija se, u teoriji, može prikazati kao proces mikrorezanja, tj. odvajanja čestica trošenja u mikropodručju. Često se koristi shematski prikaz mikrorezanja koji prikazuje pravilnu četverostranu piramidu koja, uz određenu silu i pod određenim kutom α, djeluje na površinu trošenoga materijala. Materijal pravilne četverostrane piramide veće je tvrdoće od površine materijala po kojemu se giba te zbog toga, pri gibanju piramide po površini tog materijala, dolazi do odvajanja čestica trošenja i pojave traga trošenja.

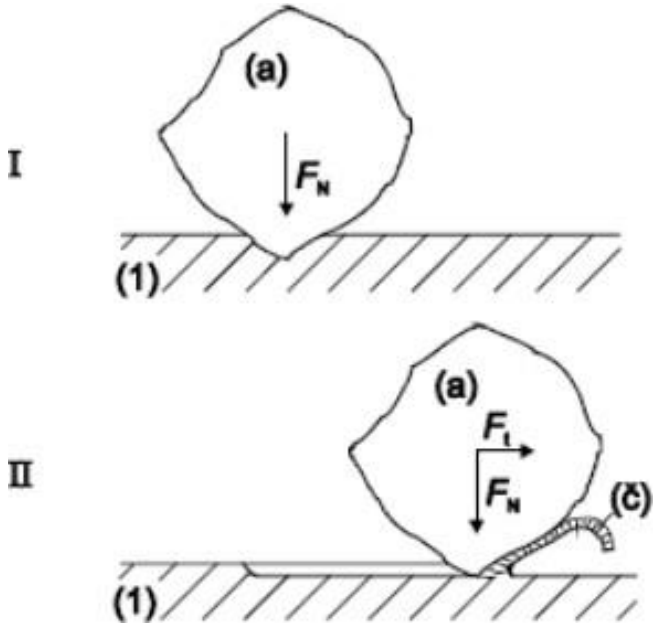
Teorijski model abrazije prikazan je na slici 6.



Slika 6. Teorijski model abrazije [7]

3.2.2. Realna abrazija

Sve mehanizme trošenja moguće je prikazati jediničnim događajima. Abrazijske su čestice u prirodi uglavnom nedefinirane geometrije. Abrazija se kao proces mikrorezanja može prikazati u dvjema fazama jediničnoga događaja, slika 7.



Slika 7. Jedinični događaj abrazije [5]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dviju faza:

- u prvoj fazi abrazivna čestica (a) prodire površinu abradiranoga materijala (1) pod utjecajem normalne komponente sile F_N
- u drugoj fazi dolazi do istiskivanja materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente sile F_t. [5]

3.2.3. Mehanizmi trošenja abrazijom

Mehanizam trošenja abrazijom najčešće se promatra sa sljedeća tri gledišta:

- prema međusobnom odnosu tijela u tribosustavu
- prema tvrdoći trošene površine i abraziva
- prema međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine.

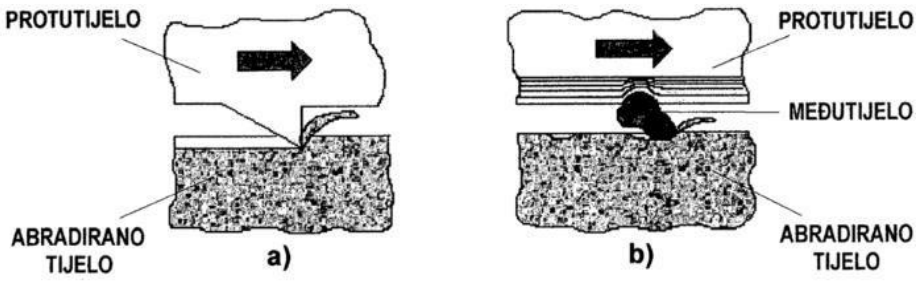
I. Ovisno o međusobnom odnosu tijela u tribosustavu

a) abrazija u dodiru dvaju tijela (engl. Two-Body Abrasion) – tribosustav se sastoji od abrazivnoga tijela i abrazivnoga protutijela

b) abrazija u dodiru triju tijela (engl. Three-Body Abrasion) – tribosustav se sastoji od abrazivnoga tijela, abrazivnoga protutijela i slobodnih čestica (međutijela). Te se čestice slobodno gibaju između abrazivnoga tijela i abrazivnoga protutijela djelujući abrazijski.

Do znatno više odvojenih čestica trošenja dolazi kod abrazije u dodiru dvaju tijela nego kod abrazije u dodiru triju tijela. Slobodne čestice (međutijela) su kod abrazije u dodiru triju tijela samo oko 10 % vremena u dodiru s abrazivnim tijelom, dok se ostatak vremena kotrljaju u slobodnom međuprostoru.

Abrazija u dodiru dvaju i triju tijela prikazana je na slici 8.

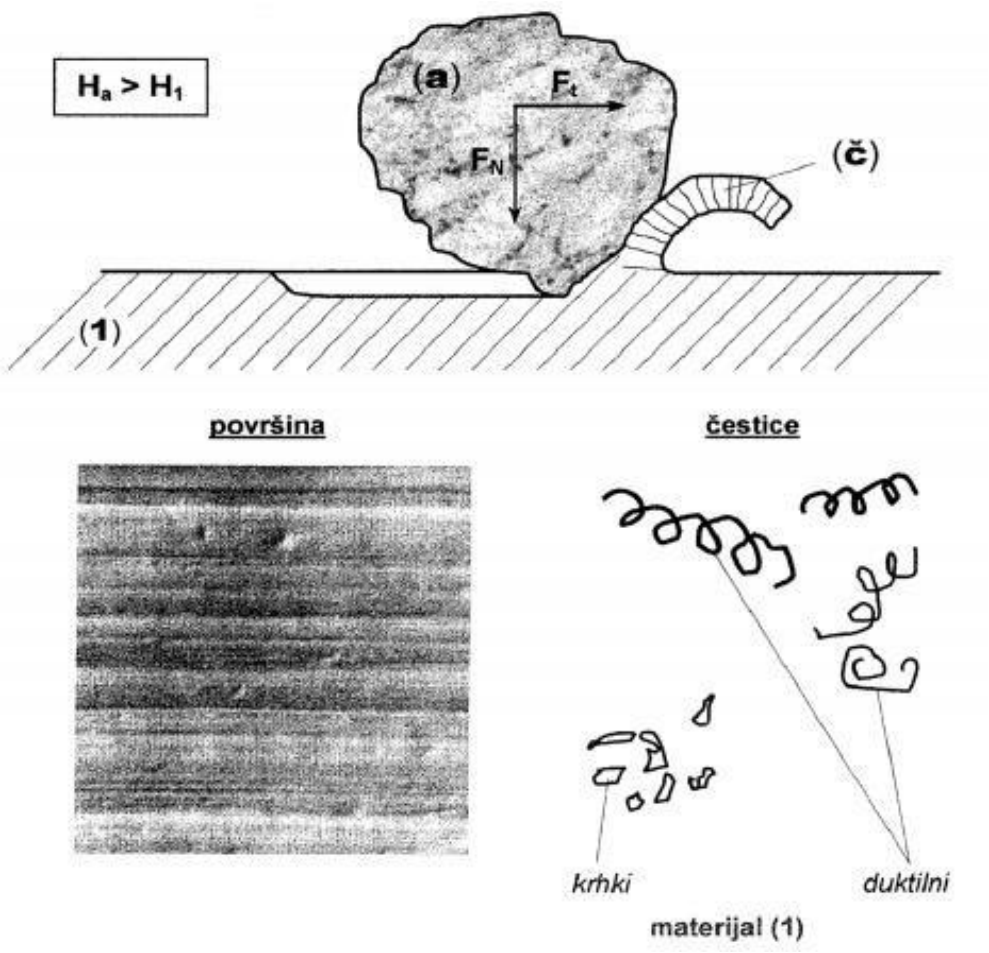


Slika 8. Abrazija u dodiru dvaju (a) i triju tijela (b) [8]

II. Ovisno o odnosu tvrdoće trošene površine i abraziva

a) čista abrazija – tvrdoća abraziva (a), H_a, veća je od tvrdoće površine abradiranoga materijala (1), H_1. Također je riječ o čistoj abraziji u slučaju da je trošena površina višefazna i da je tvrdoća abraziva veća od svih faza od kojih se površina sastoji. Nakon abrazije trošena je površina izbrazdana, dok su čestice trošenja (č) oblika spiralnih strugotina ako je abradirani materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine ako je abradirani materijal krhak.

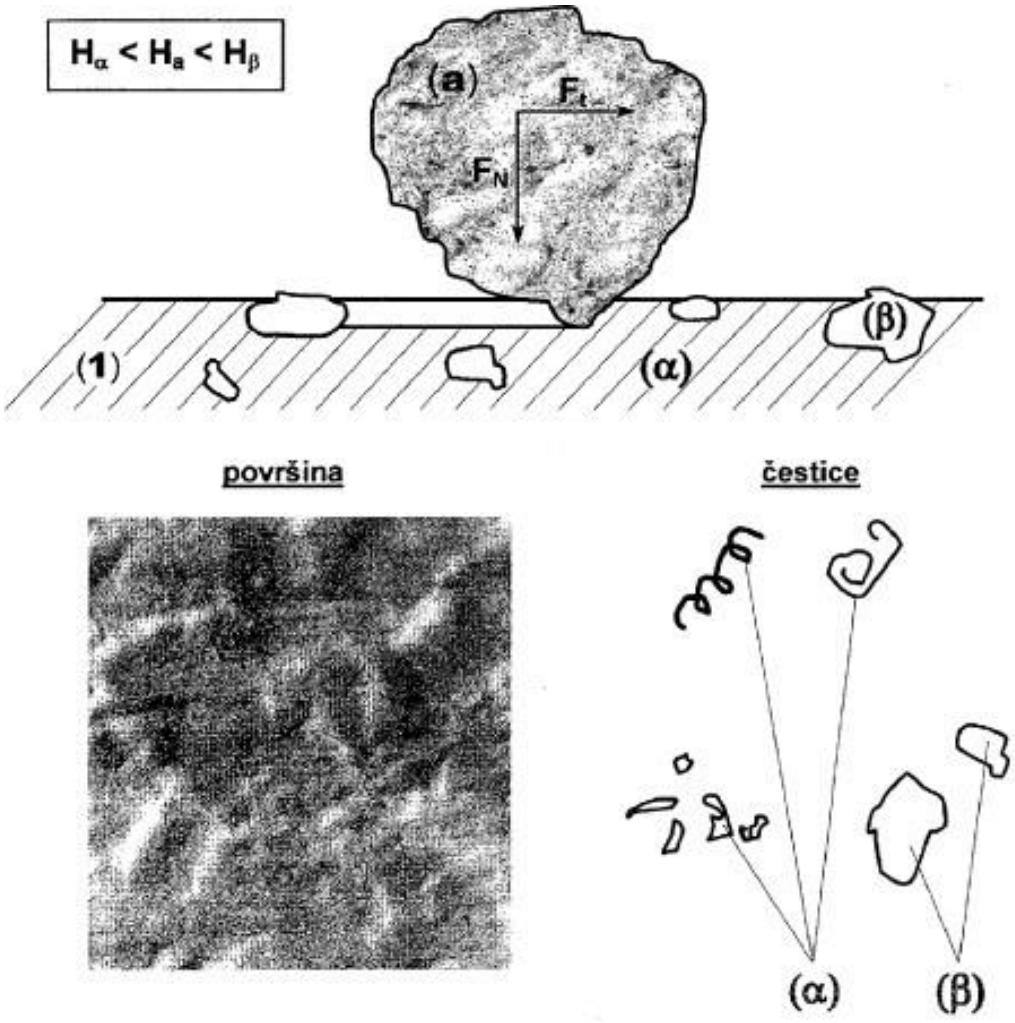
Shematski prikaz čiste abrazije i oblika čestica trošenja te fotografija abradirane površine prikazani su na slici 9.



Slika 9. Čista abrazija [5]

b) selektivna abrazija – tvrdoća abraziva (a), H_a, veća je od tvrdoće faze (α), H_α, i manja od tvrdoće faze β, H_β, površinskoga sloja abradiranoga materijala. Na trošenoj površini dolazi do pojave brazda na mjestima faza manje tvrdoće, dok će se faze veće tvrdoće povremeno otkidati zbog „potkopavanja“ abraziva.

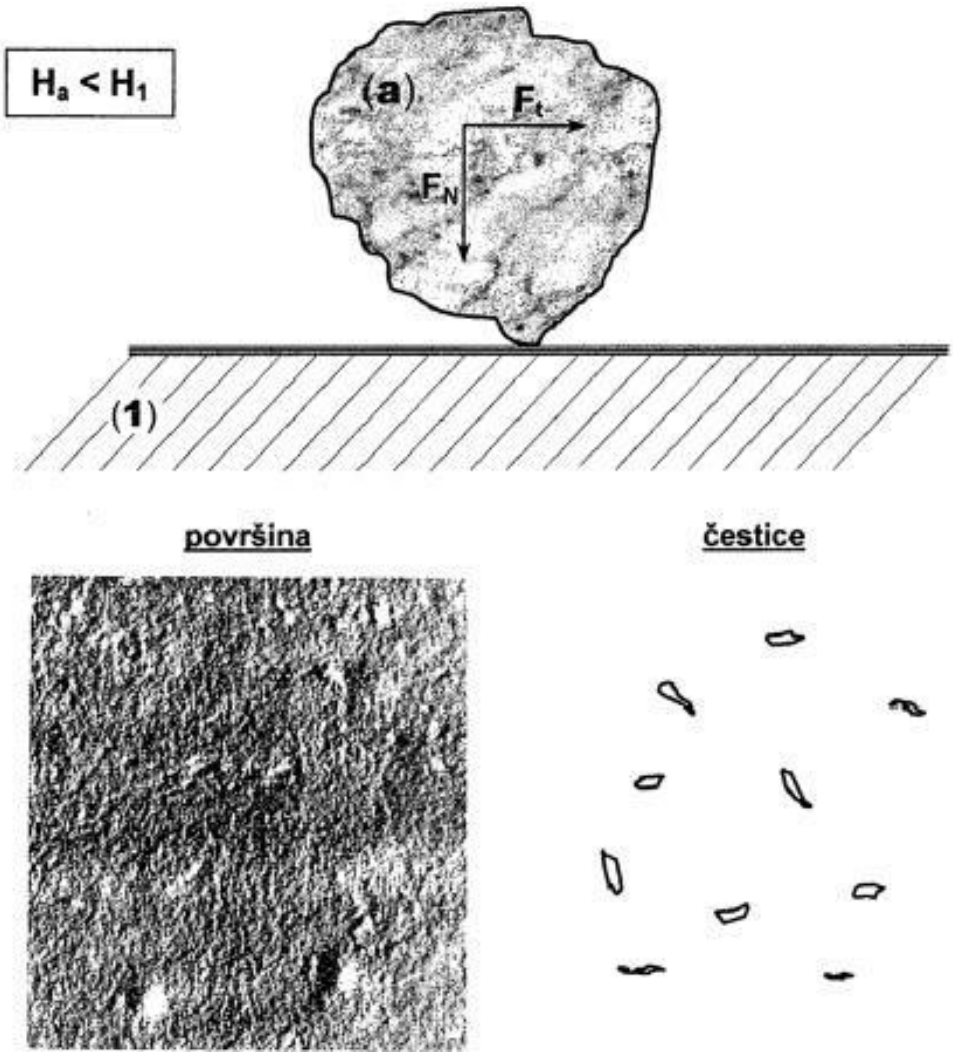
Shematski prikaz selektivne abrazije i oblika čestica trošenja te fotografija abradirane površine prikazani su na slici 10.



Slika 10. Selektivna abrazija [5]

c) nulta abrazija – tvrdoća abraziva(a), H_a, manja je od tvrdoće abradirane površine (1), H_1. Čestice trošenja su sitne ljuske koje potječu od vanjskoga graničnog sloja na površini (sloj oksida, prljavštine ili adsorbiranih plinova).

Shematski prikaz nulte abrazije i oblika čestica trošenja te fotografija abradirane površine prikazani su na slici 11.

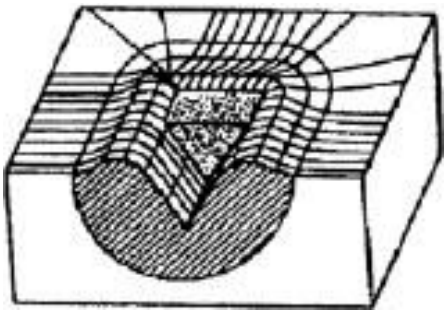


Slika 11. Nulta abrazija [5]

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

a) mikrobrazdanje površine – proces odnošenja materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice. Abradirani materijal potisnut je u stranu u obliku bočnih grebena, došlo je do intenzivne plastične deformacije površine materijal, ali nema čestica trošenja.

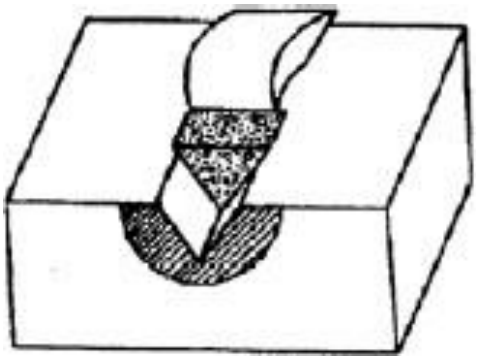
Oblik mikrobrazde i plastična deformacija materijala kod mikrobrazdanja shematski su prikazani na slici 12.



Slika 12. Deformacija materijala izazvana mikrobrazdanjem [8]

b) mikrorezanje površine– proces odnošenja materijala jednak je volumenu zareza nastaloga prolaskom abrazivne čestice.

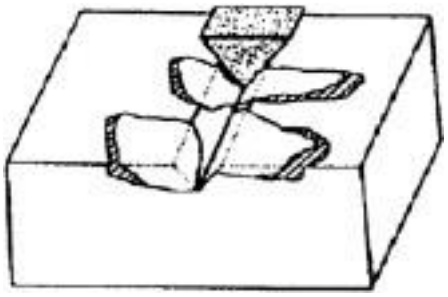
Oblik trošenja kod mikrorezanja shematski je prikazan na slici 13.



Slika 13. Deformacija materijala izazvana mikrorezanjem [8]

c) mikronaprsnuća površine – proces odnošenja materijala karakterističan za krhke površine gdje se materijal troši mehanizmom nastanka i širenja pukotina. Čestice trošenja malo su veće nego kod ostalih procesa mikrotrošenja.

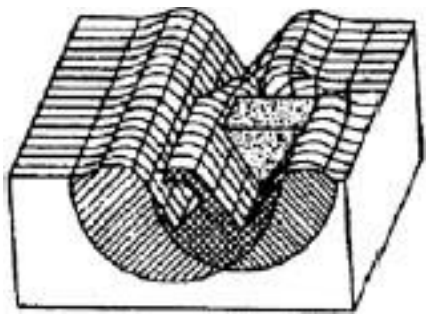
Oblik trošenja kod mikronaprsnuća i čestice koje pri tome nastanu shematski su prikazani na slici 14.



Slika 14. Deformacija materijala izazvana mikronaprsnućima [8]

d) mikroumor površine – proces odnošenja materijala mehanizmom umora površine zbog učestaloga izmjeničnog opterećenja. Materijal je izložen trenutnim deformacijama uslijed čega nastaju mikropukotine. Nastale mikropukotine se šire i u konačnici uzrokuju odvajanje dijelova materijala trošene površine.

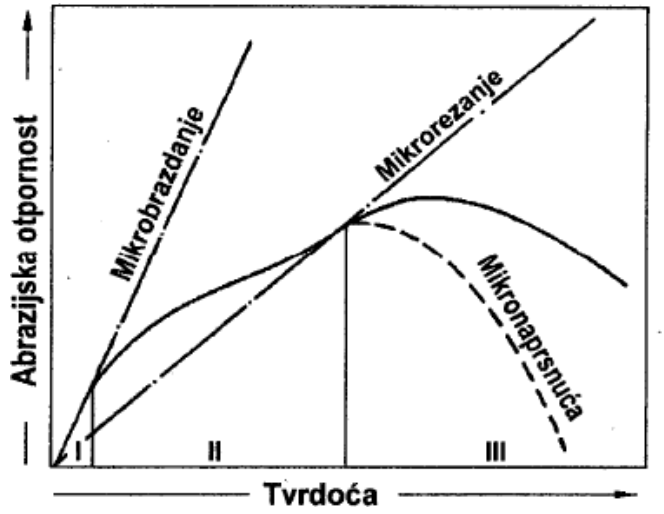
Deformacija materijala koja nastaje pri procesu mikroumora shematski je prikazana na slici 15.



Slika 15. Deformacija materijala izazvana mikroumorom površine [8]

Jedan od najutjecajnijih čimbenika abrazijskoga trošenja je tvrdoća trošenoga materijala. Ukoliko je tvrdoća materijala veća, to je njegova abrazijska otpornost veća.

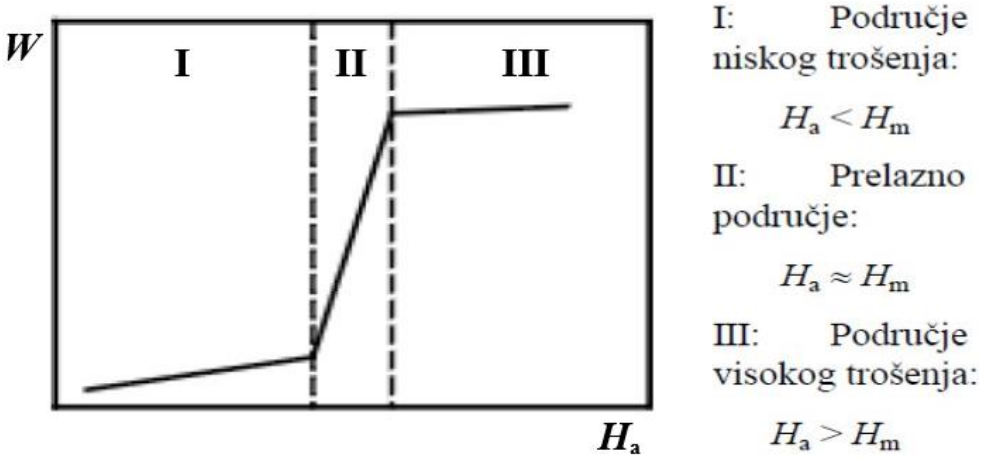
Ovisnost između tvrdoće i otpornosti na abrazijsko trošenje za različite tipove mikrotrošenja prikazana je na slici 16.



Slika 16. Ovisnost otpornosti na abrazijsko trošenje o tvrdoći materijala [9]

Još jedan važan čimbenik je odnos tvrdoće abraziva i trošenoga materijala.

Ovisnost abrazijskoga trošenja o tvrdoćama abraziva i trošenoga materijala, gdje su H_a tvrdoća abraziva, W intenzitet trošenja te H_m tvrdoća trošenoga materijala, prikazana je na slici 17.



Slika 17. Ovisnost abrazijskoga trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala [10]

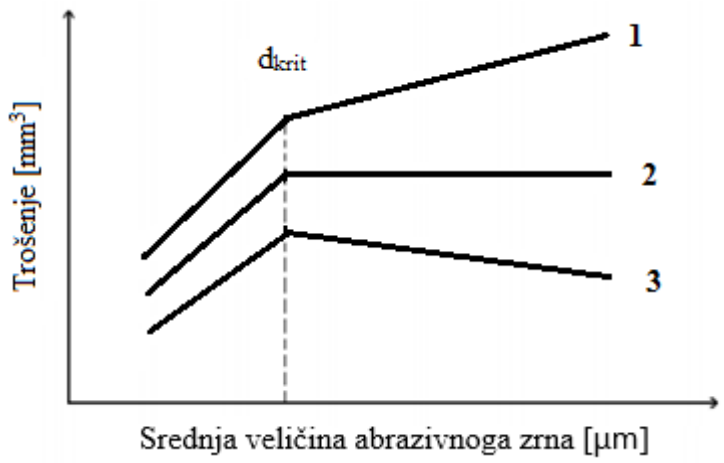
3.3. Kritična veličina abrazivnoga zrna

Kritična veličina abrazivnoga zrna vrlo je bitan čimbenik pri trošenju materijala. Ovaj fenomen pojavljuje se kod abrazije u dodiru dvaju tijela, abrazije u dodiru triju tijela, eroziji te procesima obrade odvajanjem čestica. Veličina abrazivnoga zrna povezana je linearno s gubitkom mase trošenoga materijala sve do kritične veličine abrazivnoga zrna d_{krit} (engl. critical particle size – CPS). Ako veličina abrazivnoga zrna raste preko kritične veličine, ovisnost između gubitka mase i veličine abrazivne čestice se mijenja.

Prema slici 18., vidljive su tri moguće promjene:

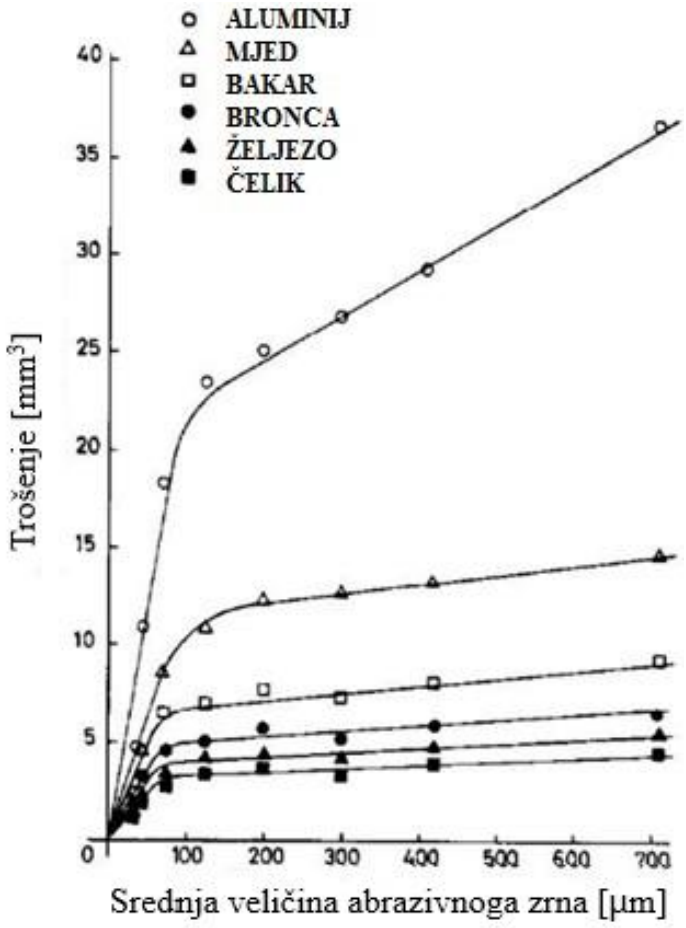
- slučaj 1 – gubitak mase nakon dosegnute kritične veličine abrazivnoga zrna i dalje se povećava, ali u manjoj mjeri
- slučaj 2 – gubitak mase nakon dosegnute kritične veličine abrazivnoga zrna ostaje konstantan
- slučaj 3 – gubitak mase nakon dosegnute kritične veličine abrazivnoga zrna se smanjuje.

Utjecaj veličine abrazivnoga zrna na abrazijsko trošenje materijala prikazan je na slici 18.



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

Postoje mnoge hipoteze koje objašnjavaju ovaj fenomen. Niti jednu od tih hipoteza nije prihvatila cijela znanstvena zajednica. Znanstvenici G.K. Nathan i W.J.D. Jones [12] bavili su se ovom problematikom i proveli su istraživanje o utjecaju veličine abrazivnoga zrna na gubitak mase trošenoga materijala za različite materijale. Tribosustav pri ispitivanju sastojao se od abrazivnoga tijela i abrazivnoga protutijela (abrazija u dodiru dvaju tijela). Među ispitivanim materijalima nalazio se i aluminij, a kao abrazivne čestice korištene su čestice silicijevoga karbida. Rezultati njihova ispitivanja prikazani su na slici 19. Kod svih ispitivanih materijala uočljiv je linearni rast trošenja sve do veličine abrazivnoga zrna od 70 μm. Daljnjim povećanjem abrazijskoga zrna, između 70 i 150 μm, dolazi do pada nagiba krivulja, a povećanjem abrazijskoga zrna preko 150 μm ponovno dolazi do linearnosti s manjim nagibom nego prije kritične veličine abrazivnoga zrna.



Slika 19. Utjecaj veličine abrazivnoga zrna na gubitak mase trošenoga materijala [12]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Cilj rada

Osnovni cilj rada je utvrđivanje kako parametri precipitacijskoga očvrsnuća utječu na abrazijsku otpornost precipitacijski očvrsnute aluminijske legure. Pod parametrima precipitacijskoga očvrsnuća podrazumijevaju se brzina gašenja u fazi homogenizacije te temperatura i vrijeme grijanja u fazi dozrijevanja.

4.2. Materijal za ispitivanje

Kao materijal za ispitivanje korištena je aluminijska legura čiji je kemijski sastav prikazan u tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav Al-legure

Kemijski element	Zn	Mg	Fe	Mn	Si	Zr	Cu	Sb	Ti	Cr	Al
Udio, %	7,68	3,54	0,222	0,206	0,151	0,109	0,044	0,042	0,039	0,013	ostatak

Iz prikazanoga kemijskoga sastava Al-legure može se zaključiti da je riječ o Al-Zn-Mg leguri koja pripada skupini iz serije 7XXX, poznatih pod nazivom konstruktali.

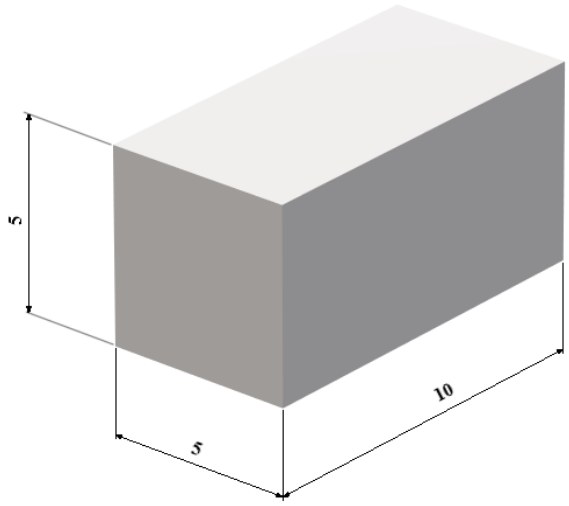
U okviru predviđenih ispitivanja provedeno je mjerenje gustoće materijala. Gustoća je izmjerena u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu pomoću uređaja *Mettler Toledo*. Provedena su tri mjerenja, a srednja vrijednost gustoće iznosi $\rho = 2{,}7857$ g/cm^3.

Uređaj za mjerenje gustoće prikazan je na slici 20.



Slika 20. Uređaj za mjerenje gustoće

Ispitivanje abrazijske otpornosti provedeno je na uzorcima čija je geometrija prikazana na slici 21. Uzorci su izrezani iz šipke promjera 20 mm u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. S obzirom na to da je ispitivanje uključivalo 11 različitih kombinacija parametara toplinske obrade, sveukupno su izrezana 22 ispitna uzorka, po 2 za svako stanje.



Slika 21. Geometrija ispitnih uzoraka

Nakon izrezivanja uzorci su podvrgnuti različitim toplinskim obradama. Toplinska obrada provedena je u Laboratoriju za toplinsku obradu Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Parametri toplinske obrade kojoj su uzori podvrgnuti prikazani su u tablici 2. Temperatura homogenizacije za sve uzorke iznosila je 490 °C.

Tablica 2. Parametri toplinske obrade uzoraka

Broj uzorka	Toplinska obrada
1	Homogenizacija i sporo hlađenje u peći
2	Homogenizacija i gašenje u vodi
3	Homogenizacija, gašenje u vodi i dozrijevanje na 130 °C / 1 h
4	Homogenizacija, gašenje u vodi i dozrijevanje na 130 °C / 4 h
5	Homogenizacija, gašenje u vodi i dozrijevanje na 130 °C / 10 h
6	Homogenizacija, gašenje u vodi i dozrijevanje na 160 °C / 1 h
7	Homogenizacija, gašenje u vodi i dozrijevanje na 160 °C / 4 h
8	Homogenizacija, gašenje u vodi i dozrijevanje na 160 °C / 10 h
9	Homogenizacija, gašenje u vodi i dozrijevanje na 190 °C / 1 h
10	Homogenizacija, gašenje u vodi i dozrijevanje na 190 °C / 4 h
11	Homogenizacija, gašenje u vodi i dozrijevanje na 190 °C / 10 h

4.3. Provođenje ispitivanja

Na dobivenim uzorcima provedena su sljedeća ispitivanja:

- otpornost na abrazijsko trošenje
- mjerenje mikrotvrdoće
- analiza mikrostrukture.

4.3.1. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitni su se uzorci nakon rezanja ručno brusili zbog postizanja što kvalitetnije površine. Nakon toga uzorcima su pomoću pomične mjerke izmjerene dimenzije poprečnoga presjeka.

Na uzorcima je također izmjerena početna masa pomoću uređaja *E. Mettler* (točnost na četiri decimale) u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Uređaj za mjerenje mase prikazan je na slici 22.



Slika 22. Uređaj za mjerenje mase

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je na uređaju *Taber abrader* u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uređaj sa ispitnim uzorkom i abrazivnim papirom prikazan je na slici 23. Ispitni uzorak postavljen je u nosač, stegnut te oslonjen na površinu abrazivnoga papira. Abrazivni papir čvrsto je spojen s diskom uređaja i rotira se skupa s njim. Promjer diska uređaja je 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.

Abrazijsko trošenje provedeno je na brusnim papirima različitih granulacija. Materijal abrazivnih čestica brusnih papira je Al_2O_3. Navedeni su brusni papiri fleksibilni, promjera 115 mm te namijenjeni obradi metala u suhim i mokrim uvjetima.

Korišteni brusni papiri prikazani su na slici 24.



Slika 23. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje



Slika 24. Brusni papiri

Usporedba kvalitete i srednjega promjera abrazivnoga zrna korištenih brusnih papira prikazana je u tablici 3.

Tablica 3. Usporedba kvalitete brusnoga papira i srednjega promjera abrazivnoga zrna

Kvaliteta brusnoga papira (ISO/FEPA)	Srednji promjer abrazivnoga zrna [μm]
P180	82
P240	58,5
P600	25,8

Za svaki uzorak trošenje je trajalo 100 sekundi što odgovara ukupnom broju od 100 okretaja diska. Pritom se ostvari duljina trošenja od oko 25 m.

Nakon svakoga trošenja izmjerena je masa uzorka kako bi se mogao odrediti gubitak mase pri trošenju. Kako je poznata gustoća uzoraka gubitak mase sveden je na gubitak volumena. Dijeljenjem gubitka volumena s poprečnim presjekom pripadajućega uzorka dobije se intenzitet abrazijskoga trošenja.

4.3.2. Mjerenje tvrdoće HV3

Otpornost na abrazijsko trošenje usko je povezano s tvrdoćom materijala, ali ta dva svojstva nisu u potpunosti jednoznačna. Zato je na uzorcima provedeno mjerenje tvrdoće kako bi se odredila povezanost otpornosti na abrazijsko trošenje s tvrdoćom materijala.

Mjerenje tvrdoće provedeno je pomoću uređaja *Indentec* u Laboratoriju za mehanička svojstva Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uređaj mjeri tvrdoću Vickersovom metodom pri različitim opterećenjima. Za potrebe ovoga ispitivanja uzorci su opterećivani silom od 29,42 N (HV3).

Provedeno je pet uzastopnih mjerenja tvrdoće svakoga ispitnog uzorka te je izračunata srednja vrijednost tvrdoće.

Uređaj za mjerenje tvrdoće prikazan je na slici 25.

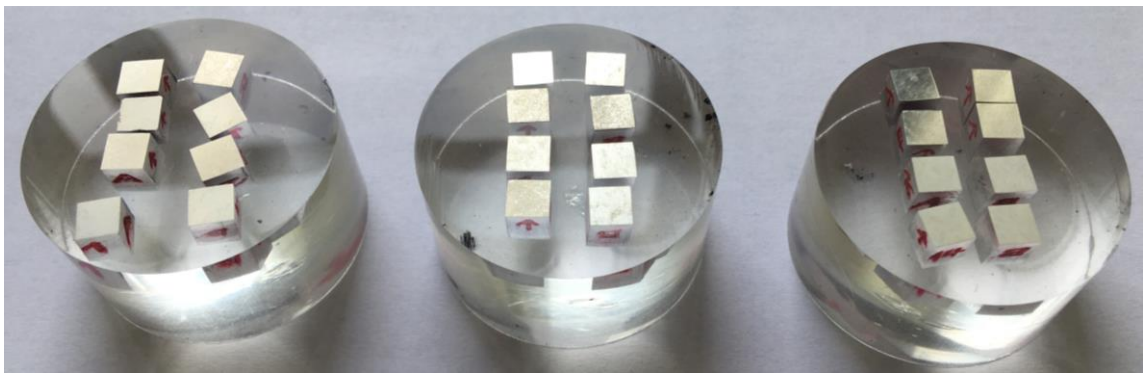


Slika 25. Uređaj za mjerenje tvrdoće

4.3.3. Analiza mikrostrukture

Na ispitnim uzorcima provedena je analiza mikrostrukture u poliranom i nagriženom stanju. Analiza je provedena u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Uzorci su prvo zaliveni u polimernu masu kako bi bili pogodni za daljnju metalografsku pripremu, slika 26.



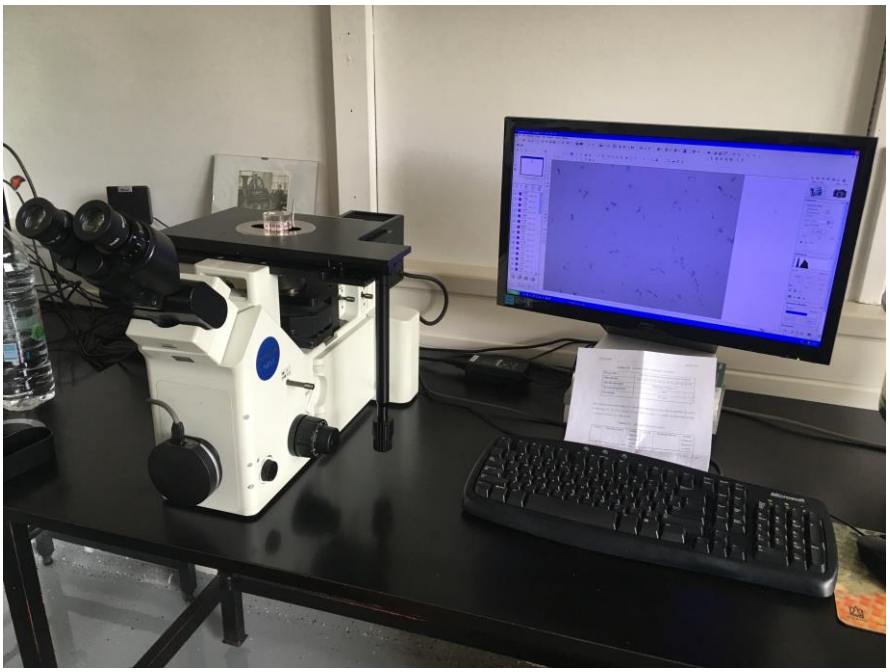
Slika 26. Ispitni uzorci u polimernoj masi

Nakon zalijevanja ispitnih uzoraka provedeno je brušenje i poliranje. Poslije poliranja analizirana je površina svih uzoraka na optičkom mikroskopu pri različitim povećanjima (od 50× do 1000×). Analiza mikrostrukture provedena je na uređaju OLYMPUS, slika 27.

Nakon analize u poliranom stanju uzorci su nagriženi kako bi se analizirala mikrostruktura u nagriženom stanju. Za nagrizanje aluminijevih legura korišten je Kellerov reagens. To je otopina koja u 100 ml sadrži:

- 95 ml destilirane vode
- 2,5 ml HNO_3 (dušična kiselina)
- 1,5 ml HCl (klorovodična kiselina)
- 1 ml HF (fluorovodik).

Mikrostruktura površine svih uzoraka fotografirana je pri povećanju 200×, a fotografije su prikazane u poglavlju Rezultati ispitivanja.



Slika 27. Uređaj za fotografiranje mikrostrukture

4.4. Rezultati ispitivanja

Gubitak mase pri ispitivanju abrazijskoga trošenja prikazani su u tablici 4. Posebno su prikazani gubitci mase za svaku kvalitetu korištenoga brusnog papira, a u zadnjem stupcu prikazan je ukupni gubitak mase.

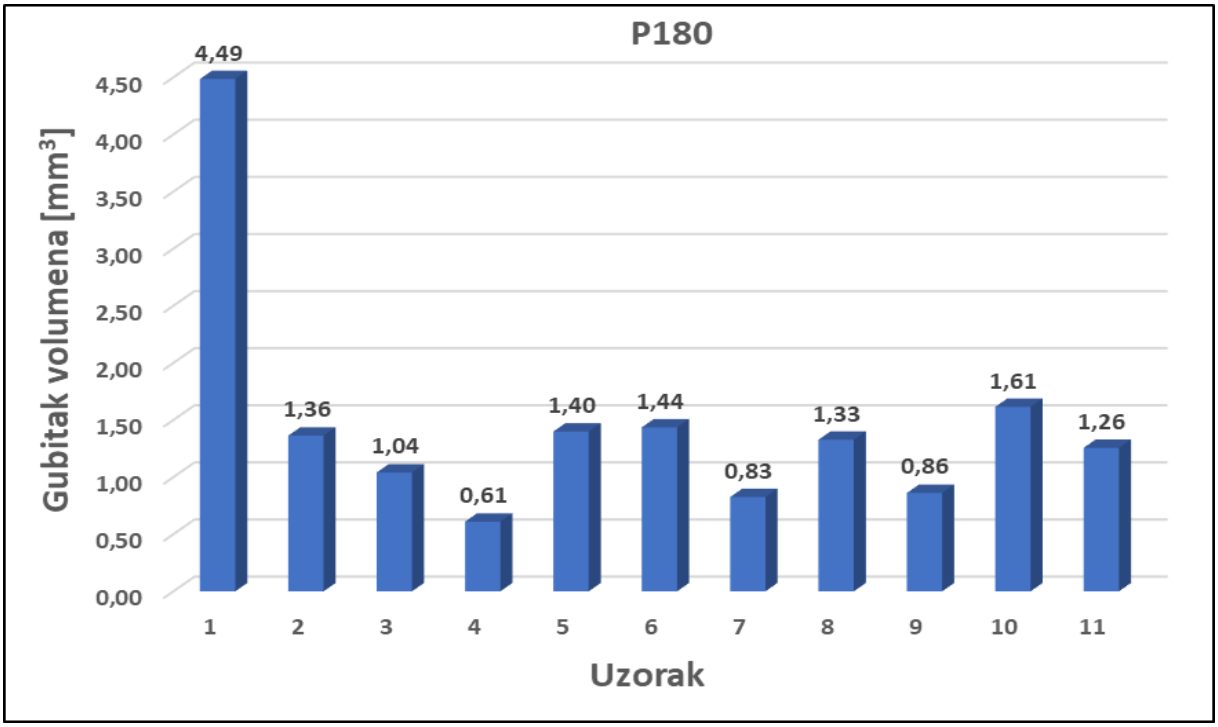
Otpornost na abrazijsko trošenje najčešće se prikazuje kao gubitak volumena. Također se gubitak volumena može svesti na veličinu abradirane površine čime se dobije intenzitet abrazijskoga trošenja.

Na slikama od 28. do 31. dijagramski su prikazane vrijednosti gubitka volumena na pojedinačnim brusnim papirima i ukupni gubitak volumena na svim uzorcima.

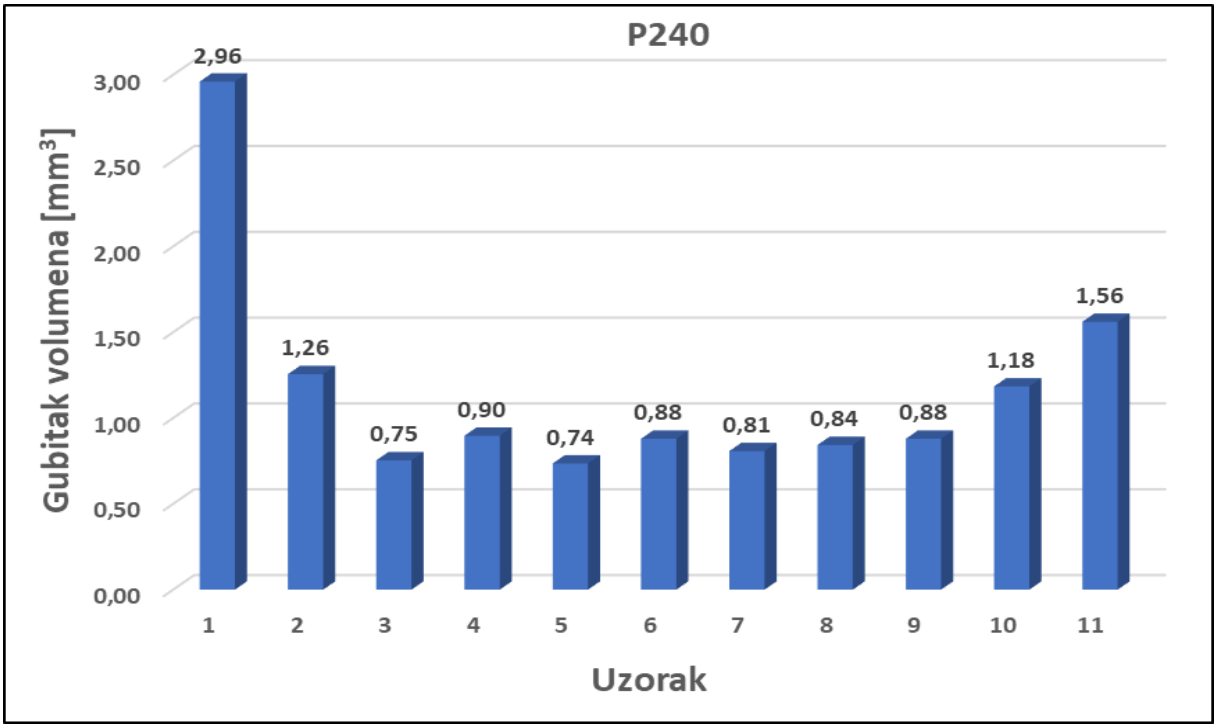
Na slikama od 32. do 35. prikazane su vrijednosti intenziteta abrazijskoga trošenja za pojedinačne brusne papire i ukupni intenzitet abrazijskoga trošenja na svim uzorcima.

Tablica 4. Gubitak mase pri abrazijskom trošenju

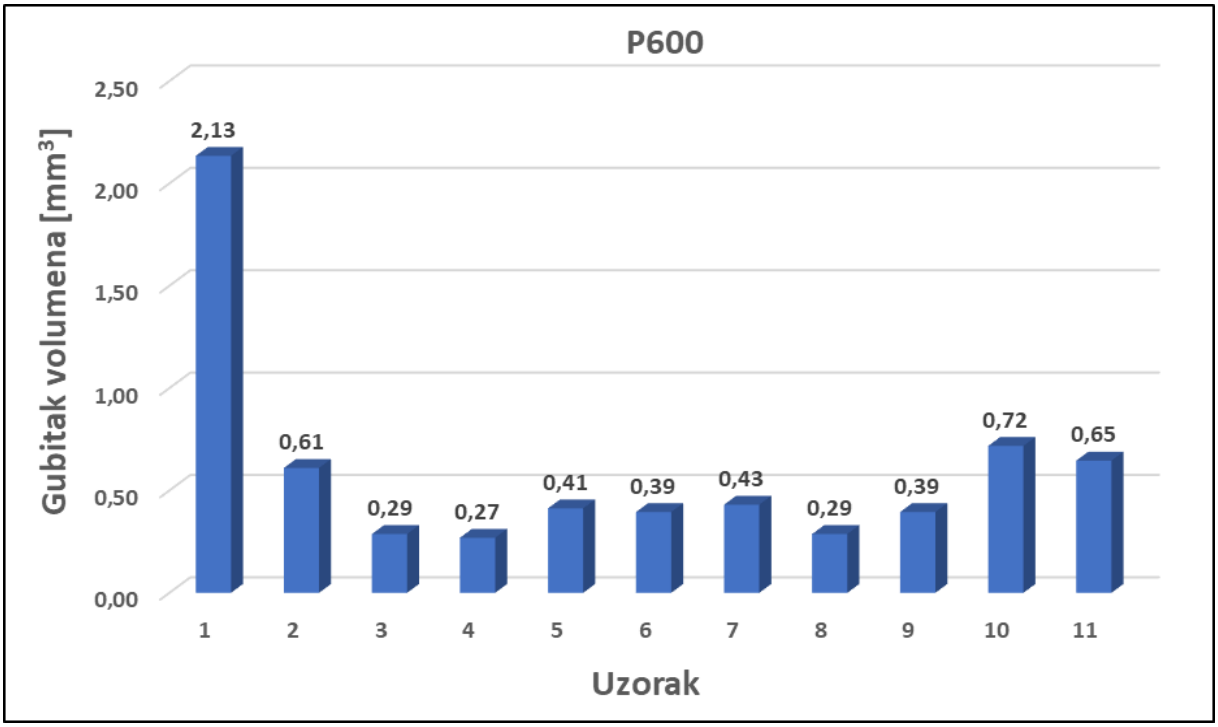
Broj uzorka	Gubitak mase [g]			
	P180	P240	P600	Ukupno
1	0,0125	0,0083	0,0030	0,0267
2	0,0038	0,0035	0,0017	0,0090
3	0,0029	0,0021	0,0008	0,0058
4	0,0017	0,0025	0,0007	0,0050
5	0,0039	0,0021	0,0011	0,0071
6	0,0040	0,0025	0,0011	0,0076
7	0,0023	0,0023	0,0012	0,0058
8	0,0037	0,0023	0,0008	0,0068
9	0,0024	0,0025	0,0011	0,0060
10	0,0045	0,0033	0,0020	0,0098
11	0,0035	0,0043	0,0018	0,0096



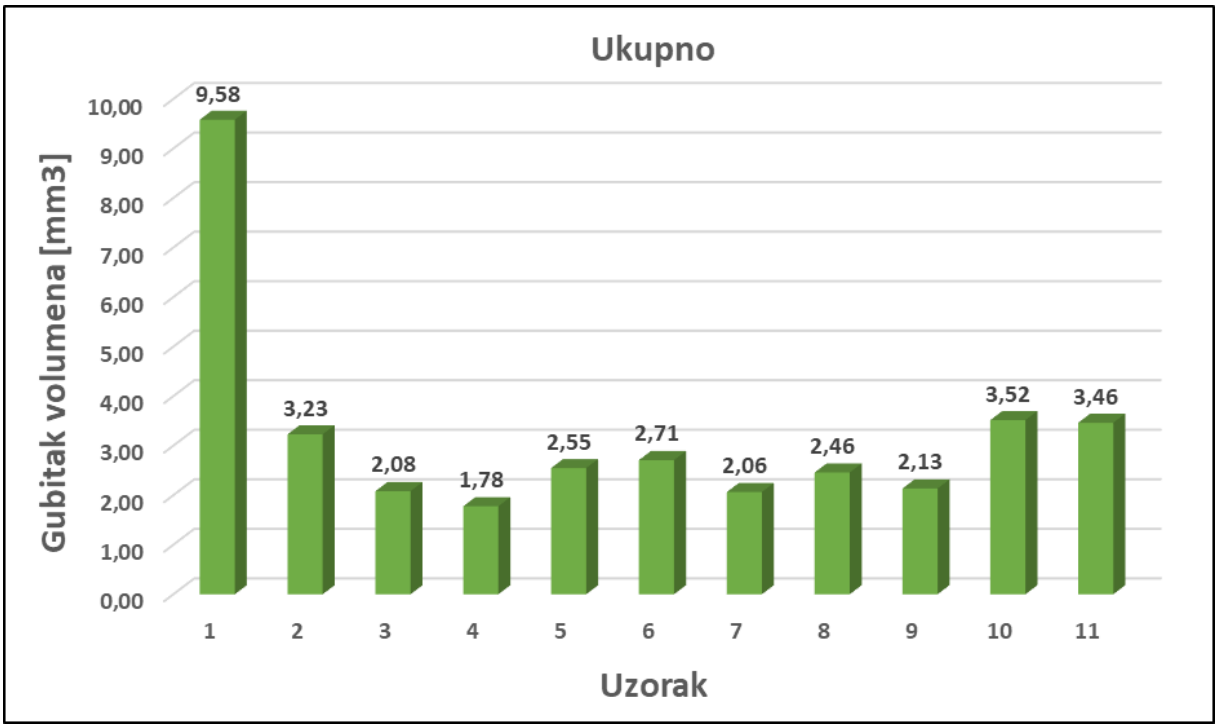
Slika 28. Gubitak volumena na brusnom papiru P180



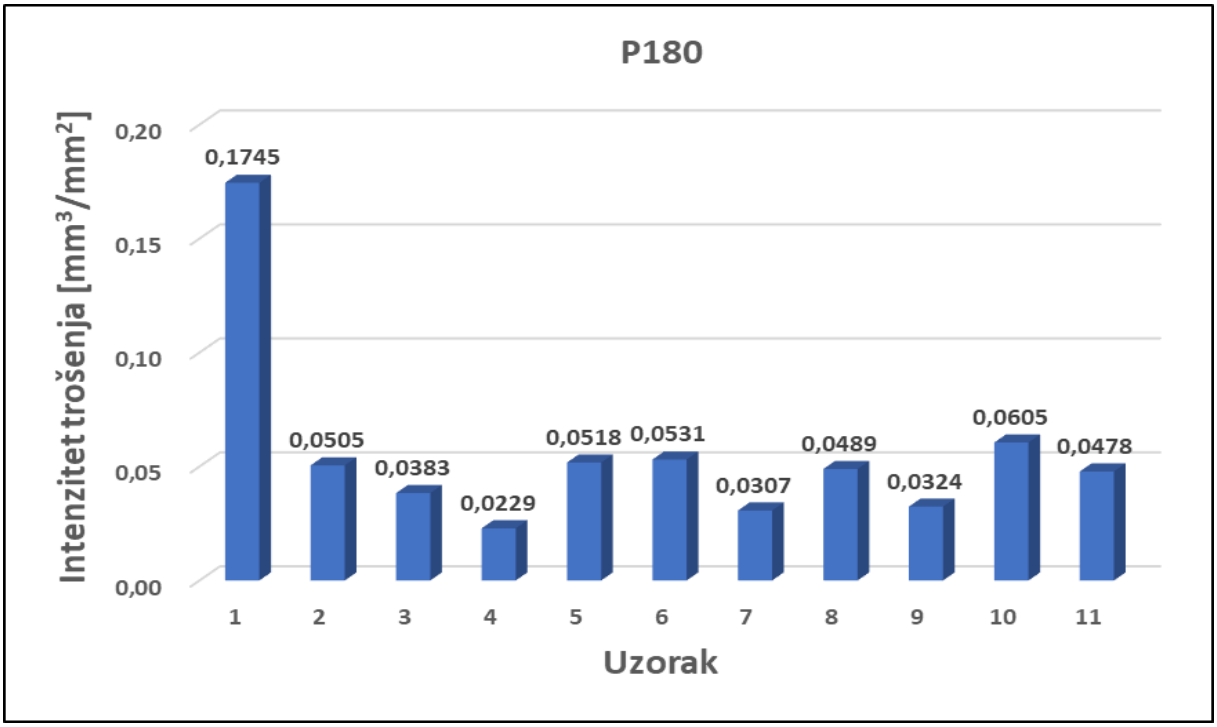
Slika 29. Gubitak volumena na brusnom papiru P240



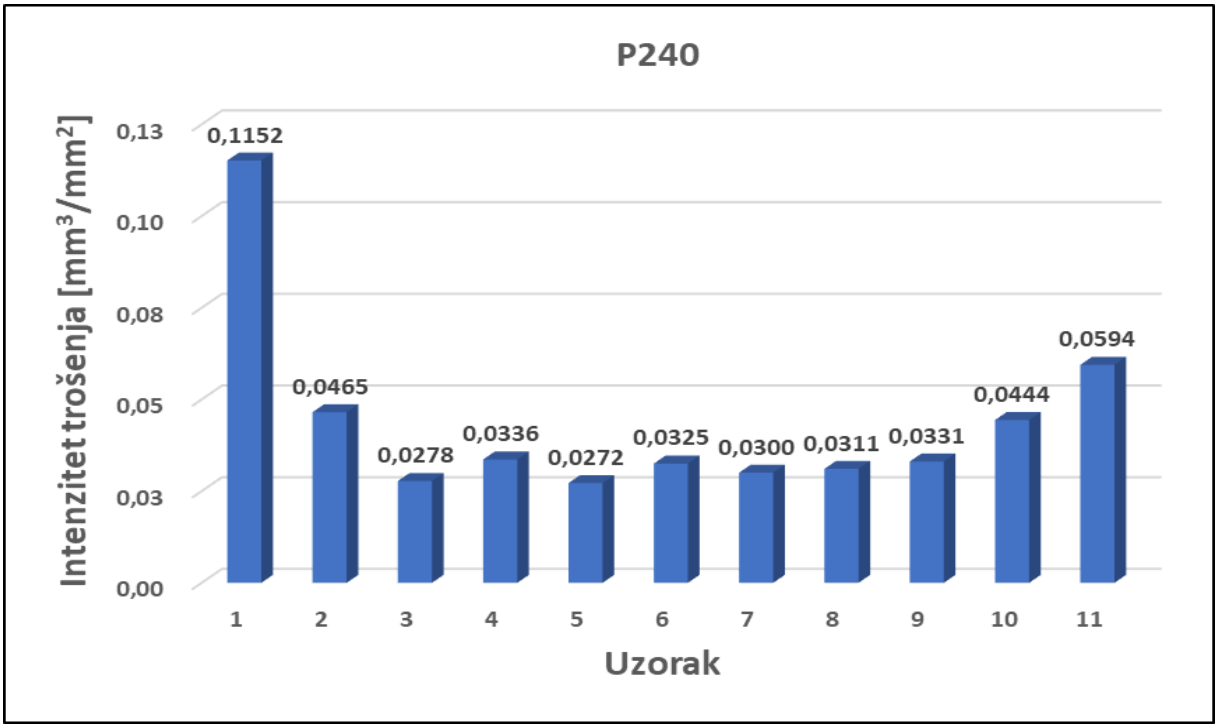
Slika 30. Gubitak volumena na brusnom papiru P600



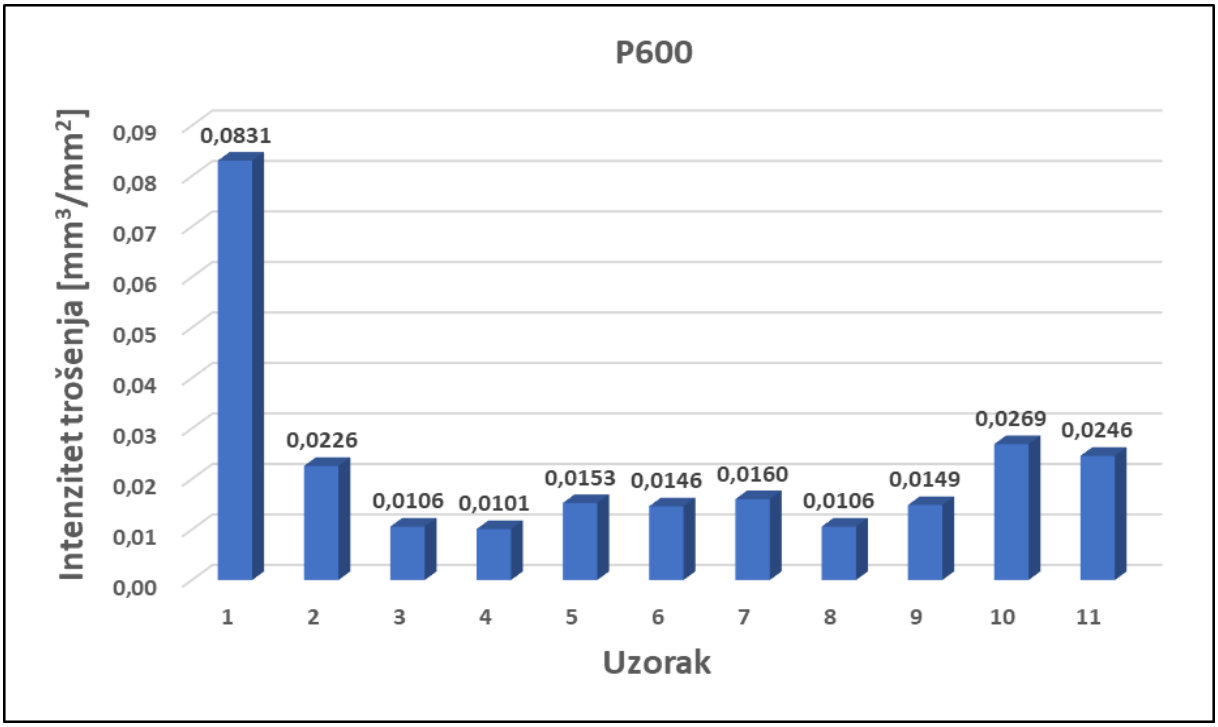
Slika 31. Ukupni gubitak volumena (kumulativno za sva tri brusna papira)



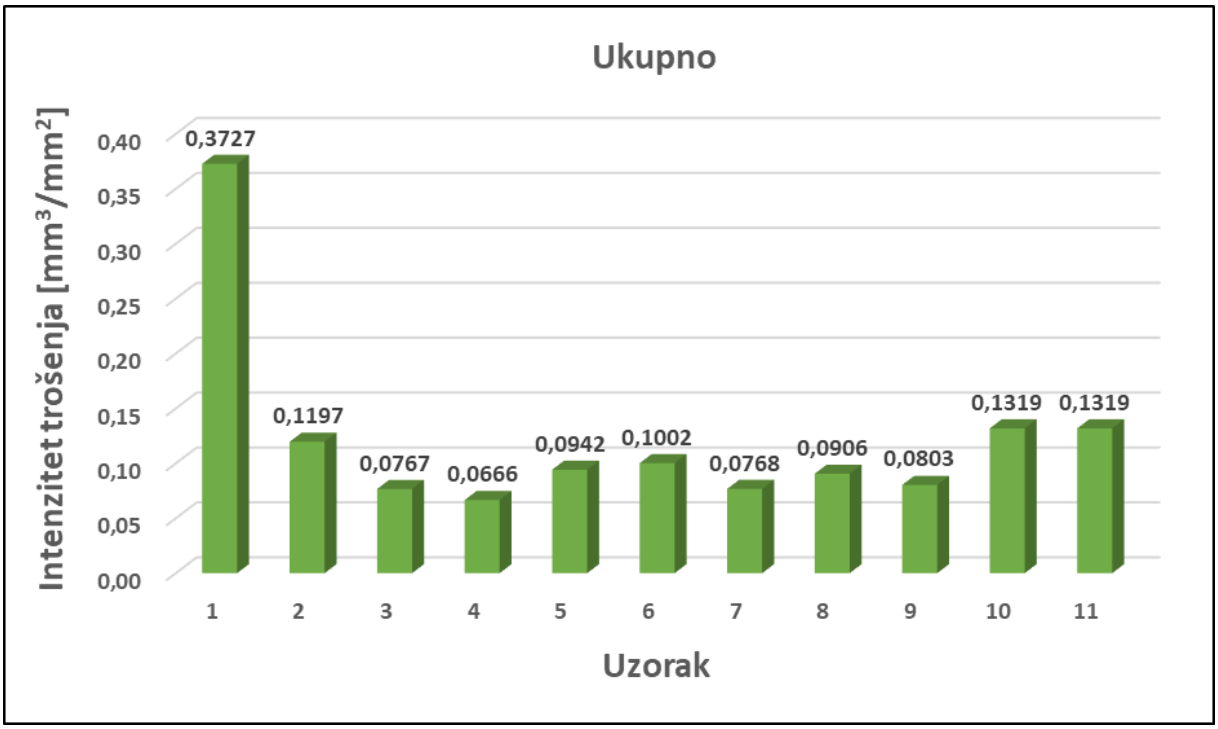
Slika 32. Intenzitet trošenja za brusni papir P180



Slika 33. Intenzitet trošenja za brusni papir P240



Slika 34. Intenzitet trošenja za brusni papir P600

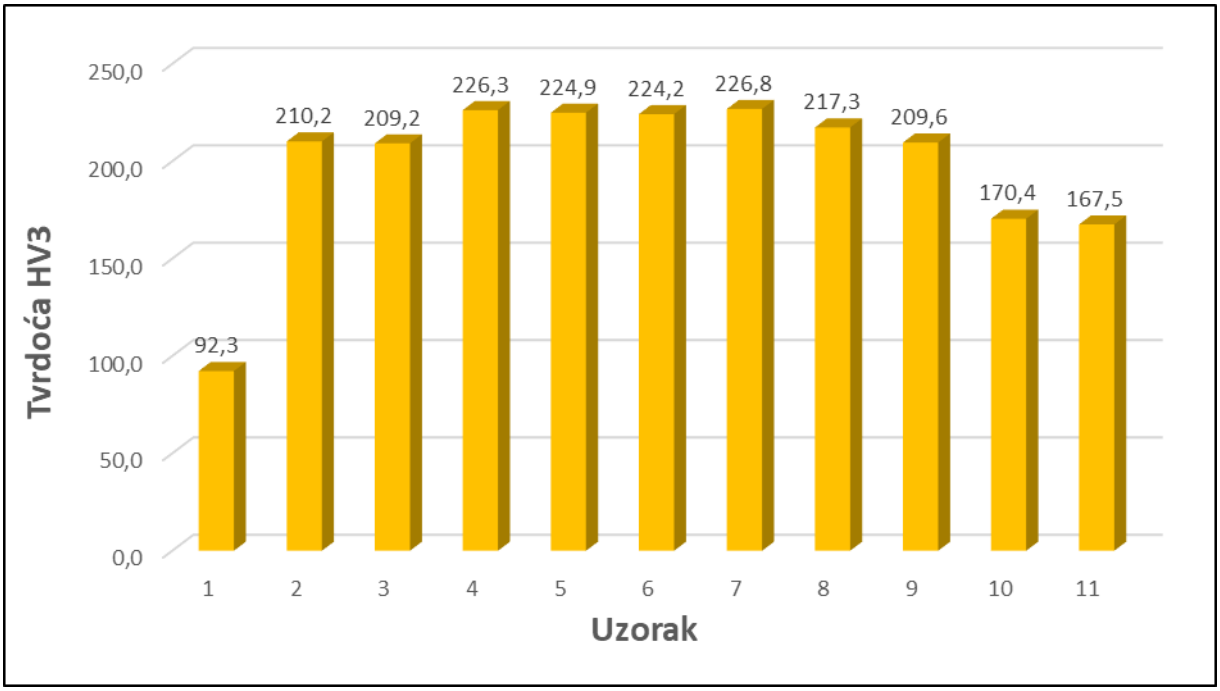


Slika 35. Ukupni intenzitet trošenja (kumulativno na sva tri brusna papira)

Rezultati mjerenja tvrdoće prikazani su u tablici 5. i u dijagramu na slici 36.

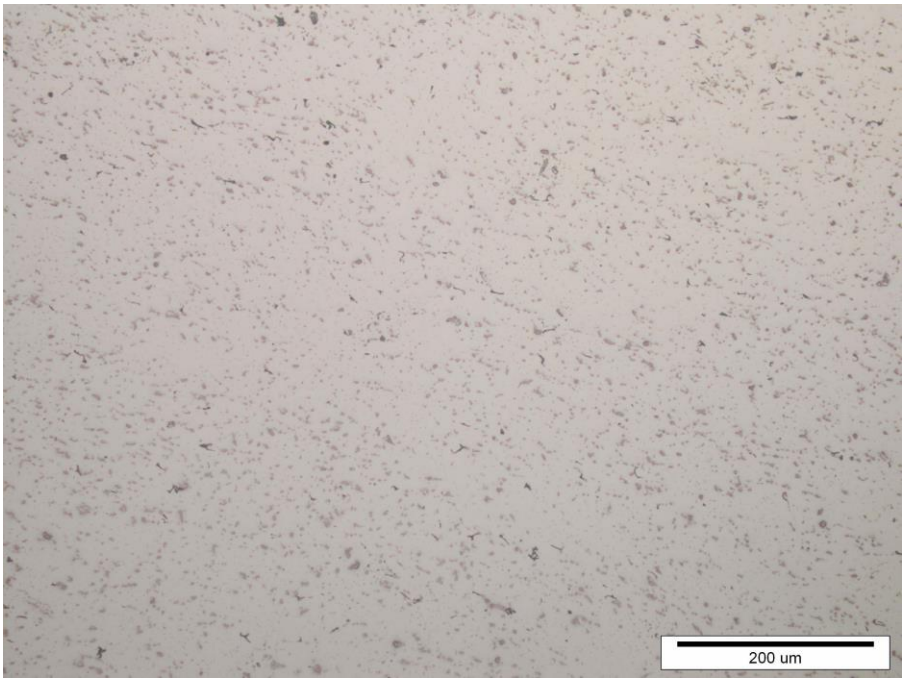
Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće

Broj uzorka	Srednja vrijednost tvrdoće HV3
1	92,3
2	210,2
3	209,2
4	226,3
5	224,9
6	224,2
7	226,8
8	217,3
9	209,6
10	170,4
11	167,5

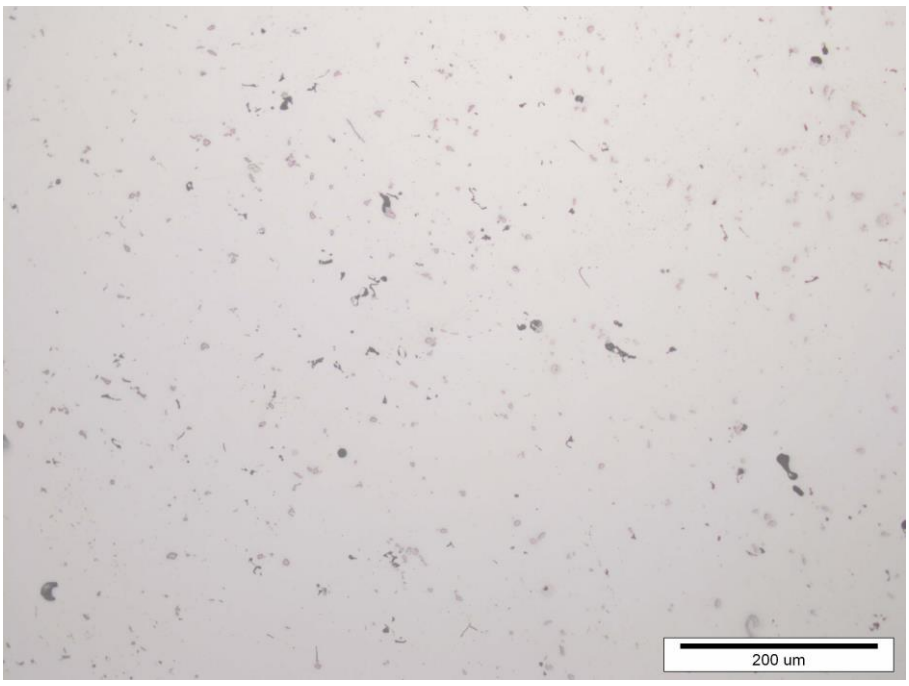


Slika 36. Rezultati mjerenja tvrdoće

Na slikama 37. i 38. prikazana je mikrostruktura uzoraka u poliranom stanju snimljena pri povećanju 200×. Prikazana je površina uzoraka 1 i 4. Uzorak 1 ima najnižu tvrdoći i najmanju otpornost na trošenje, a uzorak 4 ima vrlo visoku tvrdoću i najveću otpornost na trošenje od svih uzoraka.

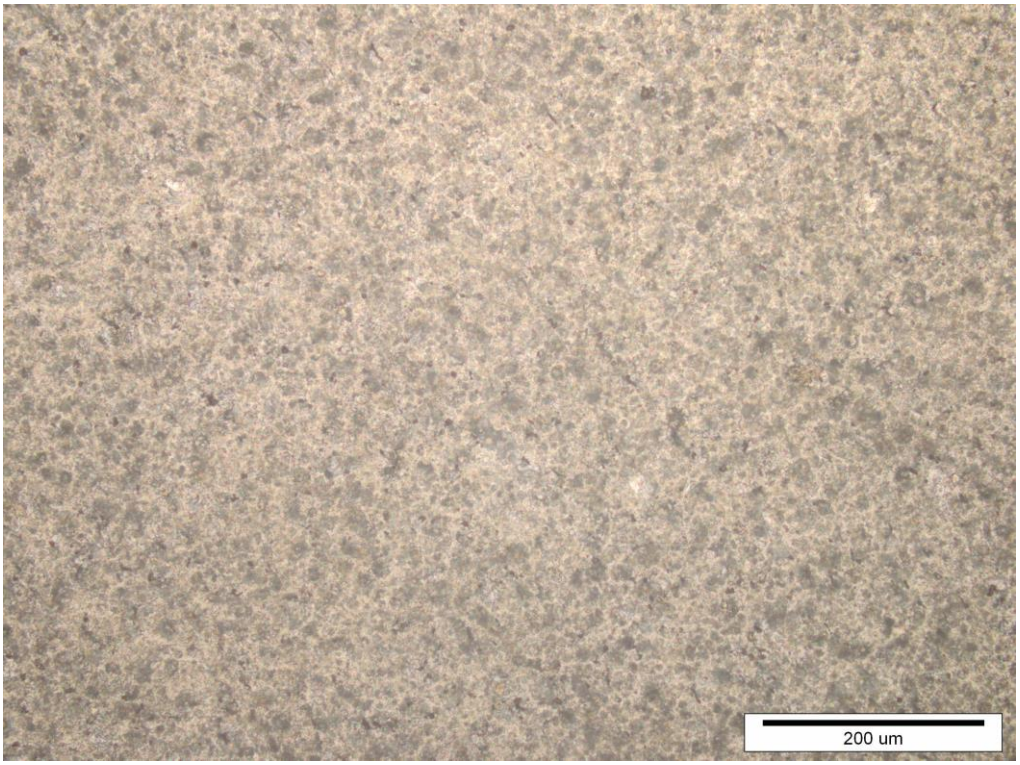


Slika 37. Polirana površina uzorka 1

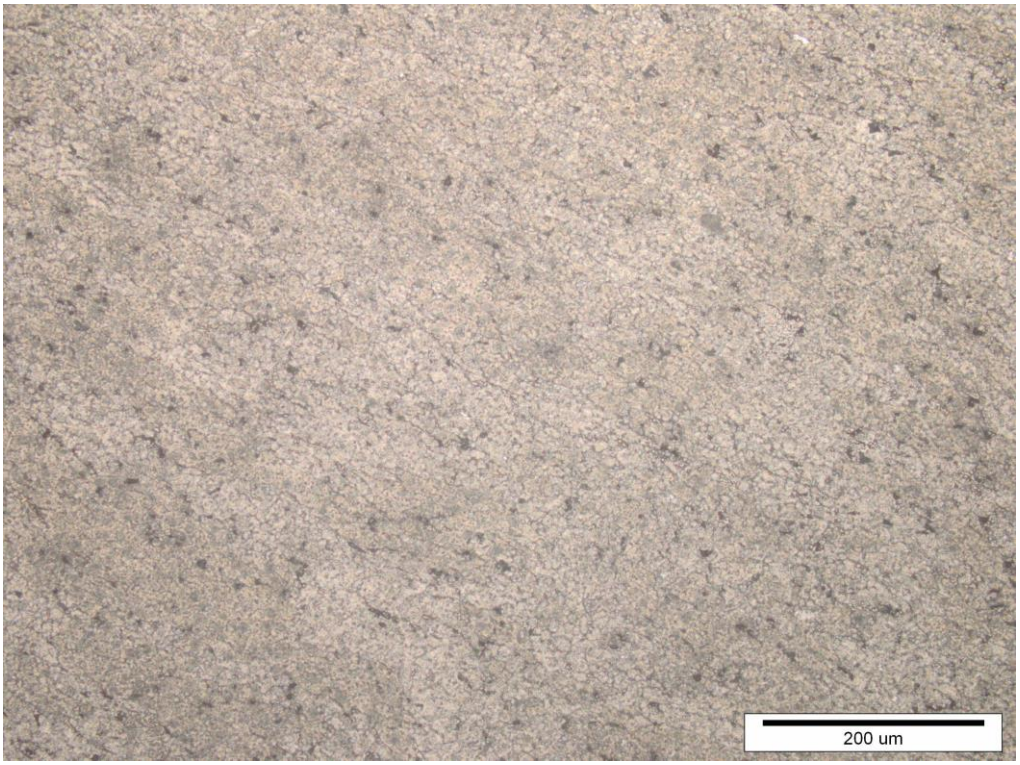


Slika 38. Polirana površina uzorka 4

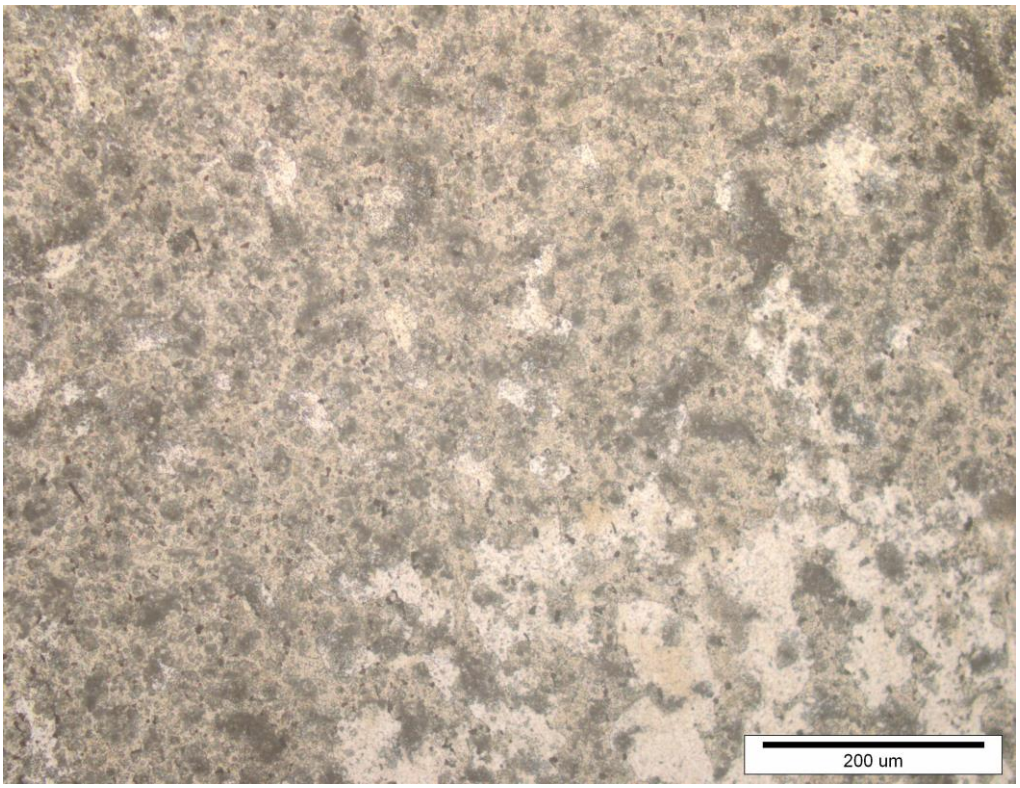
Na slikama od 39. do 49. prikazane su mikrostrukture svih uzoraka u nagriženom stanju snimljene pri povećanju 200×.



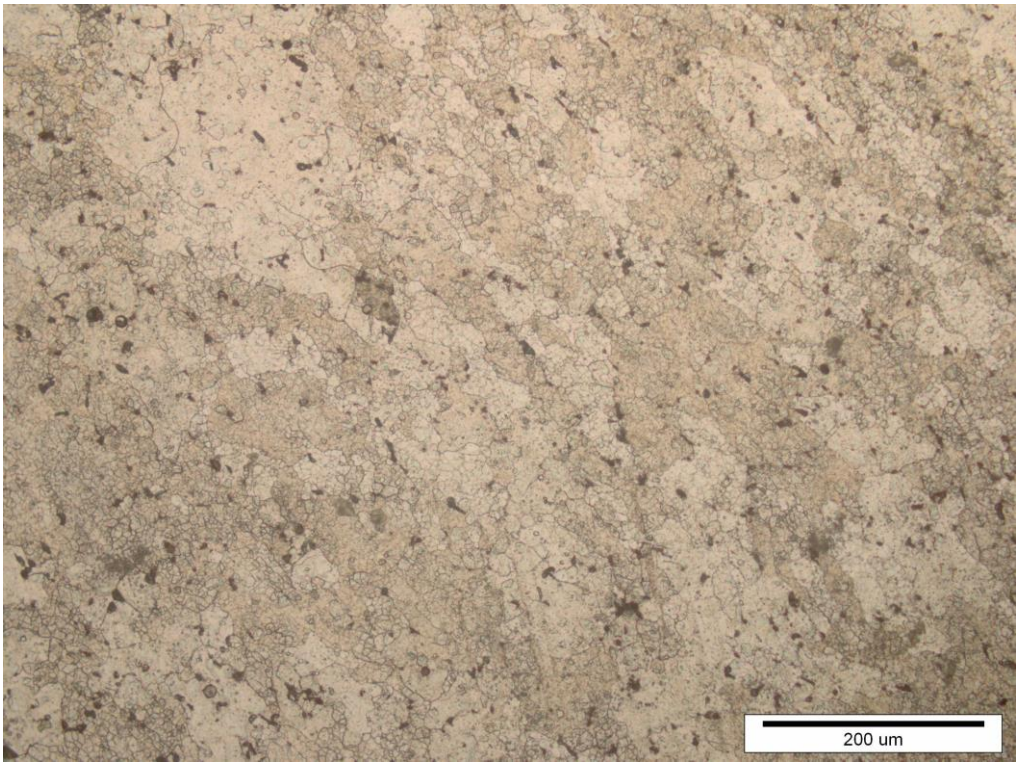
Slika 39. Mikrostruktura uzorka 1



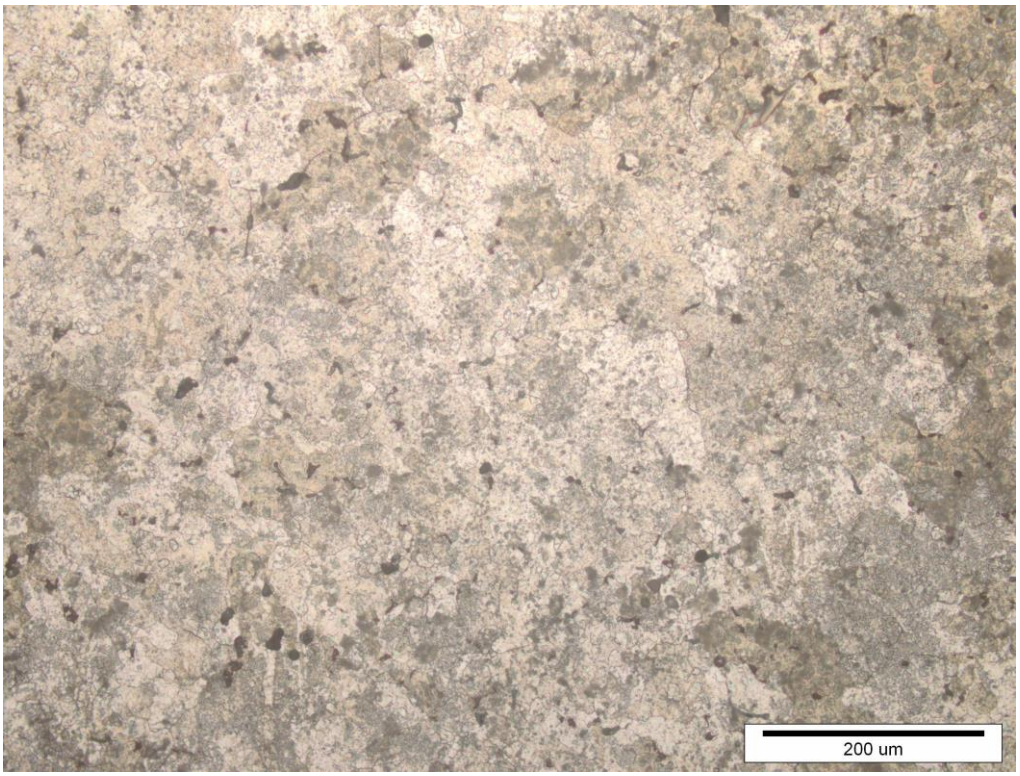
Slika 40. Mikrostruktura uzorka 2



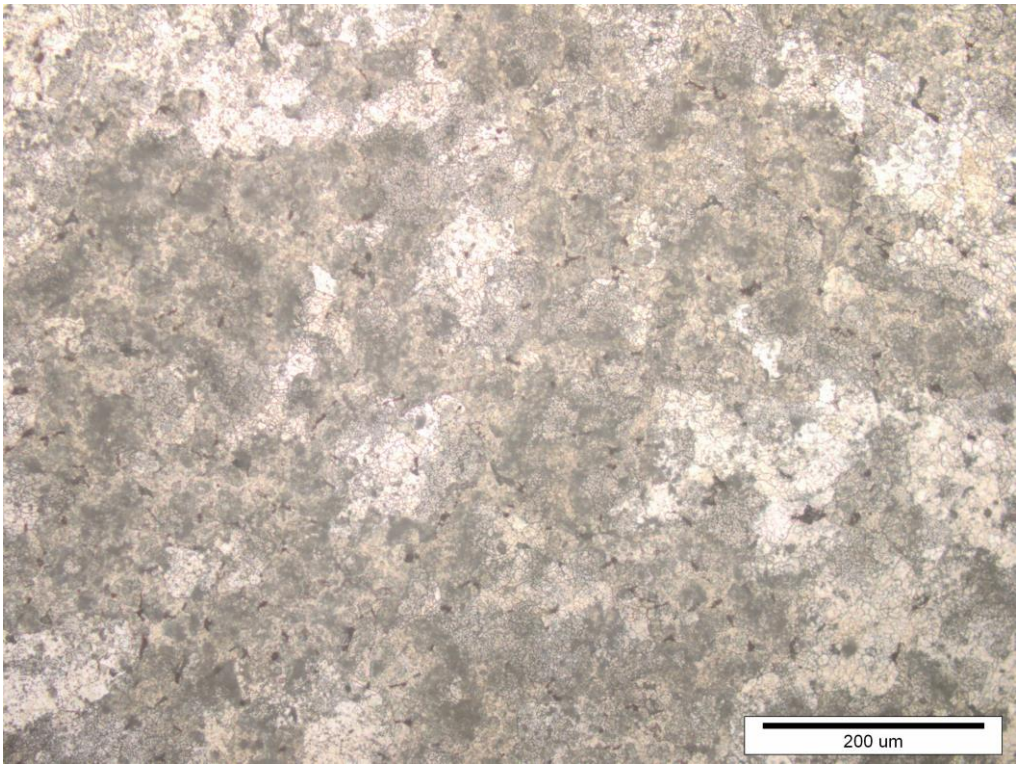
Slika 41. Mikrostruktura uzorka 3



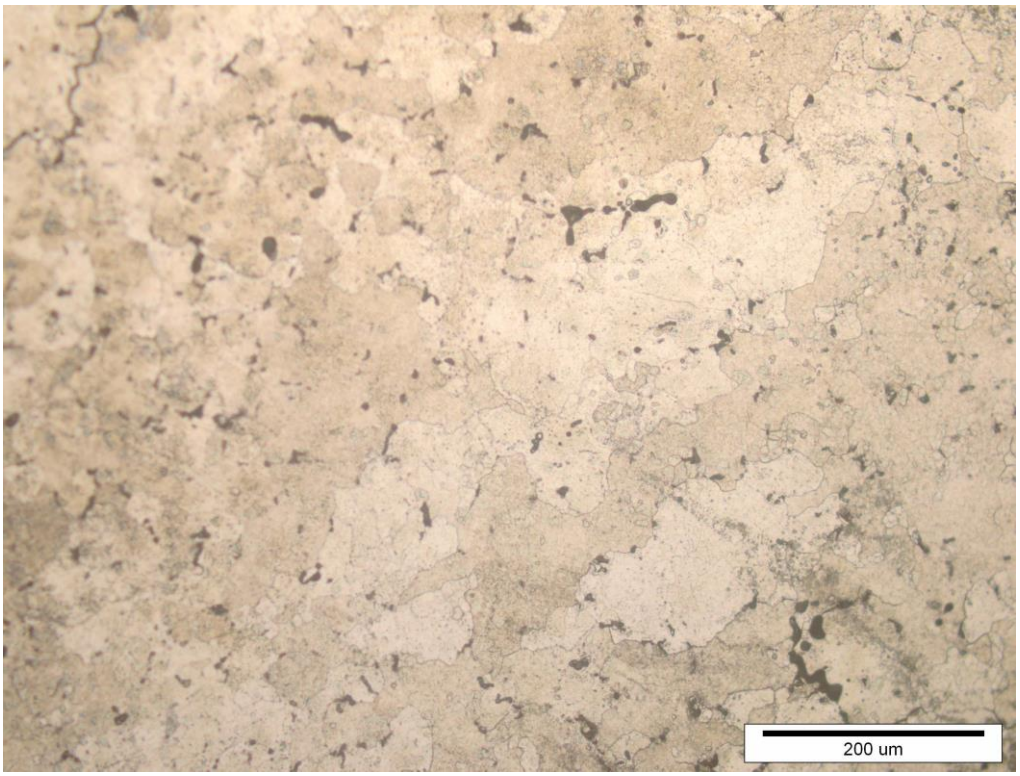
Slika 42. Mikrostruktura uzorka 4



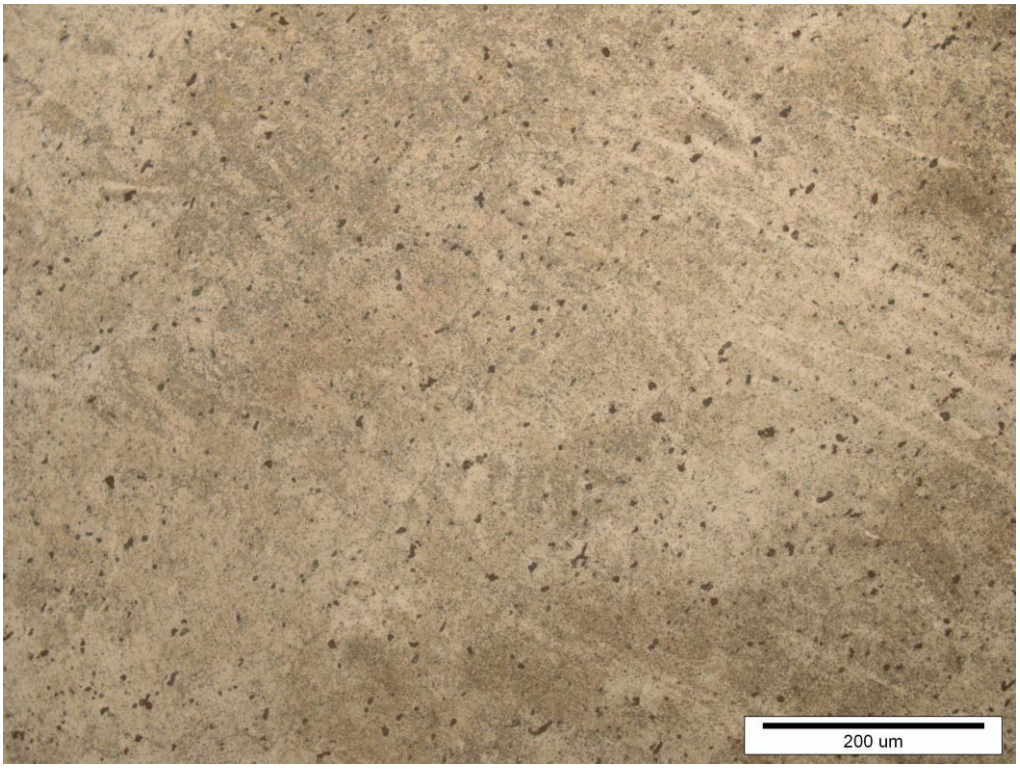
Slika 43. Mikrostruktura uzorka 5



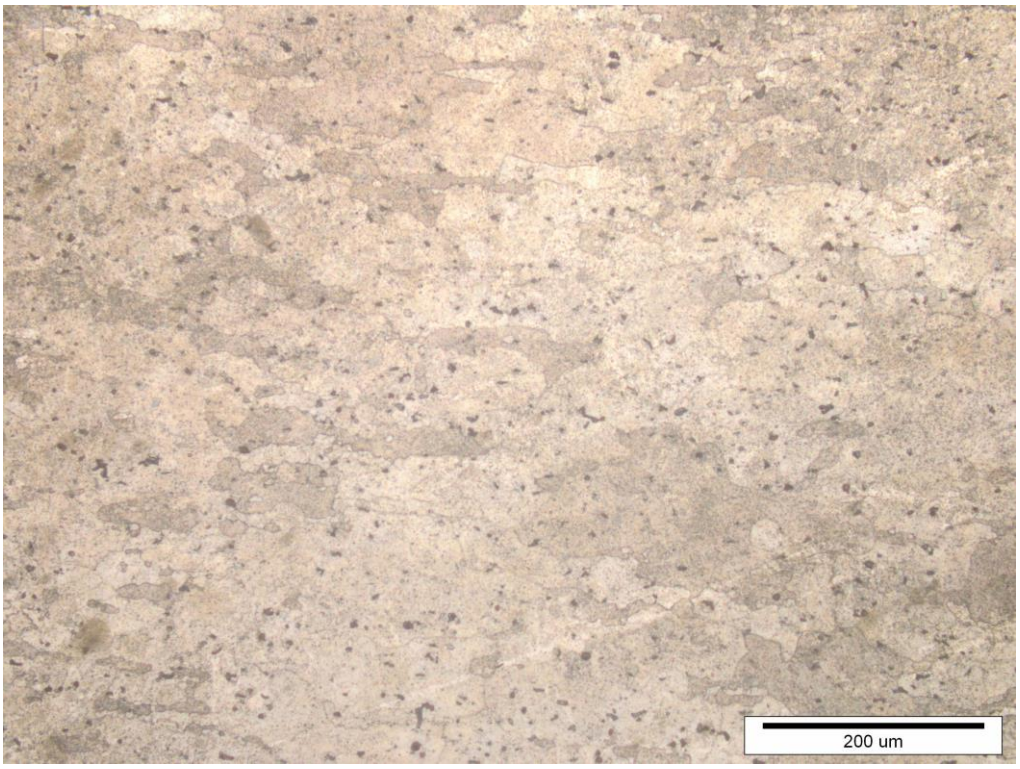
Slika 44. Mikrostruktura uzorka 6



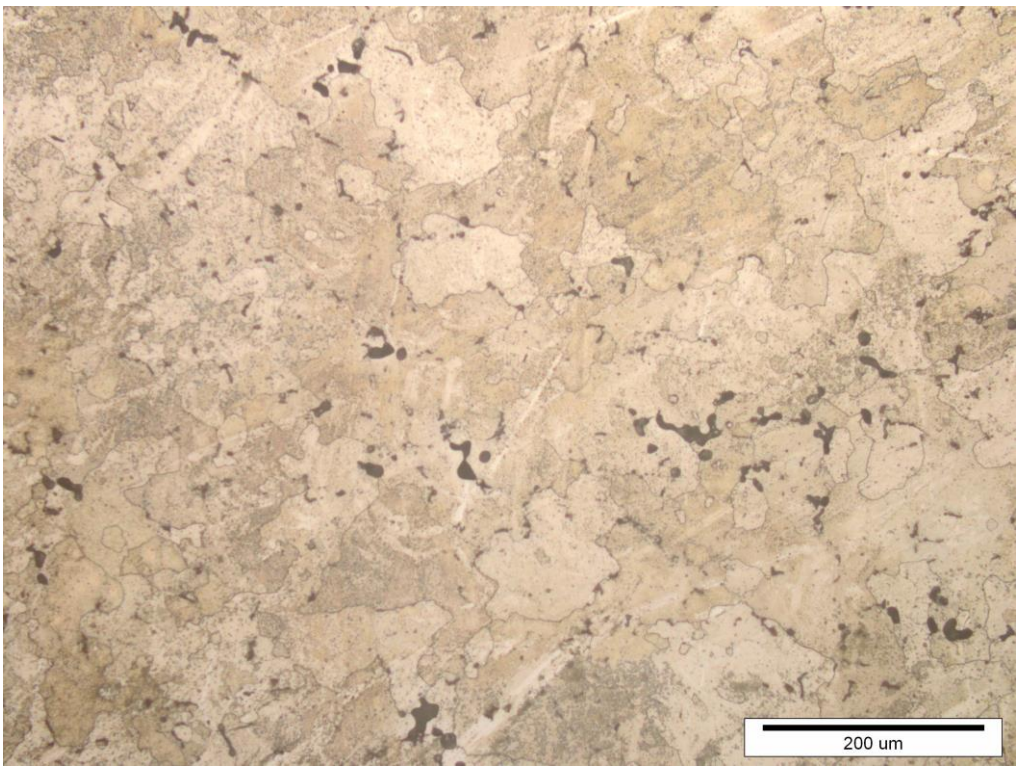
Slika 45. Mikrostruktura uzorka 7



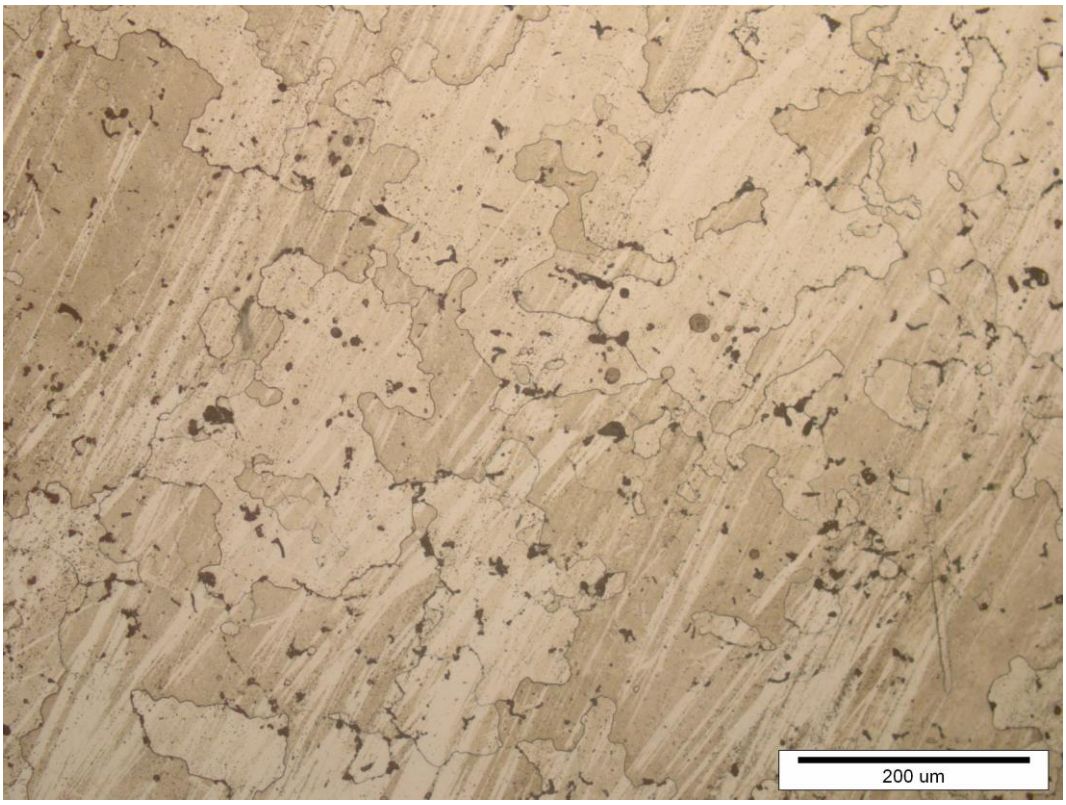
Slika 46. Mikrostruktura uzorka 8



Slika 47. Mikrostruktura uzorka 9



Slika 48. Mikrostruktura uzorka 10

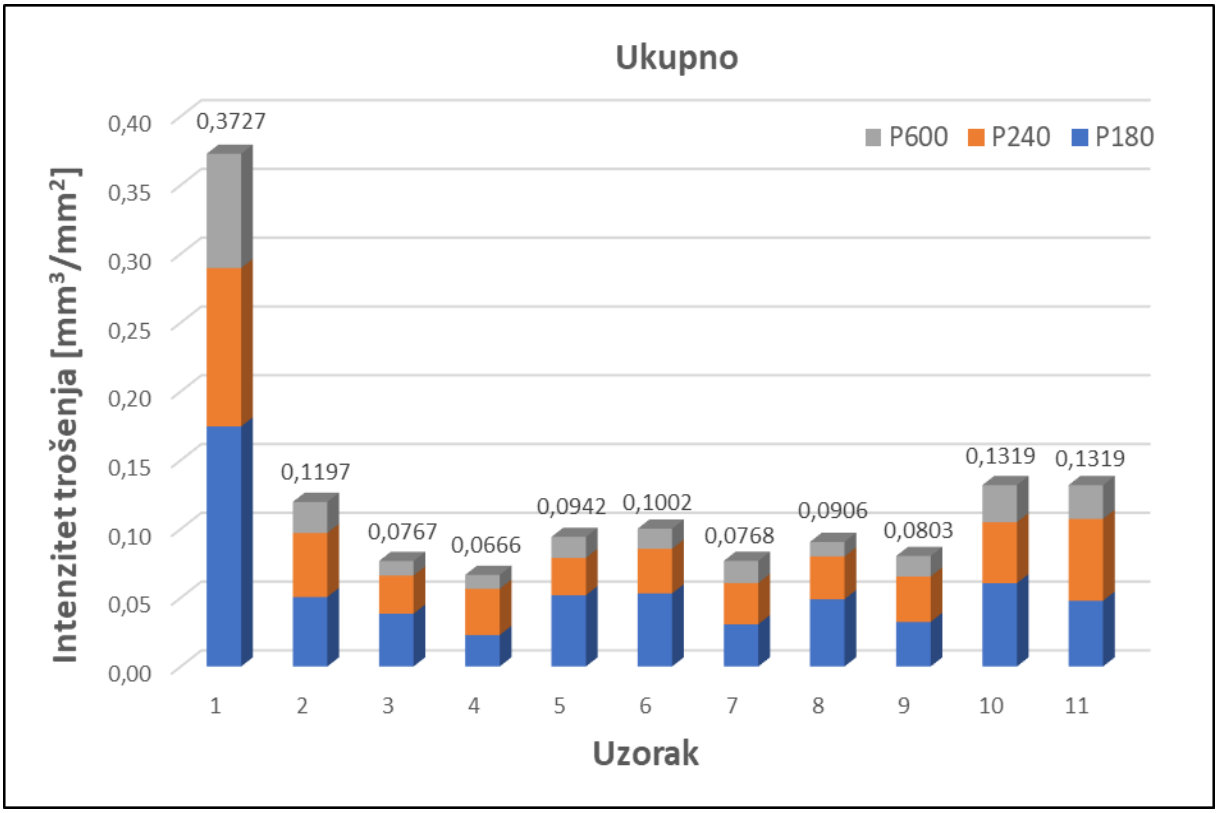


Slika 49. Mikrostruktura uzorka 11

4.5. Analiza rezultata

Na slici 50. prikazani su rezultati dobiveni pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje. Na slici se vidi gubitak volumena materijala sveden na jedinicu površine za sve uzorke i za sve kvalitete brusnih papira.

Od svih uzoraka najmanju otpornost na abrazijsko trošenje ima uzorak 1. Svi drugi uzorci imaju višu otpornost na abrazijsko trošenje, osobito uzorci od 3 do 9. Ovi rezultati se vrlo dobro podudaraju s rezultatima mjerenja tvrdoće (slika 36.). Izmjerena tvrdoća je kod uzorka 1 najmanja, a najvišu tvrdoću imaju uzorci 4 i 7, koji se i najmanje troše. Uzorak 1 je homogeniziran na 490 °C, kao i svi drugi uzorci te sporo hlađen u peći. U njegovoj mikrostrukturi prisutne su krupnije nakupine intermetalnih spojeva izlučenih po granicama kristala mješanaca. Zbog toga su njegova tvrdoća i otpornost na abrazijsko trošenje najniže. Uzorci 4 i 7 su nakon homogenizacije dozrijevani na 130 odnosno 160 °C u trajanju od 4 sata, što se pokazalo kao optimalna kombinacija parametara precipitacijskoga očvrsnuća.



Slika 50. Intenzitet abrazijskoga trošenja svih uzoraka

Na primjeru uzoraka 9, 10 i 11 vidljivo je kako vrijeme dozrijevanja (1, 4 i 10 sati), uz istu temperaturu dozrijevanja (190 °C), igra važnu ulogu u postizanju odgovarajućih svojstava. Produljenjem vremena dozrijevanja smanjuje se tvrdoća i otpornost na abrazijsko trošenje. Uzrok tome je povećanje precipitiranih čestica intermetalnoga spoja.

Kod većine uzoraka s porastom abrazivnoga zrna povećava se intenzitet trošenja. Na slici 51. prikazani su rezultati ispitivanja takvih uzoraka. Kod manjega dijela uzoraka izražen je fenomen kritične veličine abrazivnoga zrna, slika 52. To je osobito izraženo kod uzoraka 4 i 11 kod kojih dolazi do pada trošenja nakon što abrazivno zrno dosegne kritičnu veličinu (oko 58,5 μm).

Ovisnost abrazijskoga trošenja o veličini abrazivnoga zrna za sve uzorke prikazana je na slici 53.

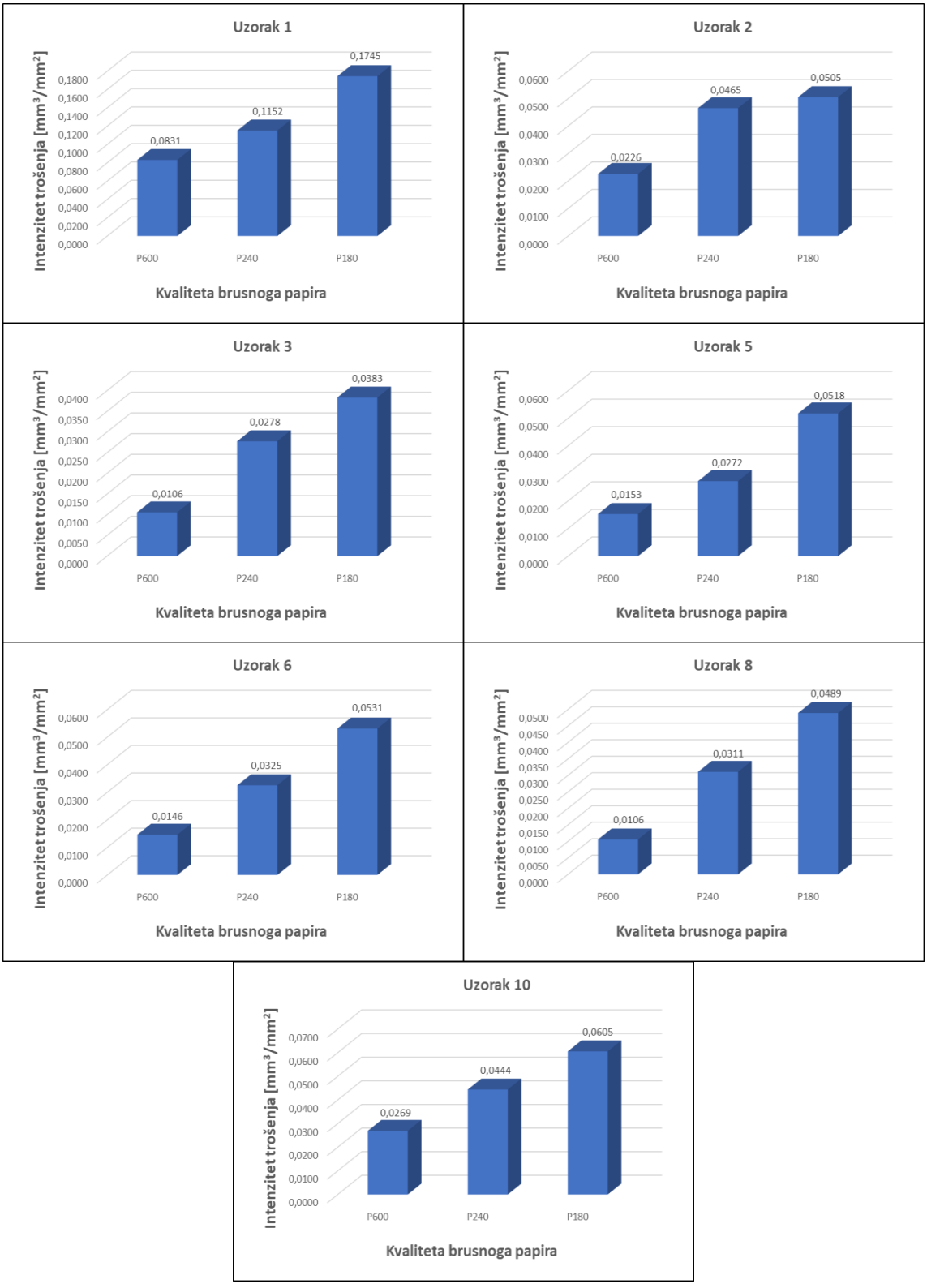
Kod uzoraka 2, 3, 8 i 10 dosegnuta je kritična veličina abrazivnoga zrna, a intenzitet trošenja se i dalje povećava, ali u manjoj mjeri.

Kod uzoraka 7 i 9 također je dosegnuta kritična veličina abrazivnoga zrna, a intenzitet trošenja s daljnjim povećanjem abrazivnoga zrna ostaje približno konstantan.

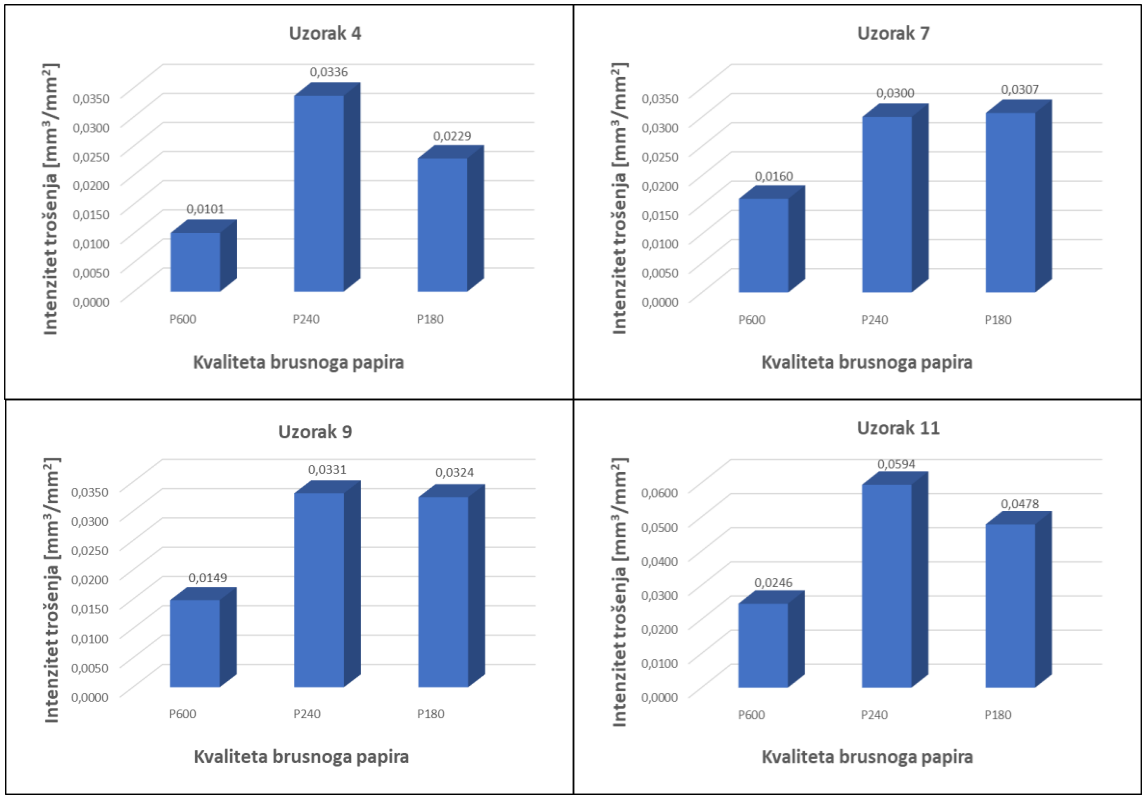
Kod uzoraka 4 i 11 intenzitet trošenja se smanjuje nakon što je dosegnuta kritična veličina abrazivnoga zrna.

Uzorci 1, 5 i 6 specifični su po tome što im intenzitet trošenja i dalje raste, tj. kritična veličina abrazivnoga zrna još nije dosegnuta.

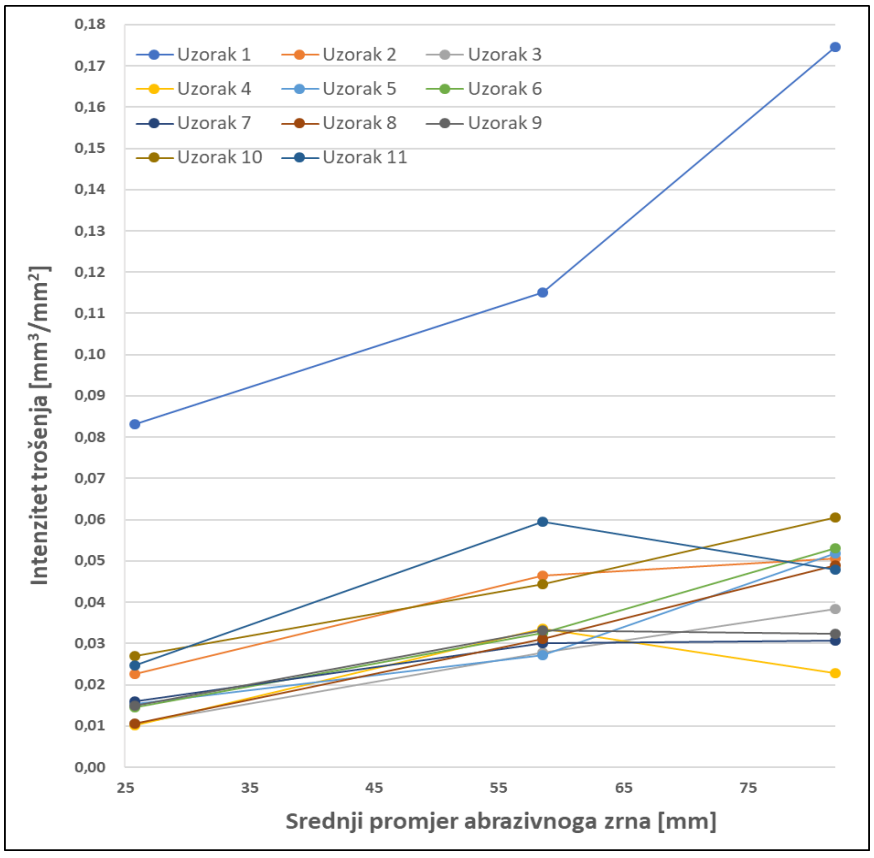
Za većinu uzoraka može se reći da im je otpornost na abrazijsko trošenje viša što im je tvrdoća viša. Izuzetci su uzorci 2 i 3 te uzorci 8 i 9 kod kojih navedeno ne vrijedi. Uzorak 2 ima nešto višu tvrdoću od uzorka 3, ali se unatoč tome više troši. Isto vrijedi za uzorke 8 i 9.



Slika 51. Uzorci s rastućim trendom trošenja



Slika 52. Trend trošenja uzoraka s izraženom kritičnom veličinom abrazivnoga zrna



Slika 53. Ovisnost abrazijskoga trošenja o veličini abrazivnoga zrna

5. ZAKLJUČAK

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

- parametri toplinske obrade precipitacijskoga očvrsnuća imaju veliki utjecaj na postignutu tvrdoću i intenzitet abrazijskoga trošenja aluminijske legure Al-Zn-Mg
- u većini slučajeva viša postignuta tvrdoća materijala znači i veću otpornost na abrazijsko trošenje
- najviša tvrdoća i najveća otpornost na abrazijsko trošenje, tj. najmanje kumulativno trošenje izmjereno je kod uzorka koji je homogeniziran na 490 °C i dozrijevan 4 sata na 130 °C
- najviše se trošio uzorak koji je homogeniziran na 490 °C i sporo hlađen u peći, a istodobno je na ovom uzorku izmjerena i najniža tvrdoća
- na najgrubljem brusnom papiru P180 i na najfinijem brusnom papiru P600 najmanje se trošio uzorak koji je homogeniziran na 490 °C i dozrijevan 4 sata na 130 °C
- na brusnom papiru P240 najmanje se trošio uzorak koji je homogeniziran na 490 °C i dozrijevan 10 sati na 130 °C
- fenomen kritične veličine abrazivnoga zrna izražen je kod većine ispitnih uzoraka.

LITERATURA

[1] M. Stupnišek, F. Cajner: Osnove toplinske obradbe metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.

[2] D. Ćorić, T. Filetin: Materijali u zrakoplovstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

[3] https://www.google.com/search?q=precipitation+hardening&sxsrf=ACYBGNT1mQVo0jhFW7GI9YPmTUVTRhqr1g:1573904853770&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjIlOC91O7lAhVDhqQKHZOZBh8Q_AUIEigB&biw=1920&bih=969#imgdii=fmI7b1nePCEh8M:&imgrc=uUhLx0FoVJHmdM: [preuzeto 16.11.2019.]

[4] https://www.intechopen.com/books/light-metal-alloys-applications/mechanical-behavior-of-precipitation-hardened-aluminum-alloys-welds [preuzeto 16.11.2019.]

[5] V. Ivušić: Tribologija, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 1998.

[6] https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/11-TrenjeTrosenjeIPodmazivanje.pdf [preuzeto 17.11.2019.]

[7] G. Heffer: Trošenje triboloških prevlaka pri gibanju u masi slobodnih čestica, Disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

[8] K. Grilec, V. Ivušić: Tribologija, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

[9] K.-H. Zum Gahr: Microstructure and Wear of Materials, Elsevier, Amsterdam- Oxford-New York, 1987.

[10] F. Cajner, B. Matijević, K. Grilec, S. Jakovljević: Predavanja i vježbe iz kolegija "Tribologija i inženjerstvo površina", autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.

[11] J.J. Coronado: „Effect of Abrasive Size on Wear", Research Group of Fatigue and Surfaces, Mechanical Engineering School, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

[12] G. K. Nathan and W. J. D. Jones: „The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions", Wear, 9 (1966) 300 – 309.

PRILOZI

I. CD-R disc