

Utjecaja veličine abrazivnih čestica na intenzitet trošenja Al-Si-Mg legure

Čamber, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:857356>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Čamber

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Ivan Čamber

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se profesorici Veri Rede na savjetima, utrošenom trudu i vremenu prilikom pisanja rada.

Posebna zahvala ide mojoj obitelji na podršci i razumijevanju tijekom studija.

Ivan Čamber



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Čamber**

JMBAG: **0035221906**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj veličine abrazivnih čestica na intenzitet trošenja Al-Si-Mg legure**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Effect of abrasive grain size on the wear intensity of AlSiMg alloy**

Opis zadatka:

Na intenzitet abrazivnog trošenja različitih tehničkih materijala utječe puno čimbenika, a jedan od značajnijih je veličina abrazivnih čestica. Povećanje veličine abrazivnih čestica u pravilu dovodi do linearnog povećanja intenziteta abrazivnog trošenja, ali samo do određene veličine čestica. Daljnjim povećanjem abrazivnih čestica preko kritične vrijednosti, intenzitet trošenja ostaje isti ili se mijenja, pada ili raste, ali sa znatno manjom tendencijom promjene.

U završnom radu potrebno je istražiti kako veličina abrazivnih čestica utječe na intenzitet abrazivnog trošenja Al-Si-Mg legure. Ispitivanje odgovarajućih uzoraka treba provesti na uređaju *Taber abrader*, na brusnim papirima s različitim veličinama abrazivnih čestica. Dobivene rezultate potrebno je analizirati i na temelju svega donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Branko Bauer
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. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE.....	2
2.1. Sustav označivanja	5
3. TROŠENJE.....	6
3.1. Mehanizmi trošenja.....	6
3.2. Abrazija	6
3.2.1. Mehanizmi trošenja abrazijom.....	7
3.3. Krična veličina abrazivnog zrna	15
4. EKSPERIMENTALNI DIO	17
4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja.....	17
4.2. Materijali za ispitivanje.....	18
4.3. Rezultati analize kemijskog sastava legure AlMgSi1	20
4.4. Rezultati analize mikrostrukture lima legure AlMgSi1	20
4.5. Rezultati mjerenja gustoće ispitnog materijala	25
4.6. Rezultati ispitivanja abrazijskog trošenja	26
4.7. Analiza rezultata	30
5. ZAKLJUČAK.....	33
LITERATURA.....	34

POPIS SLIKA

Slika 1.	Aluminijeve legure koje se najčešće primjenjuju [2].....	3
Slika 2.	Jedinični događaj I faza [5]	7
Slika 3.	Jedinični događaj II faza [5].....	7
Slika 4.	Abrazija u dodiru dva tijela [5]	8
Slika 5.	Abrazija u dodiru tri tijela [5].....	8
Slika 6.	Mikrobrazdanje [5].....	9
Slika 7.	Mikrorezanje [5].....	9
Slika 8.	Mikronaprsnuća [5]	10
Slika 9.	Mikroumor [5].....	10
Slika 10.	Čista abrazija [5]	12
Slika 11.	Selektivna abrazija [5].....	13
Slika 12.	Nulta abrazija [5].....	14
Slika 13.	Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsko trošenje [6].....	15
Slika 14.	Utjecaj veličine abrazivnog zrna na trošenje pojedinog materijala [7]	16
Slika 15.	Lim	18
Slika 16.	Uzorci izrezani iz lima	19
Slika 17.	Geometrija uzoraka za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje	19
Slika 18.	Pozicija uzoraka za analizu mikrostrukture.....	20
Slika 19.	Izrezani uzorci u kalupu prije zalijevanja.....	21
Slika 20.	Uzorci u smoli nakon brušenja i poliranja.....	21
Slika 21.	Mikrostruktura poprečnog presjeka lima, paralelno sa smjerom valjanja.....	22
Slika 22.	Mikrostruktura poprečnog presjeka lima, okomito na smjer valjanja.....	22
Slika 23.	Mikrostruktura poprečnog presjeka lima paralelno sa smjerom valjanja, snimljeno pri povećanju 50×	23
Slika 24.	Mikrostruktura poprečnog presjeka lima paralelno sa smjerom valjanja, snimljeno pri povećanju 200×	23
Slika 25.	Mikrostruktura poprečnog presjeka lima okomito na smjer valjanja, snimljeno pri povećanju 50×	24
Slika 26.	Mikrostruktura poprečnog presjeka lima okomito na smjer valjanja, snimljeno pri povećanju 200×	24
Slika 27.	Uređaj za mjerenje mase	25

Slika 28.	Taber abrader.....	26
Slika 29.	Gubitak mase ispitivanih uzoraka za sve kvalitete brusnog papira.....	29
Slika 30.	Intenzitet trošenja ispitivanih uzoraka za sve kvalitete brusnog papira	30
Slika 31.	Ovisnost gubitka mase o veličini abrazivnog zrna	31
Slika 32.	Ovisnost intenziteta trošenja o veličini abrazivnog zrna.....	32

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristična svojstva aluminija [1].....	2
Tablica 2. Kemijski sastav legure AlMgSi1	20
Tablica 3. Kvaliteta i srednja veličina abrazivnog zrna [10].....	27
Tablica 4. Veličina abradirane površine uzoraka	27
Tablica 5. Gubitak mase pri ispitivanju.....	28

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm ²	površina
d _{krit}	μm	kritična veličina abrazivnoga zrna
H _a	HV	tvrdooća abraziva
ρ	g/cm ³	gustoća

SAŽETAK

Cilj rada je odrediti kako se mijenja intenzitet abrazijskog trošenja aluminijske legure oznake AlMgSi1 pri promjeni kvalitete brusnog papira odnosno veličine abrazivnog zrna. Poznato je da se s povećanjem veličine abrazivnih čestica se u pravilu linearno povećava intenzitet abrazijskog trošenja, ali samo do određene veličine abrazivnih čestica. Ta veličina zove se kritična veličina abrazivnog zrna. Daljnjim povećanjem abrazivnih čestica intenzitet trošenja može i dalje rasti, ali uz manju stopu prirasta, može padati ili ostati nepromijenjen. U teorijskom dijelu rada opisani su aluminij i aluminijske legure, mehanizmi trošenja te fenomen kritične veličine abrazivnog zrna.

U eksperimentalno dijelu rada ispitano je kako se mijenja intenzitet abrazijskog trošenja aluminijske legure AlMgSi1 s porastom veličine abrazivnih čestica. Utvrđeno je da porastom abrazivnog zrna raste intenzitet abrazijskog trošenja sve do vrijednosti abrazivnog zrna od 35,0 μm . Daljnjim povećanjem abrazivnog zrna intenzitet trošenja i dalje raste, ali uz puno nižu stopu rasta. Ovisnost između intenziteta trošenja i veličine abrazivnih zrna može se aproksimirati polinomom drugog stupnja uz koeficijent korelacije veći od 0,9.

Ključne riječi: kritična veličina abrazijskog zrna, abrazijsko trošenje, aluminijska legura

SUMMARY

The aim of the work is to determine how the intensity of abrasive wear of the AlMgSi1 aluminum alloy changes when the quality of the sandpaper or the size of the abrasive particle changes. It is known that as the size of the abrasive particles increases, the intensity of abrasive wear increases linearly, but only up to a certain size of the abrasive particles. This size is called the critical abrasive particle size. With a further increase in abrasive particles, the intensity of wear may continue to increase, but with a lower rate of increase, it may decrease or remain unchanged. In the theoretical part of the paper, aluminum and aluminum alloys, wear mechanisms and the phenomenon of critical abrasive particle size are described.

In the experimental part of the work, it was examined how the intensity of abrasive wear of aluminum alloy AlMgSi1 changes with the increase in the size of the abrasive particles. It was found that the intensity of abrasive wear increases with the increase of the abrasive grain up to the value of the abrasive grain of 35.0 μm . By further increasing the abrasive grain, the intensity of wear continues to increase, but at a much lower growth rate. The dependence between wear intensity and abrasive grain size can be approximated by a second-degree polynomial with a correlation coefficient greater than 0.9.

Key words: critical abrasive particle size, abrasive wear, aluminium alloy

1. UVOD

Abrazijsko trošenje jedan je od četiri oblika trošenja materijala, kojeg proučava znanstvena disciplina zvana tribologija. Ispitivanje abrazijskog trošenja može se provesti primjenom više standardnih metoda, a u ovom konkretnom slučaju, abrazijska otpornost ispitana je na uređaju koji se naziva Taber abrader.

Prilikom trošenja metalnih materijala, s porastom abrazivnog zrna linearno raste gubitak materijala do određene veličine čestice, nakon koje gubitak mase može biti:

- 1.- manji
- 2.- ostati isti
- 3.- rasti, ali u manjoj mjeri.

Kritična veličina abrazivnog zrna ovisi o svojstvima i mikrostrukturi materijala, a različita je za različite vrste materijala.

AlMgSi1 legura primjenjuje se intenzivno u automobilskoj i avio industriji zbog svojih posebnih svojstava. Među ta dobra svojstva mogu se ubrojiti dobra obradivost, mala gustoća, korozijska otpornost i visoka čvrstoća s obzirom na masu [1].

2. ALUMINIJ I ALUMINIJSKE LEGURE

Za razliku od ostalih metala, poput željeza i bakra, za aluminij se može reći da je relativno nov, jer se tek značajnije počinje razvijati krajem 19. stoljeća. U Zemljinoj kori, od materijala koji se upotrebljavaju kao tehnički, najviše ima aluminija i to oko 8 %. U prirodnom stanju ne pronalazimo ga u čistom obliku, nego kao oksid pomiješan sa oksidima željeza, silicija itd.

Aluminij vrlo visoke čistoće ima talište na 660 °C i kristalno centriranu kubnu rešetku, također 2,9 puta lakši od čelika, neće promijeniti mehanička svojstva pri niskoj temperaturi, ima 13 puta veću toplinsku vodljivost od nehrđajućeg čelika i 4 puta veću toplinsku vodljivost od valjanog ugljičnog čelika. Samozaštitu u normalnoj atmosferi postiže tako što se zaštiti slojem oksida prirodno i neće negativno utjecati na okoliš niti biti otrovan [1,2].

Svojstva aluminija su prikazani u tablici 1.

Tablica 1. Karakteristična svojstva aluminija [1]

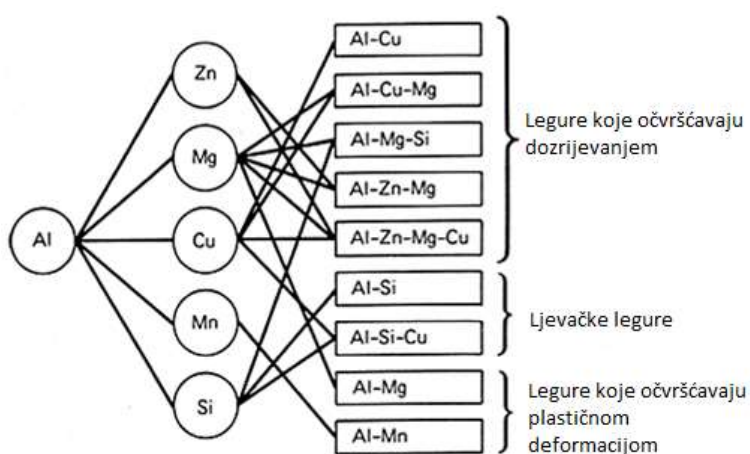
Svojstvo	Al
Specifična masa, kg/dm ³	2,7
Atomska težina	26,98
Redni broj	13
Električna provodljivost, S/mm ²	34,8-38,0
Temperaturni koeficijent istezanja, 1/K	24×10^{-6}
Talište, °C	660
Vrelište, °C	2470
Toplinska vodljivost, W/Km	209,3
Latentna toplina taljenja, kW/kg	396
Temperaturni koeficijent otpora, 1/K	$4,2 \times 10^{-3}$

Aluminijske legure su zastupljenije od čistog aluminija zbog dobre livljivosti, veće otpornosti na koroziju, dobrog omjera između mehaničkih svojstava i gustoće te lake obrade plastičnom deformacijom. Zbog svega navedenog idealne su za lake konstrukcije. Smjese koje sadržavaju najmanje 50 % aluminija će se smatrati kao aluminijske legure, ostatak smjese čine legirajući elementi koji su zaslužni za bolja mehanička i tehnološka svojstva. Legirnim elementima se

smatraju u prvom redu elementi poput silicija, bakra i magnezija u točno određenim međusobnim kombinacijama. [2]

Legure aluminija dijele se u tri skupine, prema slici 1:

1. aluminijeve legure koje se mogu očvršnuti homogenizacijom i dozrijevanjem
2. aluminijeve legure za lijevanje
3. aluminijeve legure koje se mogu očvršnuti plastičnom deformacijom.



Slika 1. Aluminijeve legure koje se najčešće primjenjuju [2]

Postoji mnogo načina za lijevanje aluminija a najčešći su:

- lijevanje u pijesak
- lijevanje u trajni kalup
- niskotlačno lijevanje u trajni kalup
- visokotlačno lijevanje u trajni kalup
- centrifugalno lijevanje.

Precipitacijskim očvršnućem aluminijevih legura, porastom temperature u fazi homogenizacije dolazi do promjene topljivosti konstituenata u kristalu mješancu. Postupak očvršnuća aluminijeve legure koja se nakon gašenja drži na temperaturi okoline naziva se prirodno dozrijevanje. Prirodnim dozrijevanjem poboljšava se granica razvlačenja i tvrdoća aluminijevih

legura. Ukoliko se aluminijeva legura nakon gašenja zagrijava na temperaturu oko 180 °C, ubrzava se vrijeme očvrnuća, i taj postupak naziva se umjetno dozrijevanje. Umjetnim dozrijevanjem aluminijevih legura povećava se granica razvlačenja, tvrdoća i čvrstoća [1].

Aluminijske legure koriste se u mnogim industrijskim granama zbog svojih dobrih svojstava. Zahvaljujući svojoj kemijskoj postojanosti koristi se u prehrambenoj industriji, ali i u industriji poput automobilske pa sve do svemirske industrije. Sve većim razvojem aluminijskih legura došlo je do zamijene čelika u pojedinim granama industrije. Aluminiij se može deformirati i do tri puta više od čelika. Aluminijske legure imaju nisku temperaturu lijevanja od 650 do 750 °C i uzak interval skrućivanja [2].

2.1. Sustav označivanja

Aluminij i njegove legure se prema svjetskim standardima i normi *Aluminum Association (AA)* označavaju tako da prva znamenka definira glavnu sastavnicu legure. Prema navedenim normama postoje sljedeće skupine aluminijevih legura:

- 1xx.x, čisti aluminij (99,00 % ili više)
- 2xx.x, aluminij – bakar
- 3xx.x, aluminij – silicij + bakar i / ili magnezij
- 4xx.x, aluminij – silicij
- 5xx.x, aluminij – magnezij
- 7xx.x, aluminij – cink
- 8xx.x, aluminij – kositar
- 9xx.x, aluminij i drugi elementi
- 6xx.x, neiskorištene serije.

U oznaci tipa 1xx.x, druga i treća znamenka će označavati minimalni sadržaj aluminija (99,00 % ili veći); znamenke se tumače kao minimalni postotak aluminija koji se izražava na 0,01 % decimalu. Naprimjer, legura 180.0 sadrži najmanje 99,80 % Al.

U oznakama od 2xx.x do 8xx.x za aluminijske legure, druga i treća znamenka nemaju isto značenje kao što je kod 1xx.x, nego će proizvoljno identificirati pojedine legure u kategoriji.

Četvrta znamenka će označavati oblik proizvoda:

- 0 odljevak
- 1 standardni ingot
- 2 ingot sa sastavom užim od standardnih.

Silicij u leguri će poboljšavati tečenje materijala, otpornost na tople pukotine, povećati će korozijsku postojanost, a magnezij stvara čvrste otopine i poboljšava očvršćivanje. [2]

3. TROŠENJE

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uzrokovan dinamičkim dodirrom s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [3].

Brzina trošenja se povećava s mehaničkim djelovanjem stranih tijela i kemijski agresivnim djelovanjem okoliša. Geometrija površina uzajamno pokretnih dijelova mijenja se zbog trošenja materijala. Prema istraživanjima to je uzrok za više od 50 % posto zastoja u području strojarstva [4].

3.1. Mehanizmi trošenja

Razlikujemo četiri osnovne vrste mehanizama trošenja:

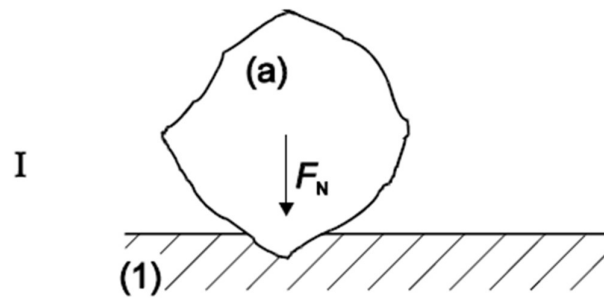
1. adhezija
2. abrazija
3. tribokorozija
4. umor površine [4].

3.2. Abrazija

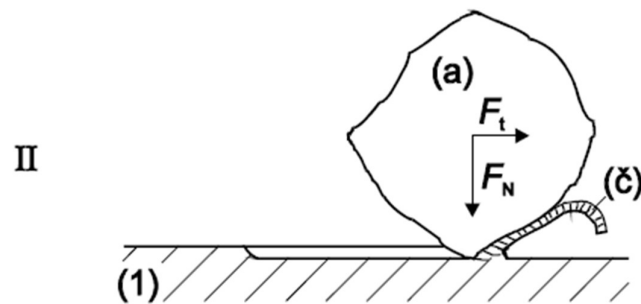
Abrazija je trošenje kod kojeg dolazi do istiskivanja materijala koje je uzrokovano tvrdim česticama ili izbočinama. Abrazija se može definirati i kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrijske oštrice, a može se promatrati kao jedinični događaj sastavljen od dvije faze [5].

I faza prikazana je slikom 2., a predstavlja prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente sile - F_N .

II faza predočena je slikom 3., a predstavlja istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente sile - F_t .



Slika 2. Jedinični događaj I faza [5]



Slika 3. Jedinični događaj II faza [5]

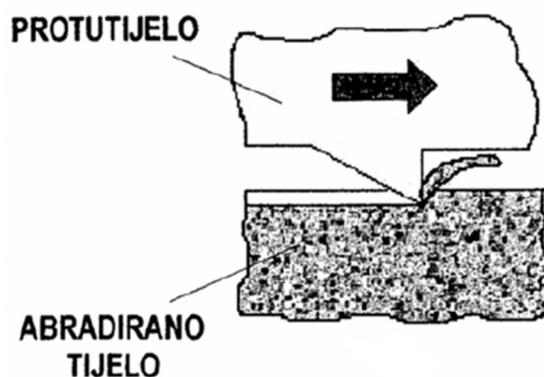
3.2.1. Mehanizmi trošenja abrazijom

Mehanizam trošenja abrazijom se promatra sa tri gledišta:

1. međusobnom odnosu tijela u tribosustavu
2. međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine
3. tvrdoći trošene površine i abraziva [5].

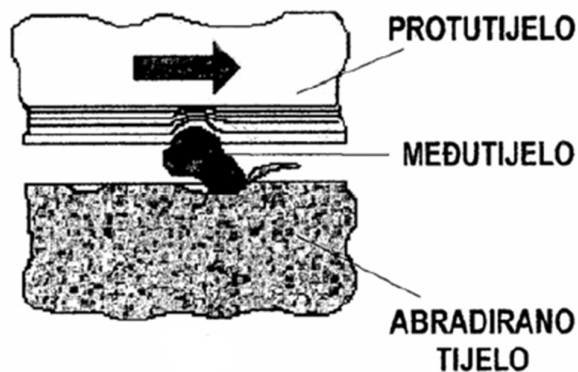
1. Ovisno o strukturi određenog tribosustava abrazija se može pojaviti u dva osnovna oblika.

Prvi oblik je abrazija koja se stvara na mjestu dodira dvaju tijela, tj. tribosustav sastavljen od abrazivnog tijela i abrazijskog protutijela. Navedeni oblik abrazije prikazan je na slici 4.



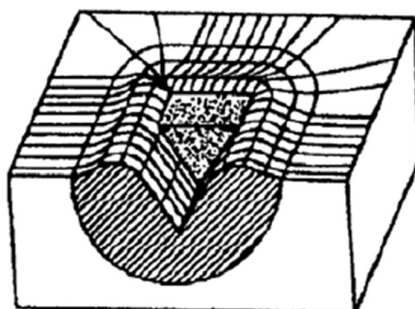
Slika 4. Abrazija u dodiru dva tijela [5]

Drugi oblik je abrazija koja se stvara na mjestu dodira tri tijela, tj. tribosustav koji se sastoji od abrazivnog tijela i protutijela, između kojih se nalaze čestice koje se gibaju slobodno i smještene su između abrazivnog tijela i protutijela. Navedene čestice abradiraju površinu tijela u dodiru. Ovaj oblik abrazije prikazan je na slici 5.



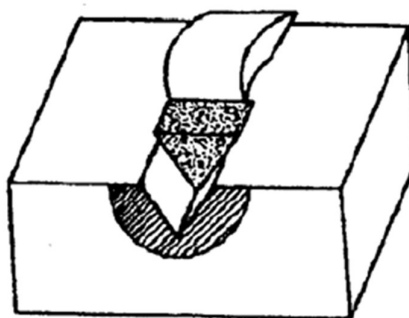
Slika 5. Abrazija u dodiru tri tijela [5]

2. U ovisnosti o načinu na koji abrazijske čestice djeluju na abradiranu površinu, mehanizmi abrazije mogu biti sljedeći:
- a) mikrobrazdanje - gubitak materijala proporcionalan sa volumenom brazde koje nastaje kada prođe jedna abrazijska čestica i pri kojem se materijal plastično deformira, uz postojanje uvjeta da se rubovi brazde odvoje od površine. Idealan slučaj je stvaranje bočnih grebena koje stvara materijal potisnut u stranu, a ne nastaju produkti trošenja. Na slici 6. predložen je mikromehanizam brazdanja [5].



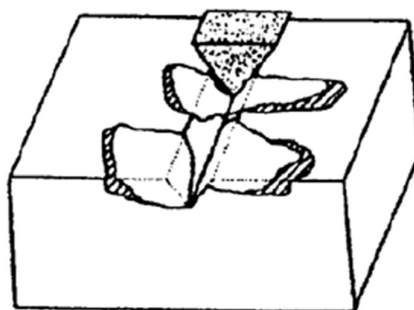
Slika 6. Mikrobrazdanje [5]

- b) mikrorezanje - abrazijsko trošenje pri kojem dolazi do odnošenja materijala prilikom prolaska jedne abrazivne čestice. Materijal koji je odnesen jednak je volumenu brazde, a na okolnom materijalu nema izražene plastične deformacije [5]. Mikrorezanje je prikazano na slici 7.



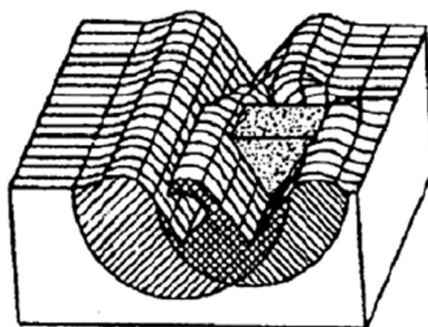
Slika 7. Mikrorezanje [5]

- c) mikronaprsnuća – gibanje abrazivne čestice po površini materijala uzrokuje mikropukotine koje se šire i dovode do odvajanja čestica materijala bez izražene plastične deformacije. Na slici 8. prikazan je abrazijski mehanizam mikronaprsnuća [5].



Slika 8. Mikronaprsnuća [5]

- d) mikroumor nastaje zbog izmjeničnog opterećenja koji dovodi do mehanizma umora površine zbog kojeg će se odnositi materijal. Mikropukotine nastaju zbog izloženosti trenutnim deformacijama koje se šire i dolazi do odvajanja dijela materijala. Mikroumor može nastati kao posljedica mehanizma mikrobrazdanja u više prolaza. Na slici 9. prikazan je abrazijski mehanizam mikroumora [5].



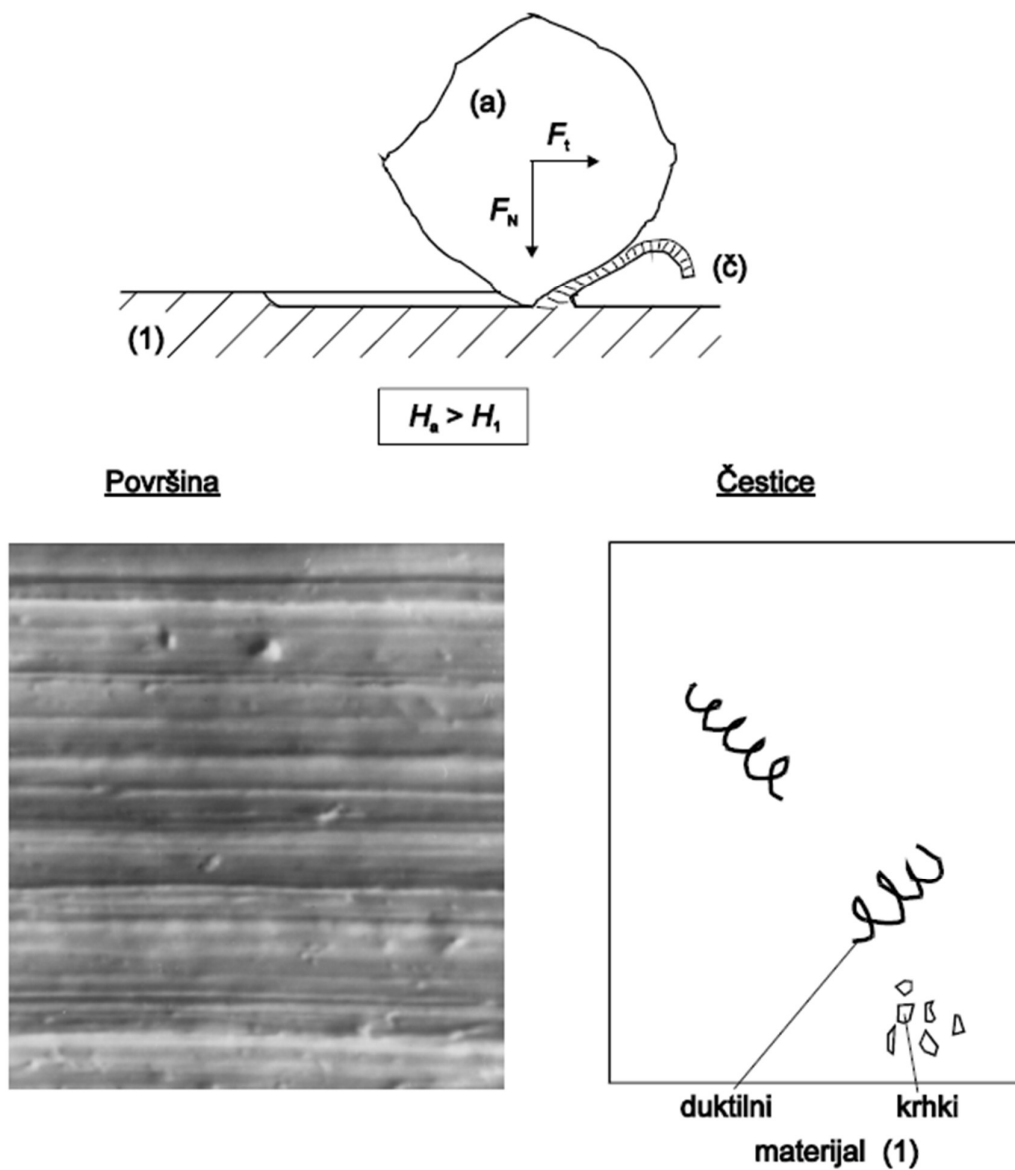
Slika 9. Mikroumor [5]

3. Ako se kao parametri pri abraziji promatraju tvrdoća abrazivnih čestica i tvrdoća osnovnog materijala, moguće je razlikovati tri slučaja abrazije:
- a) čista abrazija
 - b) selektivna abrazija
 - c) nulta abrazija

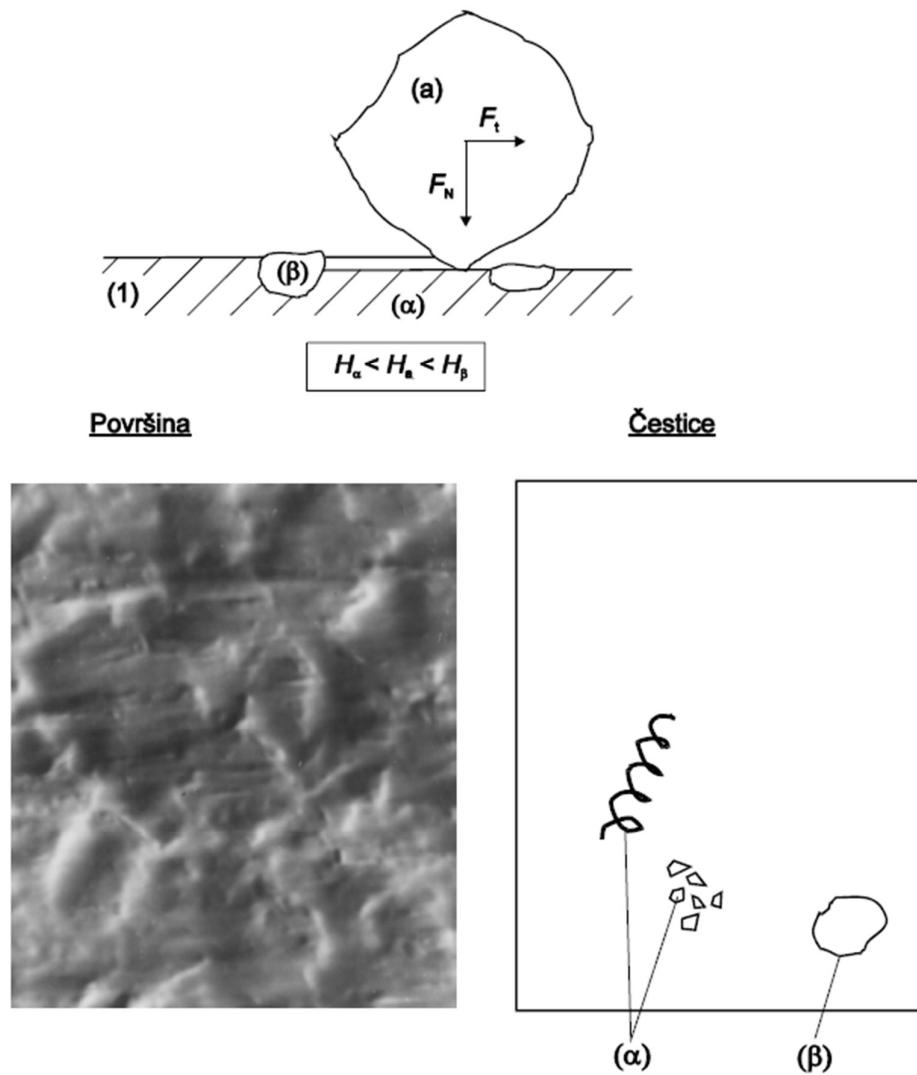
Čista abrazija prikazana je na slici 10. Nastaje djelovanjem tvrdog abraziva (a) na mekšu trošenu podlogu (1). Nužno je da tvrdoća abraziva bude veća od tvrdoće bilo koje faze abradiranog materijala. Trošena površina osnovnog materijala je izbrazdana, a oblik abradiranih čestica ovisi o duktilnosti osnovnog materijala. Ako je materijal duktilan, čestice trošenja imaju oblik spiralne strugotine. Ako je materijal manje duktilan i krhak abradirane čestice su u obliku kraće lomljene strugotine.

Selektivna abrazija nastaje ukoliko abradirani materijal sadrži neke faze (β) koje su tvrđe od abraziva (a). U slučaju selektivne abrazije, abraziv će rezati samo mekše faze materijala (α), zbog toga će površina biti izbrazdana s prekidima, na mjestima gdje se nalaze tvrđe faze. Selektivna abrazija prikazana je na slici 11.

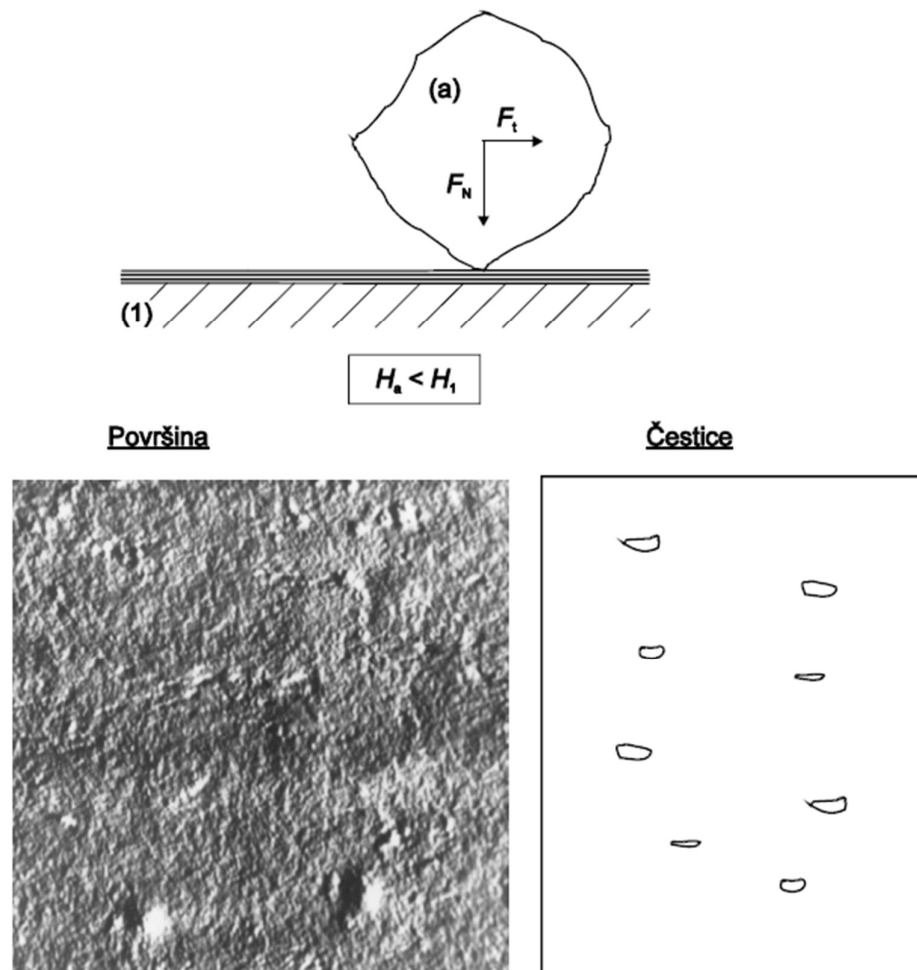
Na slici 12. prikazana je nulta abrazija. Ovaj slučaj abrazije nastaje kada je tvrdoća abraziva (a) manja od tvrdoće abradirane površine (1). Čestice trošenja će biti sitne ljuske koje potječu od vanjskog graničnog sloja na površini (sloj prljavštine, oksida ili apsorbiranih plinova) [5].



Slika 10. Čista abrazija [5]



Slika 11. Selektivna abrazija [5]



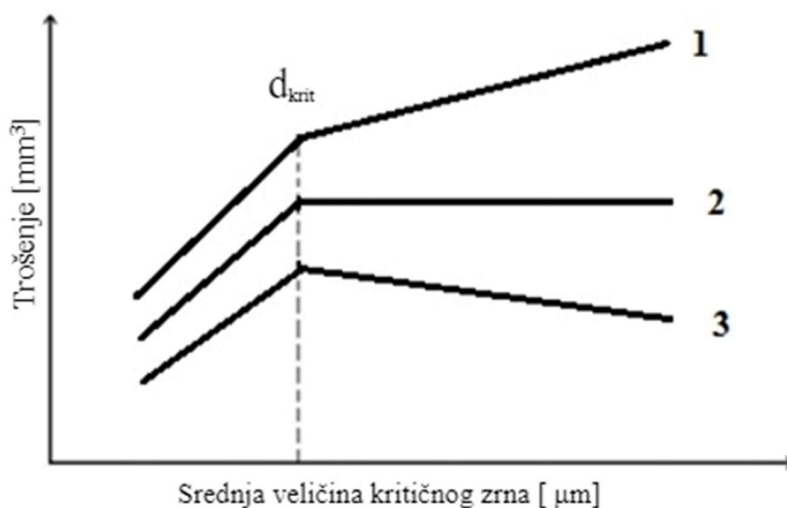
Slika 12. Nulta abrazija [5]

3.3. Kritična veličina abrazivnog zrna

Prilikom ispitivanja i analize rezultata vrlo važnu ulogu zna odigrati kritična veličina abrazivnog zrna, koja je vrlo bitan čimbenik pri trošenju materijala. Za očekivati je da će se sa povećanjem veličine abrazivnog zrna linearno povećavati i trošenje, tj. gubitak materijala. S porastom veličine abrazivnog zrna do kritične veličine također raste i stopa trošenja. Nakon dostizanja vrijednosti kritične veličine abrazivnog zrna stopa trošenja može se ponašati na tri načina:

1. nastaviti rasti, ali u manjoj mjeri
2. ostati konstantno
3. padati.

Na slici 13. grafički su prikazana sva tri moguća slučaja trošenja.

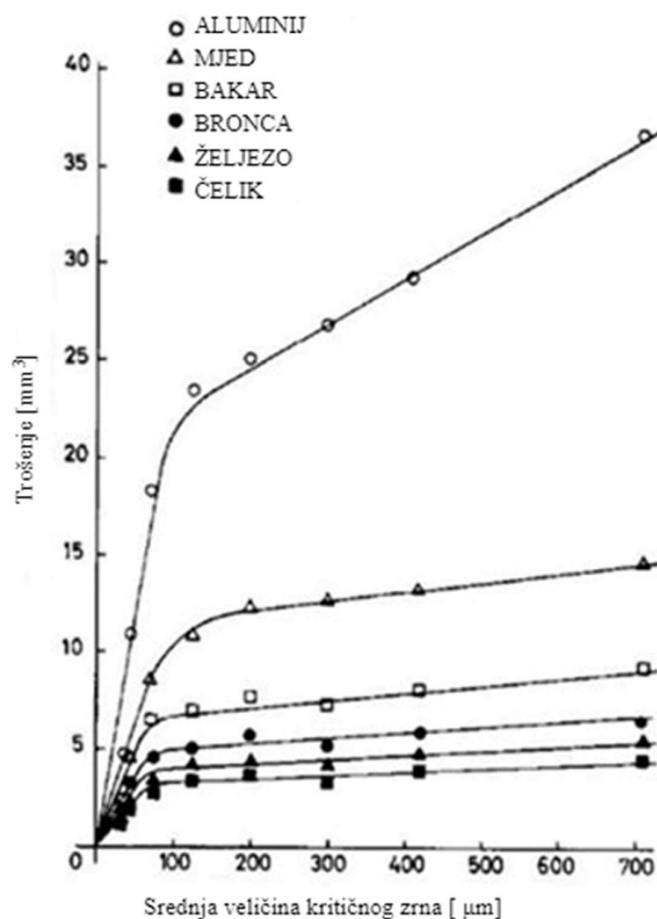


Slika 13. Utjecaj veličine abrazivnog zrna na abrazijsko trošenje [6]

Kritična veličina abrazivnih zrna izražava se kao kritični promjer zrna d_{krit} i izražava se u mikrometrima. Veličina abrazivnih zrna izražava se kao promjer abrazivnih zrna d_{sr} i izražava se u mikrometrima.

Na slici 14. može se vidjeti utjecaj veličine abrazivnog zrna na veličinu abradiranog volumena različitih materijala. Također se može vidjeti i približna kritična veličina abrazivnog zrna za sve ispitane materijale (aluminij, mjed, bakar, bronca, željezo, čelik) [7].

Ovaj fenomen uočen je i kod drva [8,9].



Slika 14. Utjecaj veličine abrazivnog zrna na trošenje pojedinog materijala [7]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Glavni cilj rada je ispitivanje abrazijskoga trošenja Al-legure oznake AlMgSi1 i određivanje kritične veličine abrazijskoga zrna. Ispitivanje abrazijskog trošenja provelo se na uređaju Taber abrader u Laboratoriju za tribologiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Kako bi se odredila kritična vrijednost abrazijskog zrna abrazijsko trošenje legure provedeno je na brusnim papirima različitih granulacija s abrazivnim česticama od aluminijskoga oksida Al_2O_3 .

Pri ispitivanju abrazijskog trošenja mjeri se gubitak mase uzoraka. Ako su poznati gubitak mase i gustoća legure, može se izračunati gubitak volumena pri abraziji. Zato je određena i gustoća legure AlMgSi1. Intenzitet abrazijskog trošenja nekog materijala izražava se preko gubitka volumena svedenoga na veličinu poprečnoga presjeka trošene površine uzoraka. Pored ispitivanja abrazijskog trošenja, analiziran je kemijski sastav navedene legure u Laboratoriju za analizu metala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Također je analizirana mikrostruktura legure na svjetlosnom mikroskopu u Laboratoriju za materijalografiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu

Nakon provedenoga ispitivanja dobiveni rezultati su analizirani i na temelju analize doneseni su odgovarajući zaključci.

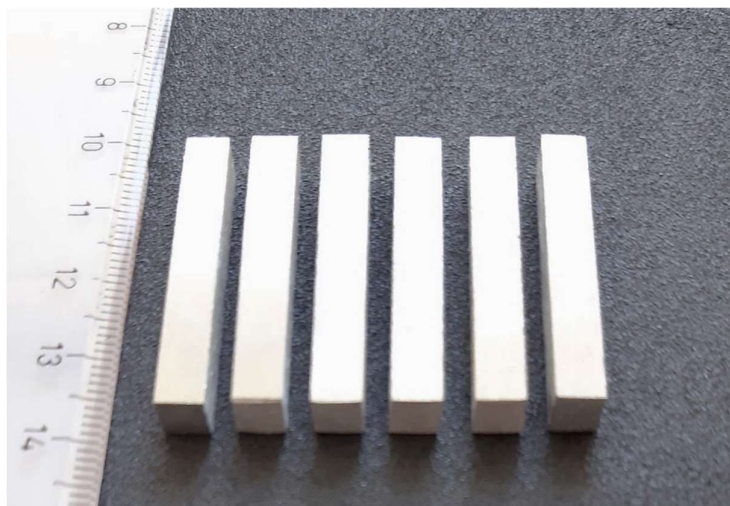
4.2. Materijali za ispitivanje

Materijal koji je korišten za sva planirana ispitivanja i analize izrezan je iz lima debljine 5 mm. Navedeni lim, prema kemijskom sastavu odgovara leguri oznake AlMgSi1. Iz njega su izrezani uzorci za sva planirana ispitivanja.

Na slici 15. prikazan je lim iz kojeg su izrezani uzorci za sva ispitivanja, a na slici 16 prikazani su uzorci za ispitivanja abrazijske otpornosti.

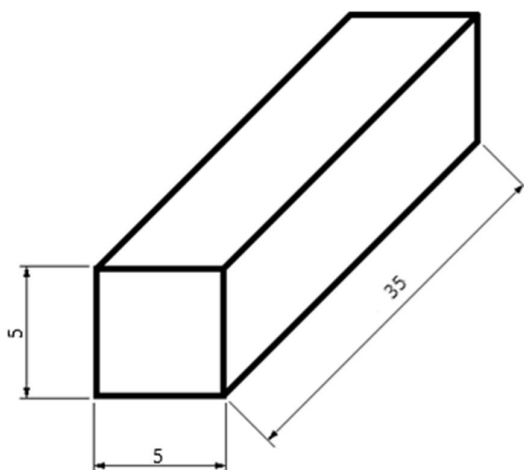


Slika 15. Lim



Slika 16. Uzorci izrezani iz lima

Uzorci su izrezani na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za alatne strojeve, Geometrija ispitnih uzoraka je prikazana na slici 17.



Slika 17. Geometrija uzoraka za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

4.3. Rezultati analize kemijskog sastava legure AlMgSi1

U Laboratoriju za analizu metala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje napravljena je kvantitativna kemijska analiza materijala lima na kojem su provedena sva daljnja ispitivanja. Kemijski sastav određen je metodom optičke emisijske spektrometrije na optičkom emisijskom spektrometru oznake GDS 850 A, LECO.

Dobiveni kemijski sastav legure AlMgSi1 prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav legure AlMgSi1

maseni udio elemenata, %									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
0,15	0,33	0,03	0,25	2,48	0,016	0,006	0,037	0,018	ostatak

4.4. Rezultati analize mikrostrukture lima legure AlMgSi1

Mikrostruktura materijala za ispitivanje analizirana je u Laboratoriju za materijalografiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51.

Mikrostruktura je analizirana u poliranom i nagriženom stanju. Uzorci za analizu izrezani su iz sredine lima, kako je prikazano na slici 18. Jedan uzorak izrezan je tako da se vidi mikrostruktura paralelno sa smjerom valjanja, a kod drugog se vidi mikrostruktura okomito na smjer valjanja.



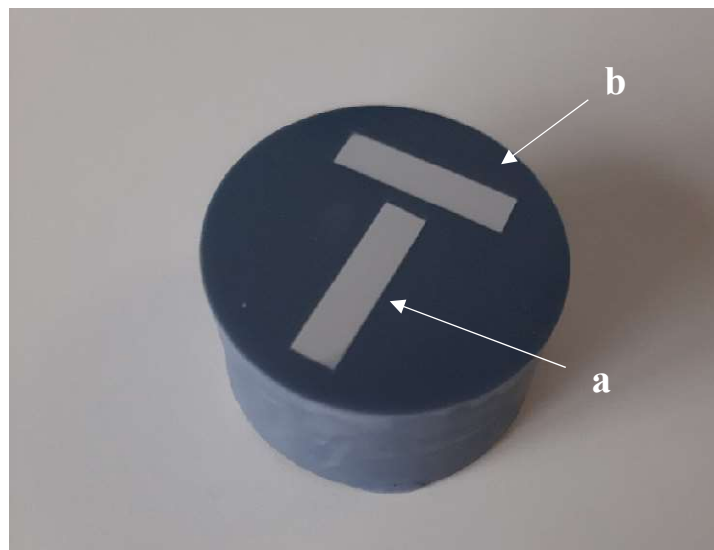
Slika 18. Pozicija uzoraka za analizu mikrostrukture

Na slici 19. prikazani su izrezani uzorci umetnuti u kalup, prije zalijevanja u masu.



Slika 19. Izrezani uzorci u kalupu prije zalijevanja

Na slici 20. prikazan je metalografski uzorak nakon brušenja i poliranja površine. Manji uzorak (a) okomit je na smjer valjanja, a veći (b) je paralelan sa smjerom valjanja.



Slika 20. Uzorci u smoli nakon brušenja i poliranja

Na slici 21. i slici 22. vidi se mikrostruktura poprečnog presjeka lima paralelno sa smjerom valjanja i okomito na smjer valjanja, u poliranom stanju. Fotografije mikrostrukture snimljene su pri povećanju 200×.



Slika 21. Mikrostruktura poprečnog presjeka lima, paralelno sa smjerom valjanja

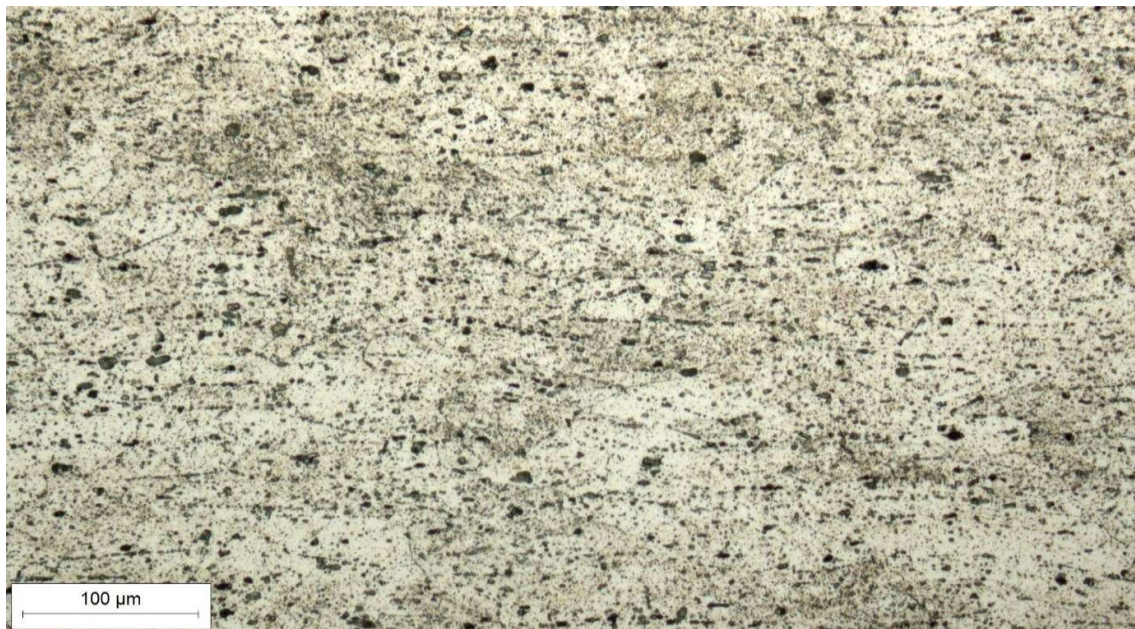


Slika 22. Mikrostruktura poprečnog presjeka lima, okomito na smjer valjanja

Mikrostruktura poprečnog presjeka lima paralelno sa smjerom valjanja u nagriženom stanju vidi se na slikama koje slijede. Na slici 23. vidi se navedena mikrostruktura snimljena pri povećanju 50×, a na slici 24. ista struktura snimljena pri povećanju 200×.



Slika 23. Mikrostruktura poprečnog presjeka lima paralelno sa smjerom valjanja, snimljeno pri povećanju 50×

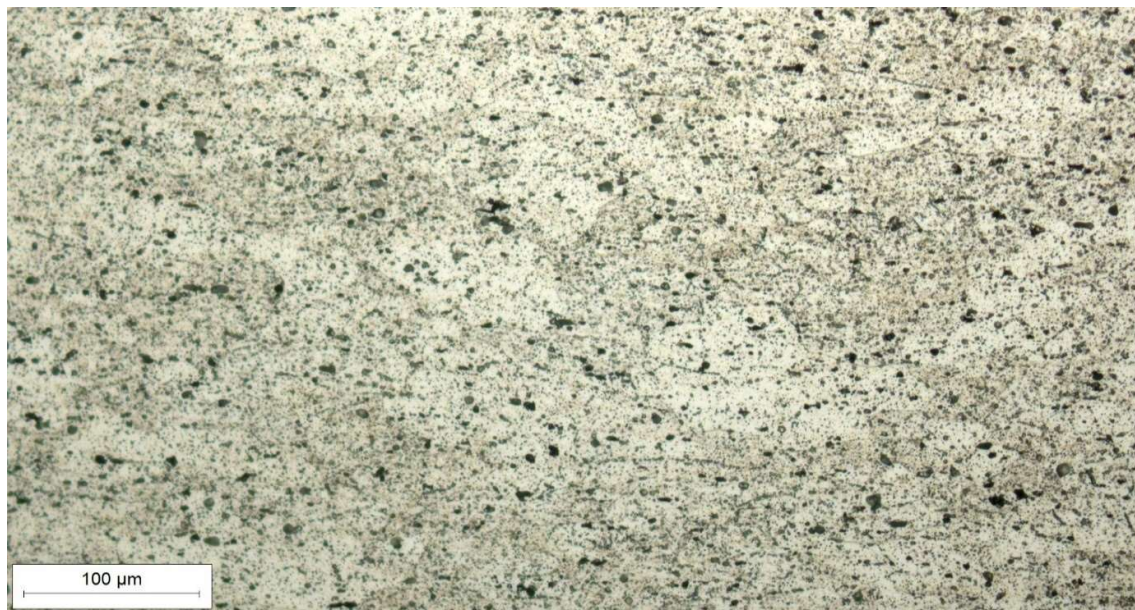


Slika 24. Mikrostruktura poprečnog presjeka lima paralelno sa smjerom valjanja, snimljeno pri povećanju 200×

Mikrostruktura poprečnog presjeka lima okomito na smjer valjanja u nagriženom stanju, snimljena pri povećanju 50×, prikazana je na slici 25. Ista mikrostruktura, snimljena pri povećanju 200×, prikazana je na slici 26.



Slika 25. Mikrostruktura poprečnog presjeka lima okomito na smjer valjanja, snimljeno pri povećanju 50×



Slika 26. Mikrostruktura poprečnog presjeka lima okomito na smjer valjanja, snimljeno pri povećanju 200×

Mikrostruktura legure AlMgSi1 sastoji se od Al-kristala mješanca i homogeno raspoređenih čestica intermetalne faze Mg₂Si. Čestice Mg₂Si mogu se vidjeti u poliranom i nagrizenom stanju, a ravnomjerno su raspoređene po granicama i unutar kristalnih zrna. Veličina ovih čestica ne prelazi 5 do 10 μm.

Površina uzoraka nagrizana je Kellerovim reagensom. Sastav ove otopine je sljedeći (100 ml):

- 95 ml destilirane vode
- 2,5 ml dušične kiseline (HNO₃)
- 1,5 ml klorovodične kiseline (HCl)
- 1 ml fluorovodične kiseline (HF).

4.5. Rezultati mjerenja gustoće ispitnog materijala

Masa uzoraka je izmjerena na analitičkoj vagi Mettler Toledo JP703C u Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Prvo je potrebno izvagati masu 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 26,2 °C. Mjerenje je ponovljeno tri puta, a srednja vrijednost gustoće AlMgSi1 uzorka iznosi $\rho = 2,628 \text{ g/cm}^3$.

Na slici 27. prikazan je uređaj za mjerenje mase.



Slika 27. Uređaj za mjerenje mase

4.6. Rezultati ispitivanja abrazijskog trošenja

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je na uređaju Taber abrader u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Na slici 28. prikazan je Taber abrader skupa s brusnim papirom i uzorkom od aluminijske legure na kojem se provodi ispitivanje. Na brusnom papiru vidi se trag koji ostavlja abradirana površina uzorka dok se disk uređaja okreće.



Slika 28. Taber abrader

Promjer abrazivnoga diska je 125 mm, brzina vrtnje je 1 o/s, a obodna brzina je 0,251 m/s. Uzorci su pri ispitivanju pritisnuti na brusni papir silom od 4,91 N.

Svaki uzorak podvrgnut je trošenju pri 100 okretaja što odgovara duljini od ≈ 25 m, za svaku kvalitetu brusnoga papira.

Abrazijsko trošenje provedeno je na 5 brusnih papira različitih granulacija. Materijal abrazivnih čestica brusnih papira je aluminijev oksid Al_2O_3 . Navedeni brusni papiri su fleksibilni, promjera 115 mm i namijenjeni obradi metala u suhim i mokrim uvjetima.

Tablica 3. prikazuje kvalitete i srednji promjer abrazivnog zrna korištenih brusnih papira.

Tablica 3. Kvaliteta i srednja veličina abrazivnog zrna [10]

Broj uzorka	Kvaliteta brusnoga papira (ISO/FEPA)	Srednji promjer abrazivnoga zrna, μm
1	P180	82,0
2	P240	58,5
3	P400	35,0
4	P500	30,2
5	P1000	18,3

Prije ispitivanja uzorcima su izmjerene dimenzije i izračunata je površina plohe koja se abradira po brusnom papiru, a koja se poklapa s poprečnim presjekom lima koji je okomit na smjer valjanja.

U tablici 4. prikazana je veličina abradirane površine svih uzoraka.

Tablica 4. Veličina abradirane površine uzoraka

Broj uzorka	AlMgSi1 A, mm^2
1	24,5
2	24,6
3	24,9
4	24,9
5	24,7

U tablici 5. prikazane su srednje vrijednosti gubitka mase svih uzoraka nakon 100 okretaja diska Taber abradera, za sve kvalitete brusnog papira. Za svaku pojedinačnu kvalitetu brusnog papira provedeno je ukupno 5 mjerenja.

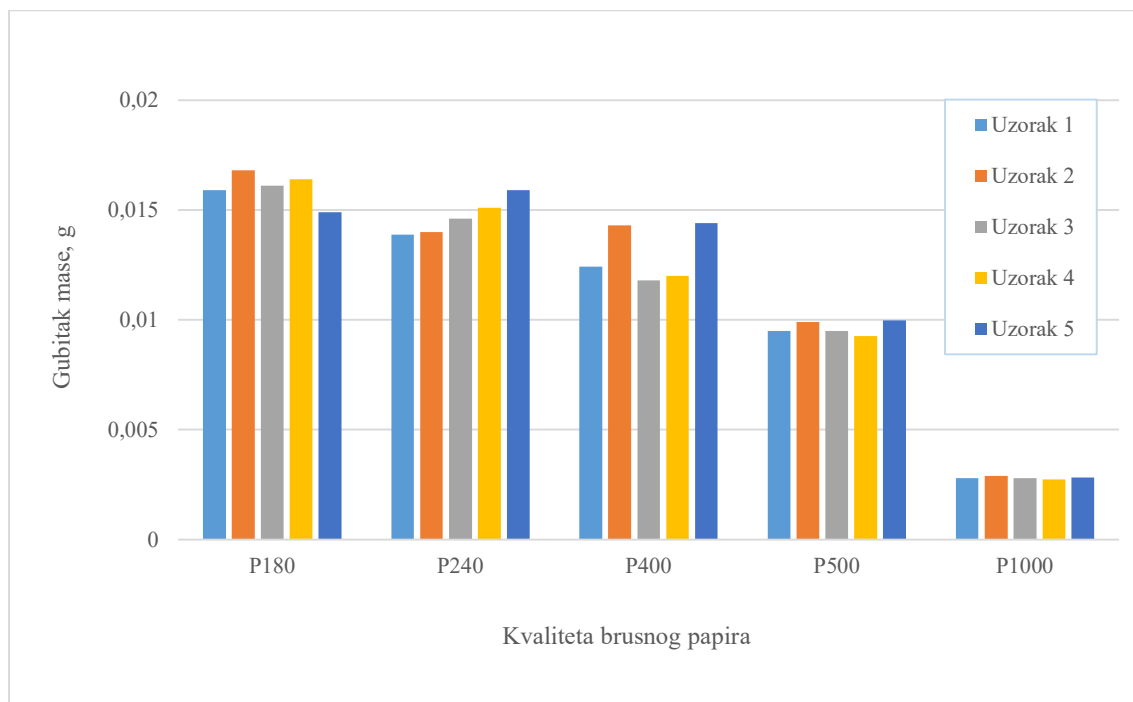
Tablica 5. Gubitak mase pri ispitivanju

Kvaliteta brusnoga papira (ISO/FEPA)	AlMgSi1 Δm , g
P180	0,0160
P240	0,0147
P400	0,0130
P500	0,0096
P1000	0,0028

Kako je gustoća svih uzoraka ista, otpornost na trošenje može se izraziti preko gubitka mase i nema potrebe računati gubitak volumena.

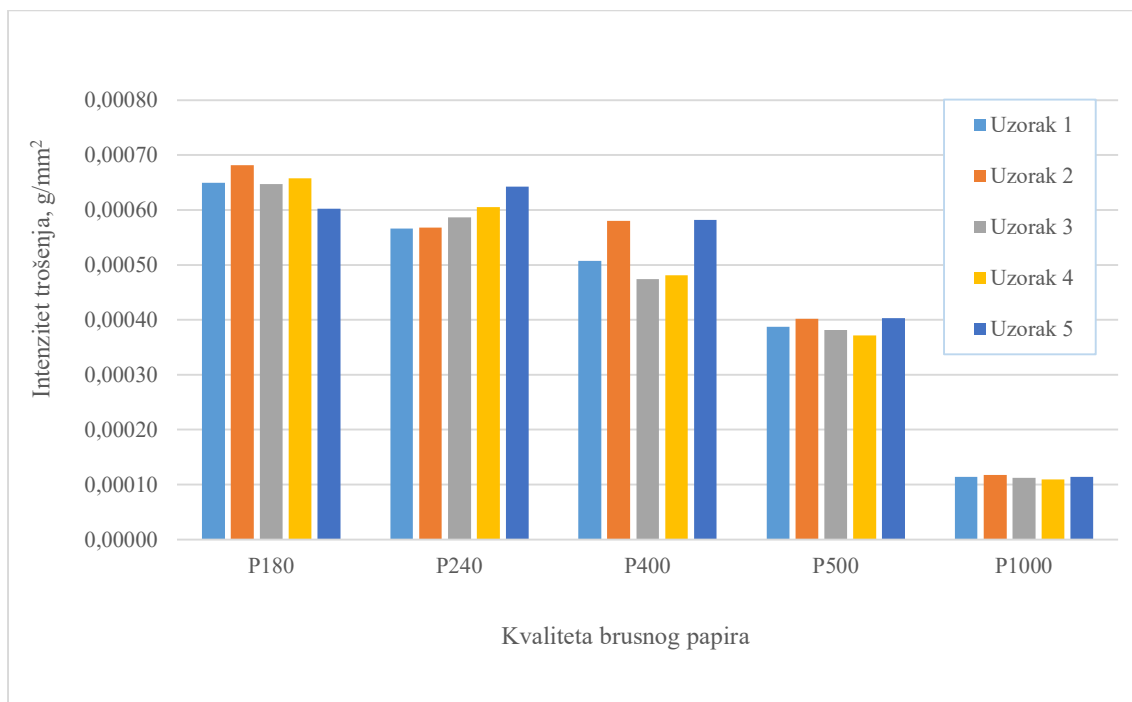
Na slici 29. grafički su prikazani svi dobiveni rezultati pri mjerenju na Taber abraderu.

S povećanjem kvalitete brusnog papira gubitak mase pri abraziji postaje sve manji. Za dva najkvalitetnija brusna papira rasipanje rezultata je izrazito malo, a kod grubljih brusnih papira zabilježene su nešto veća rasipanja rezultata.



Slika 29. Gubitak mase ispitivanih uzoraka za sve kvalitete brusnog papira

Na slici 30. prikazan je intenzitet abrazijskog trošenja, odnosno gubitak mase uzoraka sveden na površinu abradiranog presjeka, za sve kvalitete brusnog papira. Rezultati se ne razlikuju bitno od rezultata prikazanih na slici 27.

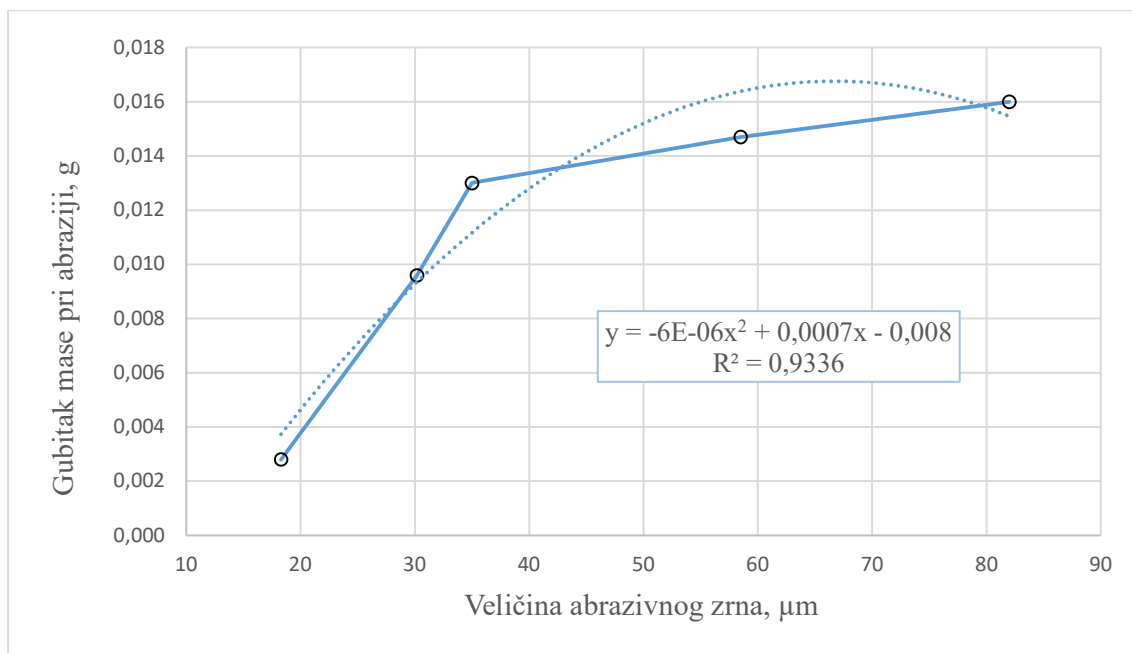


Slika 30. Intenzitet trošenja ispitivanih uzoraka za sve kvalitete brusnog papira

4.7. Analiza rezultata

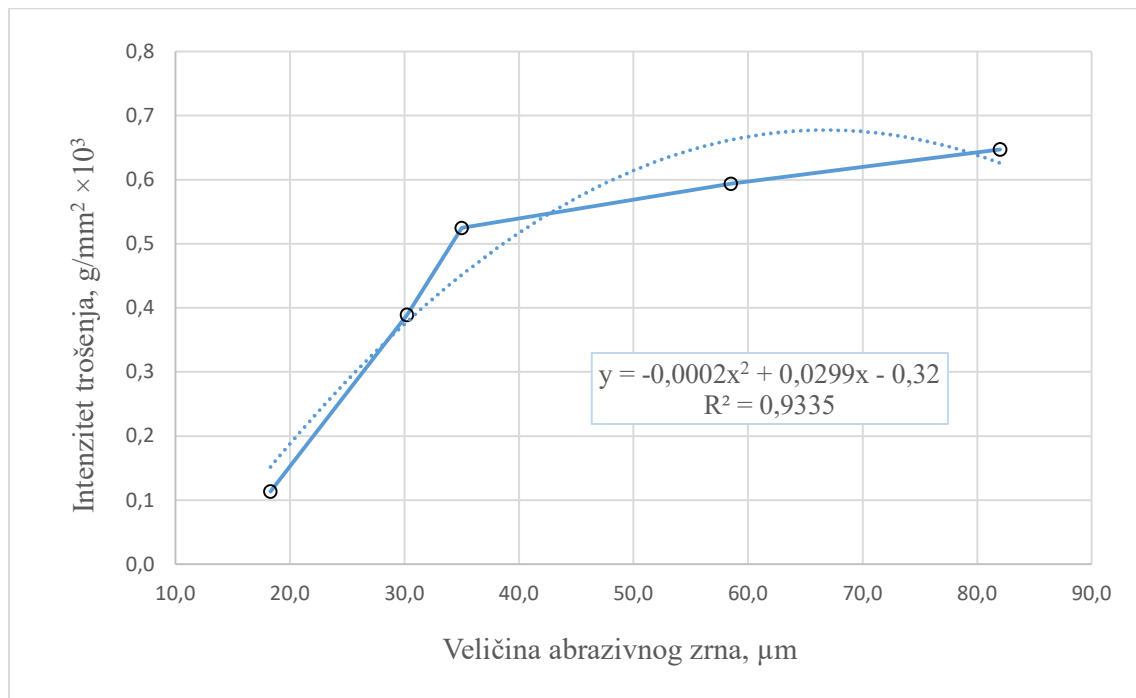
Na slici 31. grafički je prikazano kako se s promjenom veličine abrazivnog zrna mijenja gubitak mase pri abraziji. Smanjenjem kvalitete brusnog papira i porastom abrazivnog zrna, raste i gubitak mase pri abraziji. Prirast gubitka mase konstantan je do veličine abrazivnog zrna do 35,0 μm . Daljnjim povećanjem abrazivnog zrna smanjuje se prirast gubitka mase. Ovakav oblik krivulje pokazuje da je prisutan fenomen kritične veličine abrazivnog zrna. Njegova vrijednost ne može se potpuno precizno odrediti, ali nalazi se oko 35,0 μm .

Dobivena krivulja može se aproksimirati polinomom drugog stupnja kako se vidi na navedenoj slici. Koeficijent korelacije viši je od 0,9.



Slika 31. Ovisnost gubitka mase o veličini abrazivnog zrna

Na slici 32. prikazano je kako veličina abrazivnog zrna utječe na intenzitet trošenja odnosno na gubitak mase sveden na abradiranu površinu uzorka. Dobivena krivulja je vrlo slična krivulji na slici 31. To je bilo očekivano jer su uzorci imali vrlo slične dimenzije, pa im je i abradirana površina bila podjednaka.



Slika 32. Ovisnost intenziteta trošenja o veličini abrazivnog zrna

5. ZAKLJUČAK

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

- Intenzitet abrazijskog trošenja aluminijske legure AlMgSi1 ovisi o veličini abrazivnih čestica.
- Porastom abrazivnog zrna raste intenzitet abrazijskog trošenja. Ova ovisnost nije linearna. Povećanjem abrazivnog zrna smanjuje se prirast gubitka mase.
- Kod ove legure izražena je kritična veličina abrazivnog zrna i iznosi oko 35,0 μm .
- Ovisnost između intenziteta trošenja i veličine abrazivnih zrna može se aproksimirati polinomom drugog stupnja uz vrlo visoki koeficijent korelacije (veći od 0,93).

LITERATURA

- [1] Filetin T, Kovačiček F, Indof J. Svojstva i primjena materijala. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [2] Mašinović D. Utjecaj obrade taline cijepljenjem na razvoj mikrostrukture i mehanička svojstva AlSi12 legure, Diplomski rad, 2018.
- [3] Ivušić V. Tribologija. Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb; 1998.
- [4] <https://www.ffri.hr/~mdundjer/Elementi%20strojeva%20II/11-TrenjeTrosenjeI Podmazivanje.pdf> (datum pristupanja 1.9.2022)
- [5] Grilec K, Jakovljević S. Tribologija, Autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [6] Coronado JJ. Effect of Abrasive Size on Wear, Research Group of Fatigue and Surfaces, Mechanical Engineering School, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- [7] Nathan GK, Jones WJD. The empirical relationship between abrasive wear and the applied conditions, *Wear*, 9 (1966) 300 – 309.
- [8] Rede V, Essert S, Šokčević Z. Effects of microstructural orientation on the abrasive wear resistance of subfossil elm wood in three orthogonal planes, *Wear*, 380/381 (2017), 1-5
- [9] Jakopec S, Damijanić D, Kurtalj L, Lukšić H, Rede V. Effect of abrasive grain size on the abrasion resistance of black locust (*Robinia pseudoacacia*) in three characteristic sections. *Proceeding of Natural Resources, Green Technology & Sustainable Development*, Zagreb
- [10] <https://santo-abrasives.com/abrasive-grade-grit-size> (datum pristupanja 1.9.2022)