

Utjecaj veličine abrazivnih čestica na intenzitet abrazijskog trošenja aluminijske oksidne keramike

Vargek, Stjepan

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:668070>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-01**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2020.

Stjepan Vargek

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Vera Rede

Student:

Stjepan Vargek

Zagreb, 2020.

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad napravio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu. Htio bih se zahvaliti na podršci i pomoći pri izradi ovog rada svojoj mentorici dr. sc. Veri Rede i asistentici Tajani Horvat. Zahvaljujem se i svima ostalim profesorima, asistentima i kolegama koji su mi uvelike pomogli tijekom studiranja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu uz financijsku potporu Hrvatske zaklade za znanost projektom IP-2016-06-6000 *Napredna monolitna i kompozitna keramika za zaštitu od trošenja i korozije (WECOR)*.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Stjepan Vargek**

Mat. br.: 0035205129

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Utjecaj veličine abrazivnih čestica na intenzitet abrazijskog trošenja
aluminij-oksidne keramike**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Effect of abrasive grain size on the abrasive wear rate of alumina
ceramics**

Opis zadatka:

Otpornost na abrazijsko trošenje tehničkih materijala ovisi o puno čimbenika, a jedan od važnijih je veličina abrazivnih čestica. S povećanjem abrazivnih zrna, do određene veličine linearno se povećava i intenzitet abrazijskog trošenja. S daljnjim povećanjem abrazivnih čestica intenzitet trošenja se ne mijenja ili mijenja (pada ili raste), ali sa znatno manjom stopom rasta. Za ovu veličinu abrazivnih čestica uobičajen je naziv kritična veličina abrazivnoga zrna.

U završnom radu potrebno je istražiti kako veličina abrazivnih čestica utječe na intenzitet abrazijskog trošenja aluminij-oksidne keramike, dobivene postupkom hladnog izostatskog prešanja i naknadnim sinteriranjem. Površinu ispitnih uzoraka treba abradirati s abrazivnim česticama različite granulacije i na temelju dobivenih rezultata odrediti kolika je kritična veličina abrazivnog zrna. Na istim uzorcima potrebno je izmjeriti mikrotvrdoću te analizirati mikrostrukturu.

Zadatak zadan:

28. studenog 2019.

Datum predaje rada:

1. rok: 21. veljače 2020.

2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.

3. rok: 17. rujna 2020.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 24.2. – 28.2.2020.

2. rok (izvanredni): 3.7.2020.

3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	II
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. TROŠENJE	2
2.1. Abrazija	2
2.2. Podjela abrazija.....	3
2.2.1. Struktura tribosustava.....	3
2.2.2. Međudjelovanje trošene površine i abraziva	4
2.2.3. Odnos tvrdoća abraziva i materijala	6
2.3. Otpornost na abraziju.....	8
2.4. Kritična veličina abrazivnog zrna.....	9
3. KERAMIKA	11
3.1. Podjela tehničke keramike	11
3.2. Oksidna keramika	12
3.2.1. Aluminijski oksid (Al_2O_3)	12
3.3. Postupci proizvodnje i obrade keramike	13
3.3.1. Izostatsko prešanje.....	16
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	18
4.1. Cilj rada i provođenje testiranja.....	18
4.2. Ispitivani materijal	18
4.3. Analiza mikrostrukture	20
4.4. Mjerenje mikrotvrdoće	21
4.3. Ispitivanje otpornosti na abrazivsko trošenje	24
5. ZAKLJUČAK	30
LITERATURA.....	31

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Faze abrazijskog trošenja [2]	2
Slika 2.2. Abrazija s dva tijela u dodiru [4]	3
Slika 2.3. Abrazija s tri tijela u dodiru [4].....	3
Slika 2.4. Mikrobrazdanje [4]	4
Slika 2.5. Mikrorezanje [4]	5
Slika 2.6. Mikronaprsnuća [4].....	5
Slika 2.7. Mikroumor [4]	5
Slika 2.8. Površina nakon čiste abrazije [2]	6
Slika 2.9. Čestice trošenja nakon čiste abrazije [2].....	6
Slika 2.10. Površina i čestice trošenja nakon selektivne abrazije [2].....	7
Slika 2.11. Čestice trošenja nakon nulte abrazije [2]	8
Slika 2.12. Površina nakon nulte abrazije [2].....	8
Slika 2.13. Odnos intenziteta abrazivnog trošenja i omjera tvrdoće materijala naspram tvrdoće abraziva [5]	9
Slika 2.14. Graf intenziteta trošenja s obzirom na veličinu abraziva [6]	10
Slika 3.1. Mikrostruktura keramike na bazi aluminijevog oksida (α -Al ₂ O ₃) [10]	13
Slika 3.2. Faktori koji utječu na mikrostrukturu i svojstva keramičkih proizvoda [9]	14
Slika 3.3. Shema proizvodnje keramičkih proizvoda [9].....	14
Slika 3.4. Izostatsko prešanje [12]	17
Slika 4.1. Preša za izostatičko prešanje.....	18
Slika 4.2. Peć za sinteriranje	19
Slika 4.3. Uređaj za kontrolu temperature u peći.....	19
Slika 4.4. Uzorci aluminiij-oksidge keramike za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje ..	20
Slika 4.5. Mikrostruktura aluminiij-oksidge keramike u nagriženom stanju.....	21
Slika 4.8. Metoda po Vickersu [12]	22
Slika 4.9. Mikrotvrdomjer <i>Indetec</i>	23
Slika 4.10. Otisak penetratora na uzroku.....	23
Slika 4.11. Ultrazvučna kupka.....	24
Slika 4.12. Sušionik <i>Instrumentaria</i>	25
Slika 4.13. Mjerni uređaj <i>OHAUS Analytical Plus</i>	25
Slika 4.14. <i>Taber abrader</i>	26
Slika 4.15. Mjerni uređaj <i>Mettler toledo Jewelry JP</i>	28
Slika 4.16. Ovisnost intenziteta trošenja o veličini abrazivnih čestica.....	29

Slika 4.17. Linearnost u ovisnosti intenziteta trošenja i promjera abrazivnih čestica.....29

POPIS TABLICA

Tablica 4.2. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće	24
Tablica 4.3. Kvalitete korištenih brusnih papira i vrijednosti promjera abrazivnih čestica.....	26
Tablica 4.4. Gubitak mase za određeni promjer abrazivnih čestica.....	27
Tablica 4.5. Prosječni gubitak volumena i intenzitet abrazijskog trošenja za sve kvalitete brusnog papira	28

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm^2	površina presjeka uzorka
d	mm	aritmetička sredina duljina dijagonala otiska indentora
d_1	mm	duljina prve dijagonale otiska indentora
d_2	mm	duljina druge dijagonale otiska indentora
d_{sr}	μm	srednji promjer abrazivnih zrna
F	N	sila
HV	HV1	tvrdća po Vickersu
m	g	masa
V	cm^3	volumen
Δm_{sr}	mg	srednja promjena mase
ΔV_{sr}	mm^3	srednja promjena volumena
ρ	g/cm^3	gustoća

SAŽETAK

U ovom radu ispitan je utjecaj veličine abrazivnih čestica na intenzitet abrazijskog trošenja aluminij-oksidge keramike dobivene postupkom hladnog izostatičkog prešanja i naknadnim sinteriranjem. Otpornost na abrazijsko trošenje ispitana je s različitim veličinama abrazivnih zrna, a na temelju dobivenih rezultata određena je i kritična veličina abrazivnog zrna. Također je izmjerena mikrotvrdoća te je analizirana mikrostruktura aluminij-oksidge keramike.

Izmjerena mikrotvrdoća iznosila je 1810 HV1. Gustoća keramičkih uzoraka iznosila je 3,843 g/cm³, a poroznost 3,588%. Trošenjem na *Taber abraderus* različitim granulacijama brusnog papira dobiveni su rezultati koji su ukazivali na pojavnost kritične veličine abrazivnog zrna, čija je vrijednost između 46,2 μm i 68 μm. Intenziteta trošenja linearno raste s porastom abrazivnih čestica do kritične veličine abrazivnog zrna, a s daljnjim porastom abrazivnih čestica, intenzitet trošenja opada.

SUMMARY

In this paper, the effect of abrasive particle size on the abrasive wear intensity for aluminum-oxide ceramics obtained by cold isostatic pressing and subsequent sintering was examined. The abrasion resistance was tested with different sizes of abrasive grains, and based on the results obtained, the critical size of the abrasive grain was determined. The microhardness was also measured and the microstructure of aluminum oxide ceramics was analyzed.

The measured microhardness was 1810 HV1. The density of the ceramic samples was 3.843 g / cm³ and the porosity was 3.588%. Wear testing on a *Taber abrader* with different sandpaper granulations yielded results that indicated the occurrence of a critical abrasive grain size of between 46.2 μm and 68 μm. The wear intensity increases linearly with the increase of the abrasive particles to the critical size of the abrasive grain, and with the continued increase of the abrasive particles, the wear intensity decreases.

1. UVOD

Keramika je jedan od najstarijih materijala poznatih čovječanstvu, no u strojarstvu se tek relativno nedavno počinje značajnije koristiti. Keramički materijali svojim su sastavom i svojstvima značajno različiti od metala koji su tradicionalni konstrukcijski, odnosno strojarski materijali. Uz to, potreban je i gotovo potpuno drugačiji pristup konstruiranju i tehnološkim procesima pri radu s takvim materijalima.

Keramika imavisoku tvrdoću, izuzetnu kemijsku postojanost, toplinski je otporna i otporna je na trošenjepa se i primjenjuje na elementima kod kojih su takvi zahtjevi naglašeni. Posljednjih godina sve više se radi na razvoju i pronalaženju novih načina primjene keramike. Istraživanjem strukture, sastava, procesa preoblikovanja, parametara sinteriranja i ponašanja tehničke keramike u samoj uporabi pokušavaju se minimizirati nedostaci tog materijala. Tu se ponajprije misli na veliku krhkost, slabu lomnu žilavost, nepredvidivost ponašanja u eksploatacijskim uvjetima te slabu otpornost na mehaničke i toplinske šokove. Smanjenjem utjecaja tih negativnih svojstava područje primjene moglo bi se bitno proširiti.

Aluminijev oksid je najpoznatiji i najčešće korišteni keramički materijal u tehnici. Ima isto sinterirano kristalno tijelo kao safir i rubin. Desetljećima se koristi u električnim dijelovima zbog svojih izolacijskih svojstava, a široko se koristi u mehaničkim dijelovima zbog svoje visoke čvrstoće, otpornosti na koroziju i trošenje. [1]

Trošenje je nepoželjan, ali neizbježan proces u eksploataciji. Odnosi se na mehaničko odnošenje materijala i jedan je od ključnih faktora koji ograničava životni vijek proizvoda. Najznačajniji mehanizam trošenja je abrazija. Abrazija je u svojoj suštini mikrorezanje abrazivom. U svrhu smanjenja trošenja abrazijskim mehanizmom poduzimaju se različite mjere kao što je primjena materijala kojem je tvrdoća viša od tvrdoće abrazivnih čestica.

Kod ispitavanja nekih materijala na abrazijsko trošenje dolazi do pojave koja nije intuitivna. Povećanjem veličine abrazijske čestice dolazi do povećanja intenziteta trošenja, odnosno povećanja gubitka mase, no u nekim slučajevima pri određenoj veličine abrazivne čestice intenzitet trošenja se više ne mijenja linearno, već daljim povećavanjem abrazivnog zrna trošenje može rasti manjim intenzitetom, ostati na istoj razini ili se čak smanjiti. Veličina čestice pri kojoj dolazi do te pojave naziva se kritična veličina abrazivnog zrna. Kritična veličina abrazivnog zrna ovisi o strukturi i sastavu trošenog materijala i određuje se isključivo eksperimentalno.

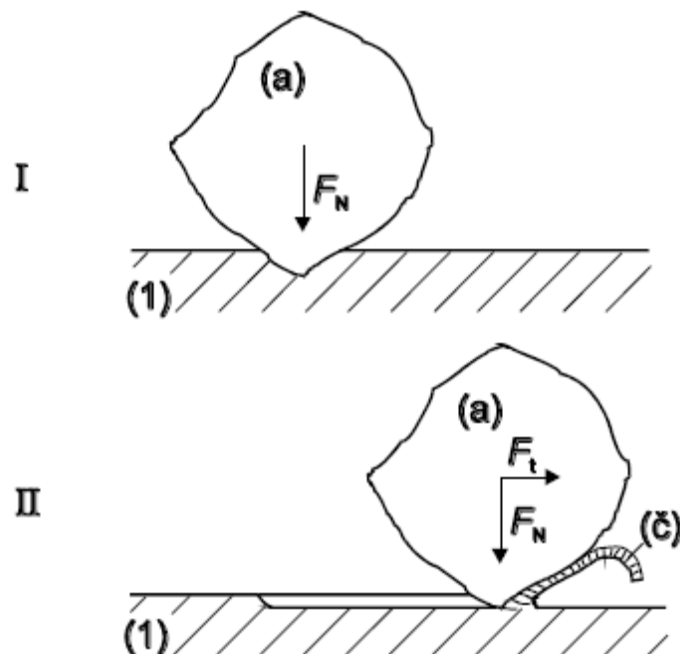
2. TROŠENJE

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama.[2] Do trošenja dolazi zbog mehaničkih i kemijskih faktora, a ubrzano je zagrijavanjem koje je izazvano trenjem u tribosustavu.

Premda postoji velik broj slučajeva trošenja, većina je autora suglasna da su samo četiri osnovna mehanizma trošenja: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija. [3] Ti su mehanizmi opisani jediničnim događajima koji opisuju slijed zbivanja koji rezultira odvajanjem jedne čestice s trošene površine i uključuje proces nastajanja i proces napredovanja pukotina.

2.1. Abrazija

Abrazija je najznačajniji i najčešći mehanizam trošenja. Radi se o trošenju istiskivanjem materijala tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Jedinični događaj kod abrazijskog trošenja sastoji se od dvije faze. Prva faza je prodiranje abraziva u površinu materijala, a druga faza je istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja. Navedene faze su prikazane na slici 2.1. [2]



Slika 2.1. Faze abrazijskog trošenja [2]

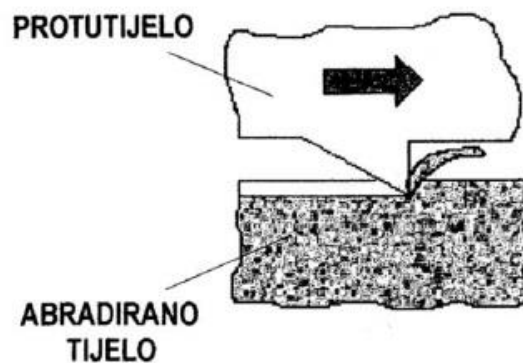
Kao što je vidljivo na slici 2.1. u prvoj fazi normalna komponenta sile F_N djeluje okomito na trošenu površinu i izaziva prodiranje u površinu. Dok se u drugoj fazi osim normalne sile

pojavljuje i tangencijalna komponenta sile F_T koja djeluje vodoravno sa površinom i istiskuje česticu trošenja.

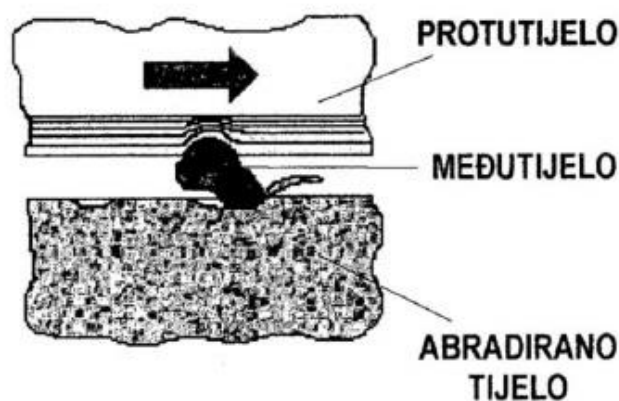
2.2. Podjela abrazija

2.2.1. Struktura tribosustava

S obzirom na strukturu tribosustava abrazija se pojavljuje u dva oblika: abrazija s dva tijela u dodiru i abrazija s tri tijela u dodiru. Kod abrazije s dva tijela prikazane na slici 2.2. sustav se sastoji od dva tijela koja su u ulozi abrazivnog tijela i abrazivnog protutijela, drugi je slučaj sa slike 2.3. kad uz abrazivno tijelo i protutijelo postoje još i čestice koje se kreću između njih i djeluju abrazivno.



Slika 2.2. Abrazija s dva tijela u dodiru [4]



Slika 2.3. Abrazija s tri tijela u dodiru [4]

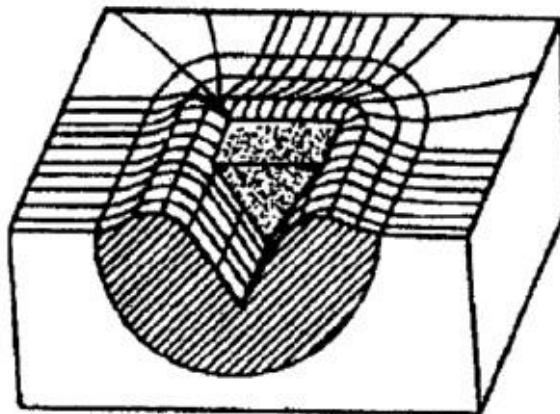
Prema rezultatima više istraživanja odnošenje materijala u dodiru tri tijela je znatno manje nego u slučaju abrazije dva tijela. Razlog tomu je što čestice abrazije samo oko 10 % vremena provode u odnošenju materijala dok se ostatak vremena kotrljaju u slobodnom međuprostoru [4].

2.2.2. Međudjelovanje trošene površine i abraziva

Ovisno o međudjelovanju trošene površine i abrazijskog tijela pojavljuju se sljedeći mikromehanizmi trošenja:

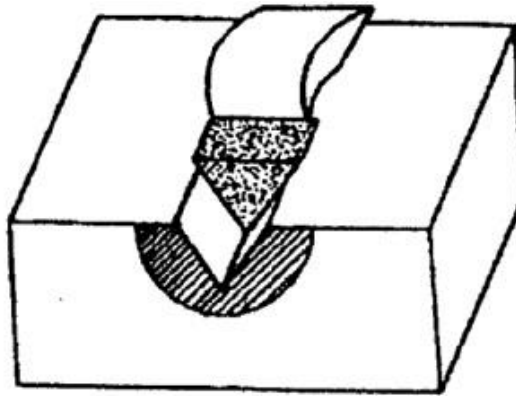
- mikrobrazdanje
- mikrorezanje
- mikronaprnuća
- mikroumor.

Mikrobrazdanje je odnošenje materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice. Abrazijska čestica neće proizvesti produkte trošenja, već će materijal biti odvojen u stranu u obliku "grebena". Što je i prikazano na slici 2.4.



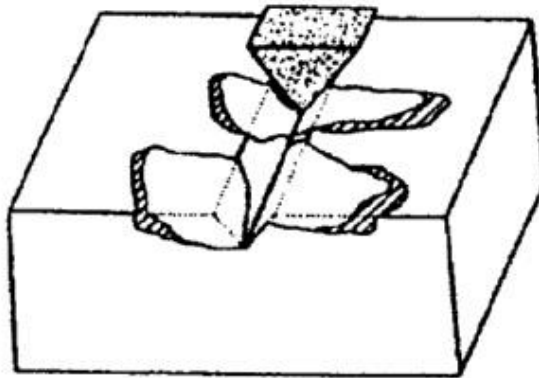
Slika 2.4. Mikrobrazdanje [4]

Mikrorezanje je mikromehanizam kod kojeg je odnošenje materijala jednako volumenu zareza nastalog odnošenjem abraziva, slika 2.5.



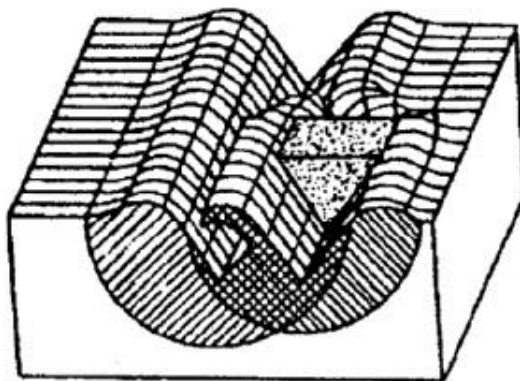
Slika 2.5. Mikrorezanje [4]

Mikronaprsnuća se javljaju na krhkoj površini nastankom i širenjem mikropukotina. Kao na slici 2.6..



Slika 2.6. Mikronaprsnuća [4]

Mikroumor nastaje dinamičkim opterećenjem koje izaziva umor površine. Materijal je izložen trenutnim deformacijama zbog kojih nastaju mikropukotine koje se pak dalje šire i na kraju uzrokuju odvajanje komadića trošene površine, slika 2.7.



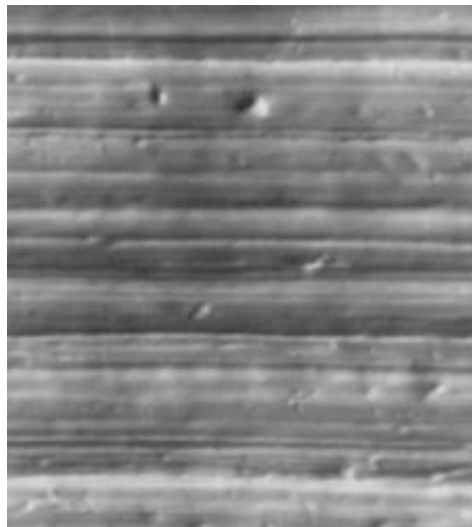
Slika 2.7. Mikroumor [4]

2.2.3. Odnos tvrdoća abraziva i materijala

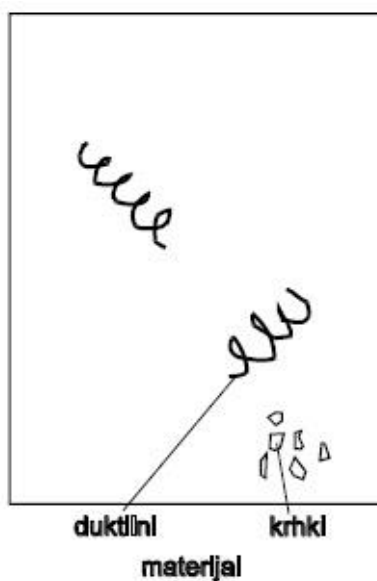
S obzirom na tvrdoću abraziva i trošene površine razlikuju se:

- čista abrazija,
- selektivna,
- nulta abrazija.

Čista abrazija javlja se kad je materijal abraziva tvrdi od materijala podloge koja se troši. Površina je izbrazdana kao što se vidi na slici 2.8., a oblik čestica trošenja ovisi o žilavosti materijala. Kod krhkih materijala čestice su lomljene strugotine, dok su čestice trošenja u obliku spiralnih strugotina za duktilnije materijale, slika 2.9.

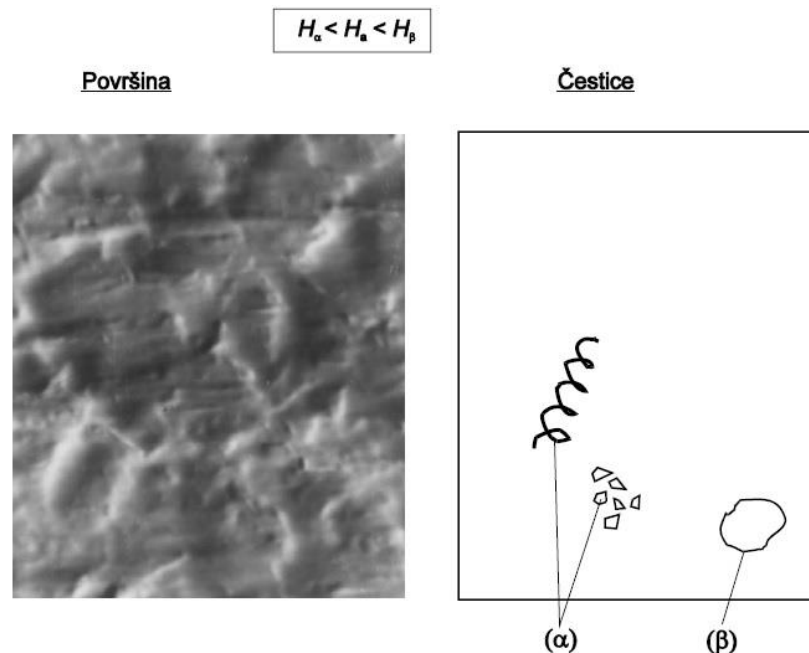


Slika 2.8. Površina nakon čiste abrazije [2]



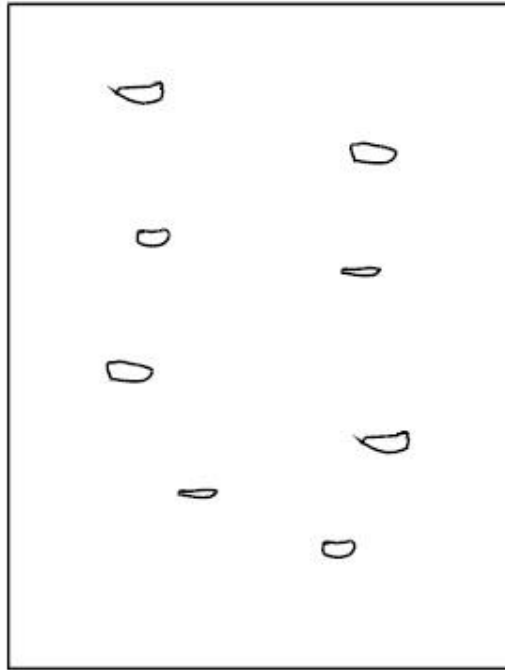
Slika 2.9. Čestice trošenja nakon čiste abrazije [2]

Drugi slučaj je selektivna abrazija koja se javlja kad na površini postoje faze i veće, i manje tvrdoće od one abraziva. U tom slučaju troše se dijelovi, odnosno faze, mekši od abraziva. Rezultat takvog trošenja izbrazdana je površina s prekidima na mjestima gdje se nalazi tvrđa faza. Takva površina prikazana je na slici 2.10. Trošeni materijal sadržat će i čestice tvrde faze koje su izgubile uklještenje u mekšim segmentima.

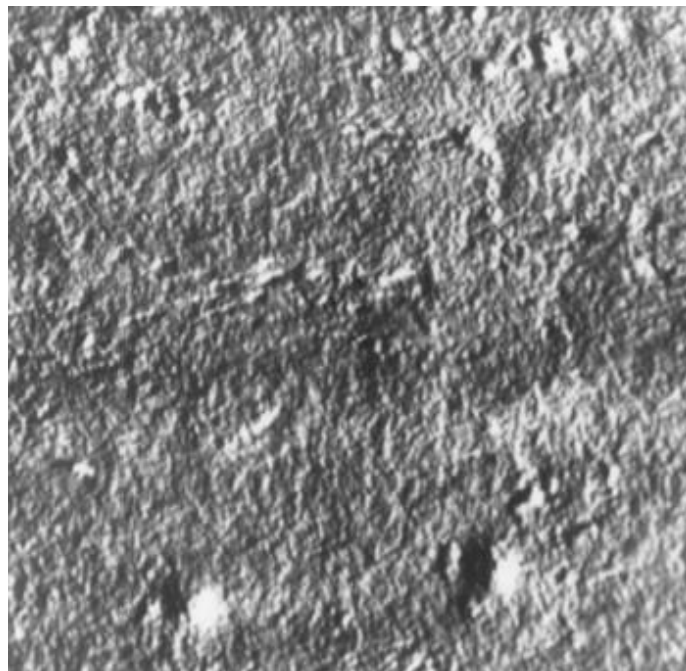


Slika 2.10. Površina i čestice trošenja nakon selektivne abrazije [2]

Nulta abrazija se javlja kad je abraziv mekši od materijala površine. Površina izgleda ispolirano, a čestice trošenja su u obliku sitnih ljuskica, slika 2.11., koje potječu iz vanjskog graničnog sloja. Ovaj oblik abrazije karakterističan je za površinske slojeve dobivene postupcima oplemenjivanja površine. Izgled površine prikazan je na slici 2.12.[2]



Slika 2.11. Čestice trošenja nakon nulte abrazije [2]

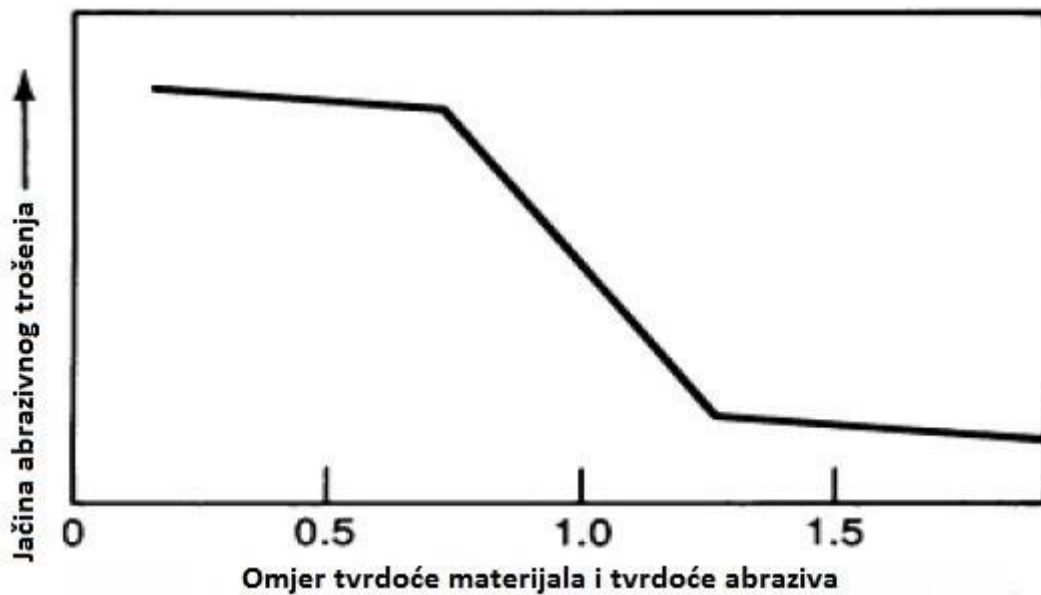


Slika 2.12. Površina nakon nulte abrazije [2]

2.3. Otpornost na abraziju

Otpornost na abraziju najviše ovisi o odnosima mikrotvrdoća abraziva i površine kao što se vidi na slici 2.13. Za sprečavanje prve faze abrazije, odnosno prodiranje u površinu materijala, poželjno je da površina bude što veće mikrotvrdoće u usporedbi s abrazivom i da tako dođe do nulte abrazije kao najmanje agresivnog oblika abrazijskog trošenja. Za drugu fazu abrazije, to

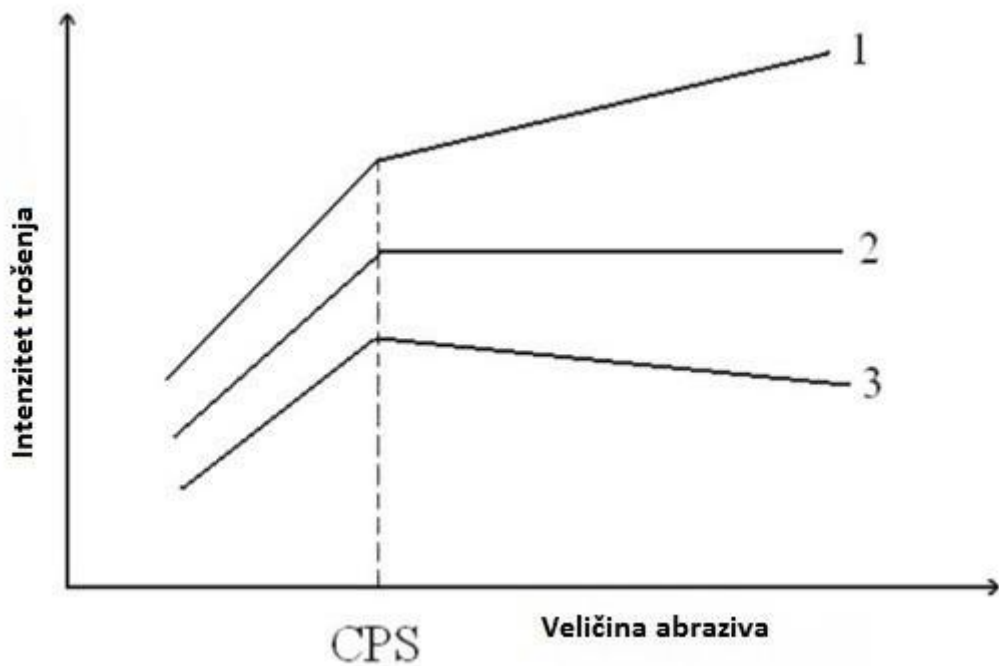
jest isiskivanje materijala najvažniji je način napredovanja pukotine koji može biti duktilni, krhki ili pak umor površine.



Slika 2.13. Odnos intenziteta abrazivnog trošenja i omjera tvrdoće materijala naspram tvrdoće abraziva [5]

2.4. Kritična veličina abrazivnog zrna

Literatura navodi da za male veličine abrazivnih zrna odnos između veličine čestica i gubitka mase ostaje linearan. Takav odnos održava se sve do kritične veličine abrazivne čestice. Nakon što se postigne kritična veličina (engl. CPS - *critical particle size*) postoje tri vrste ponašanja prikazana na slici 2.14. Intenzitet trošenja raste manjom stopom rasta što je slučaj na krivulji 1, trošenje može ostati konstantno i neovisno o daljnjem povećanju čestica abraziva kao na krivulji 2 ili pak može pokazivati smanjenje intenziteta trošenja povećanjem zrna, krivulja 3. [6]



Slika 2.14. Graf intenziteta trošenja s obzirom na veličinu abraziva [6]

Generalno objašnjenje uzroka pojave fenomena kritične veličine abrazivne čestice još uvijek ne postoji. No za neke posebne slučajeve ima adekvatnih teorija. Pa tako za metalne materijale u uvjetima abrazije dvaju tijela se smatra da kod manjih veličina zrna oštri vrhovi čestica režu materijal s manjom penetracijom i tako stvaraju kontinuirane i nedefomirane čestice trošenja. No kod neke veličine čestica koja je kritična dominantni mehanizam abrazije više nije mikrorezanje već to postaje mikrobrazdanje pa čestice trošenja postaju diskontinuirane i deformirane. Mikrobrazdanjem dolazi do manjeg gubitka mase materijala pa tako pada intenzitet trošenja. S obzirom na potencijalnu povećanu uporabu keramičkih i polimernih materijala potrebno je istražiti i doći do nekih zaključaka i objašnjenja pojavnosti ovog fenomena i na tim materijalima i u različitim uvjetima trošenja. [7]

3. KERAMIKA

Keramika je pojam vezan uz materijale, koji se zbog svoje raznolikosti sirovina i primjena, zasniva na povijesno nasljeđenim pojmovima. Mnoge nacionalne sustavne podjele tek polako počinju definirati zajedničke elemente, izvedene iz suradnje znanosti, industrijskog normiranja te međunarodne trgovačke statistike. [8] Keramički materijali su anorganski i nemetalni te se sastoje od metalnih i nemetalnih elemenata povezanih ionskim odnosno kovalentnim vezama. Struktura im je staklasta, kristalna ili kombinacija staklaste i kristalne. Keramika je obično tvrda i kemijski nereaktivna te se može formirati toplinom.

3.1. Podjela tehničke keramike

Tehnička se keramika dijeli po veličini zrna, prema namjeni i mineralnom odnosno kemijskom sastavu.

Prema veličini zrna tehnička keramika može biti gruba i fina. Fina tehnička keramika ima veličinu zrna manju od 0,1 mm, a velična zrna grube keramike je u rasponu od 0,1 mm do 0,2 mm. [9]

S obzirom na karakterističnu namjenu keramičkih materijala ne postoji sasvim izražena podjela, no u tom smislu se pojavljuju termini kao što su konstrukcijska, rezna keramika, biokeramika, elektrokeramika i visokokvalitetna keramika.

Visokokvalitetna keramika ponajprije ističe razgraničenje prema tradicionalnoj keramici na bazi gline koja se rabi za posuđe, sanitarnu keramiku te građevinsku keramiku. Rezna keramika je visokokvalitetna keramika koja se koristi za izradu alata za obradu odvajanjem čestica. Biokeramika se primjenjuje u medicini za nadomjestke tkiva. Elektrokeramika je vrsta keramičkog materijala namijenjena uporabi u elektrotehnici i elektronici.

Konstrukcijski keramički materijali su oni koji u nekom obliku moraju izdržati mehanička opterećenja, pojmovi inženjerske i industrijske keramike upotrebljavaju se u sličnu svrhu.

Podjela po kemijskom sastavu je najkonkretnija od svih klasifikacija keramike. Postoji:

- silikatna keramika
- oksidna keramika
- neoksidna keramika.

U silikatnu keramiku spadaju tehnički porculani i ostala keramika na bazi silicija. Oksidna keramika je bazirana na jednodijeljenim ili višekomponentnim sustavima metalnih oksida

(udio oksida veći je od 90 %). Neoksidna keramika se bazira na spojevima bora, ugljika, dušika i silicija.

3.2. Oksidna keramika

Oksidna keramika je materijal koji se uglavnom sastoji od metalnih oksida. Udio staklene faze je nizak ili nikakav. Sirovine su proizvedene sintetičkim putem i imaju visok stupanj čistoće. Pri visokim temperaturama sinteriranja nastaje ujednačena mikrostruktura koja je odgovorna za poboljšana svojstva. Oksidna se keramika rabi u elektronici, vrlo često kao konstrukcijska keramika te za neelektrične primjene. Svojstva takve keramike su dobra lomna žilavost, otpornost na trošenje i visoke temperature kao i korozivna otpornost.

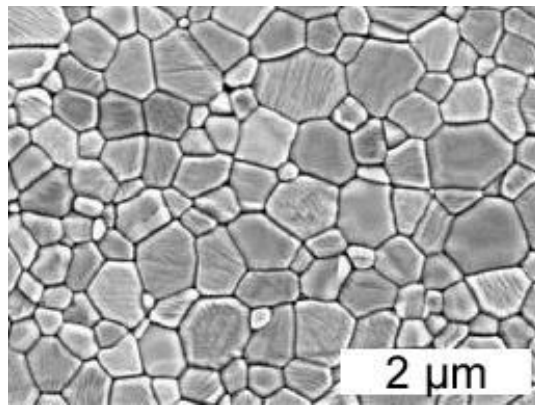
Tipični predstavnici oksidne keramike su:

- aluminijev oksid
- magnezijev oksid
- cirkonijev oksid
- aluminijev titanat
- olovo-cirkonijev titanat
- titanov oksid.[8]

3.2.1. Aluminijev oksid (Al_2O_3)

Aluminijev oksid je najvažniji predstavnik oksidne keramike koji se primjenjuje u tehnici. U ovakvim materijalima je udio Al_2O_3 viši od 80 %, a može biti i do 99 %. Keramika od aluminijevog oksida ima veliku čvrstoću i tvrdoću, temperaturno je postojana te pokazuje veliku otpornost na trošenje. Monolitna aluminij oksidna keramika (Al_2O_3) ima nisku lomnu žilavost, savojnu čvrstoću (<600 MPa) i veliku otpornost na trošenje. Tetragonalna modifikacija cirkon oksidne keramike koja je stabilizirana itrijem (t-ZrO₂) ima relativno visoku lomnu žilavost, visoku savojnu čvrstoću (1000 MPa -1500 MPa) i visoku otpornost na trošenje. Mehanička i tribološka svojstva monolitne Al_2O_3 keramike mogu se poboljšati dodatkom t-ZrO₂ keramike.[9]

Mikrostruktura aluminijevog oksida prikazana je na slici 3.1.



Slika 3.1. Mikrostruktura keramike na bazi aluminijevog oksida (α -Al₂O₃) [10]

Područja primjene aluminij-oksidne keramike su:

- elektrotehnika
- elektronika
- strojogradnja
- kemijska industrija
- mjerna tehnika
- medicina
- kod postizanja visokih temperatura.

Aluminijev oksid se koristi u elektrotehnici i elektronici za izolacijske dijelove, u strojogradnji zbog otpornosti trošenju, a zbog svoje otpornosti visokoj temperaturi za termoelemente kod mjerenja.

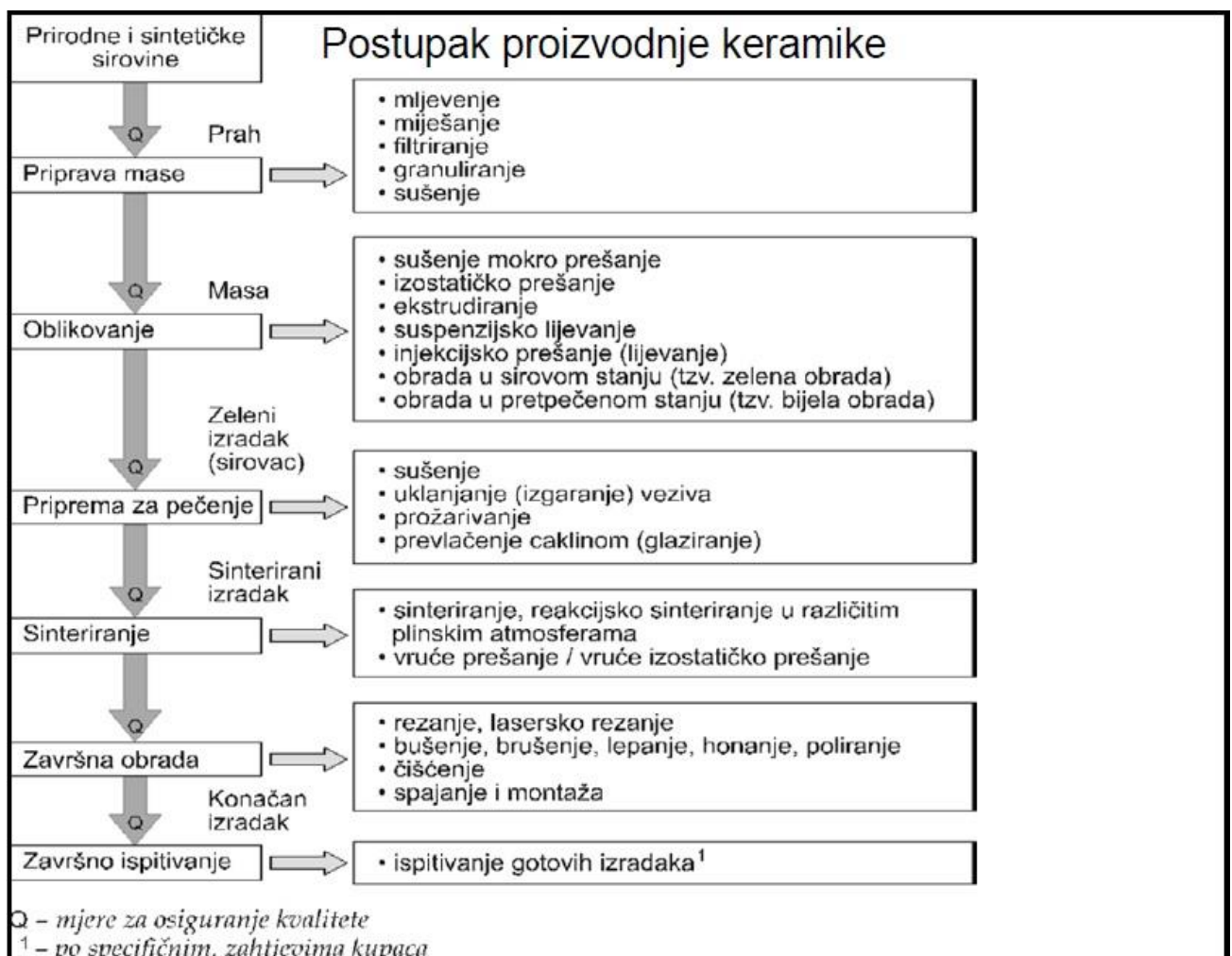
3.3. Postupci proizvodnje i obrade keramike

Na temelju svojstva keramičkih materijala uglavnom se utječe odabirom sirovine i postupka proizvodnje. U cjelokupnom kompleksnom procesu proizvodnje, određeni prah, oblikovanje i proces sinteriranja zajedno utječu na stvaranje presudno važne mikrostrukture i time željenih svojstava proizvoda. [9] Shema glavnih faktora koji utječu na svojstva keramičkog proizvoda prikazana je na slici 3.2.



Slika 3.2. Faktori koji utječu na mikrostrukturu i svojstva keramičkih proizvoda [9]

Postupak proizvodnje keramičkih izradaka shematski je prikazan na slici 3.3.



Slika 3.3. Shema proizvodnje keramičkih proizvoda [9]

Cijeli postupak prikazan na slici 3.3. mogao bi se svesti na četiri glavna dijela:

a) PROCESI PRIPREME SIROVINE :

- određivanje sastava
- mljevenje
- miješanje i priprema samljevenog praha
- granuliranje
- spajanje pomoću veziva
- sušenje raspršivanjem.

b) OBLIKOVANJE

Izbor pogodnog postupka oblikovanja ovisi o udjelu vode i s tim povezanom oblikovljivošću sirovine, ali s druge strane i o konačnoj geometriji dijela, veličini i broju komada. Prema DIN 8580 razlikujemo postupke praoblikovanja i preoblikovanja keramičkih izradaka kojisu razvrstani u dvije skupine: prešanje i lijevanje:

- rotacijsko oblikovanje, za simetrične okrugle dijelove
- isprešavanje profila, cijevi i šipki (sirovina s oko 20 % vode)
- suho prešanje (< 8 % vode). Tlak iznosi više od 30 MPa, postupak se može automatizirati i to za veći broj komada
- mokro prešanje (8 % - 12 % vode) za složenije oblike, tlak iznosi od 1 MPa do 20 MPa
- izostatičko prešanje. Uz tlak od 400 MPa sirovina postiže 85 % gustoće
- injekcijsko prešanje - za velik broj sitnih dijelova složenog oblika
- lijevanje u formu - *Slip Casting* ili *Schlickergiessen*, za pojedinačne voluminozne šupljeoblike.

c) SINTERIRANJE - predstavlja najvažniju operaciju u proizvodnji keramičkih izradaka. Razlikujemo sljedeće postupke:

- sinteriranje u različitim atmosferama
- reakcijsko sinteriranje (RB)
- sinteriranje uz vruće prešanje (HP)
- sinteriranje uz vruće izostatičko prešanje (HIP).

d) ZAVRŠNA OBRADA :

- brušenje dijamantnim alatima

- lepanje
- honanje
- poliranje
- elektroerozija
- lasersko rezanje i obrada. [11]

3.3.1. Izostatsko prešanje

Izostatičko prešanje jedan je od načina oblikovanja keramičkih izradaka. Oblikovanjem se prahovi zgušnjavaju i oblikuju u definirane oblike da se dobije čvrstoća za daljnje rukovanje. Takvi izradci (sirovci ili zeleni izradci) se mogu i dalje prerađivati prije pečenja. Važno je izbjeći gradijentne gustoće i teksture jer one u konačnici mogu dovesti do deformacija i mogu uzrokovati zaostala naprezanja. [8]

Izostatsko prešanje je metoda sabijanja praška koja uključuje primjenu tlaka iz više smjera kroz tekući ili plinoviti medij koji okružuje zbijeni dio.

Hladno izostatsko prešanje (CIP) provodi se na sobnoj temperaturi. Fleksibilni (najčešće poliuretanski) kalup uronjen u tekući medij pod pritiskom (obično voda) koristi se kod hladnog izostatskog prešanja. Postoje dvije vrste hladnog izostatskog prešanja: mokro i suho.

Kod mokre metode kalup se uklanja i dopunjava nakon svakog tlačnog ciklusa. Ova je metoda prikladna za sabijanje velikih i složenih dijelova.

Kod suhe metode kalup je sastavni dio posude. Suha metoda koristi se za sabijanje jednostavnijih i manjih dijelova.

Metoda hladnog izostatskog prešanja (CIP) ima sljedeće prednosti u usporedbi s metodom jednoosnog hladnog prešanja:

- bolja ujednačenost zbijanja
- složeniji oblici (na primjer duge cijevi s tankim zidovima) mogu se zbijati.

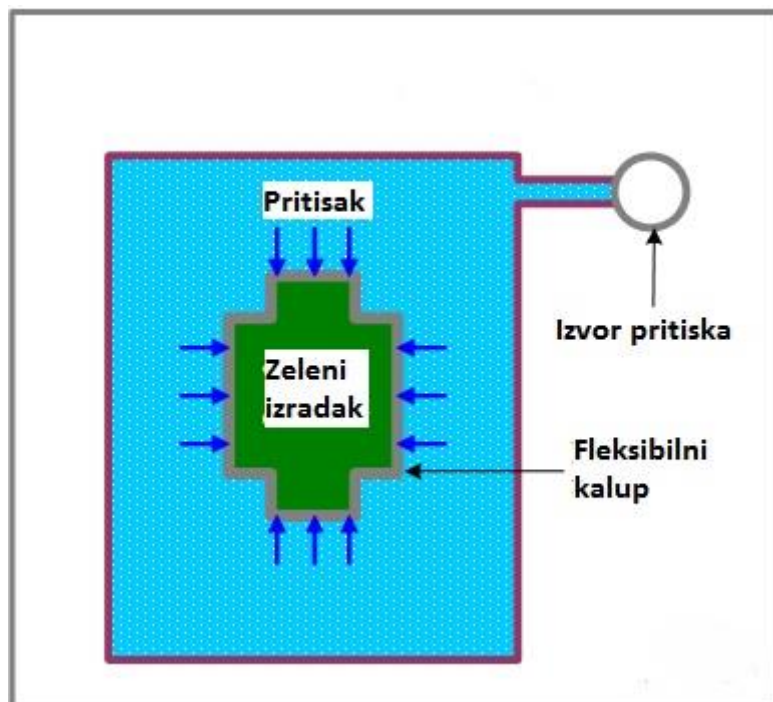
Vruće izostatsko prešanje (HIP) uključuje izostatsko prešanje koje se vrši pri povišenoj temperaturi. Kao tlačni medij koristi se plin (dušik ili argon).

Radni pritisci koji se primjenjuju u metodi vrućeg izostatskog prešanja obično su između 100 MPa i 300 MPa. Vruća izostatska metoda (HIP) kombinira prešanje i sinteriranje, uzrokujući konsolidaciju čestica praha, popunjavajući praznine i pore. Izradak se smanjuje i zgušnjava, tvoreći strukturu visoke čvrstoće.

Metoda se može koristiti bez kalupa. U ovom se slučaju izradak prvo zbija hladnim izostatskim prešanjem, a zatim se sinterira kako bi se smanjila poroznost. Sinterirani (ali još uvijek porozni) dio se zatim pritisne izostatički na visokoj temperaturi bez ikakvih kalupa.[12]

Izostatičko prešanje služi za proizvodnju sirovina i većih izradaka s ravnomjernim rasporedom gustoće koji su pogodni za daljnju preradu u sirovom stanju. Ovo oblikovanje prikladno je za izradu zahtjevnih prototipova i za izradu maloserijskih proizvoda. Izradu određenih proizvoda moguće je potpuno automatizirati. [8]

Princip hladnog izostatskog prešanja prikazan je na slici 3.4.



Slika 3.4. Izostatsko prešanje [12]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Cilj rada i provođenje testiranja

Osnovna ideja rada bila je određivanje promjena inteziteta trošenja aluminijske keramike s promjenom veličine abrazivnih čestica. Na uzorcima je izmjerena i mikrotvrdoća površine, te je provedena analiza mikrostrukture.

Postupak provođenja ispitivanja sastojao se od trošenja uzoraka na uređaju *Taber abrader* s različitim kvalitetama brusnog papira. Nakon trošenja uzorci su se morali očistiti u ultrazvučnoj kupki. Uzorci su se vagali prije i nakon trošenja, odnosno nakon čišćenja, kako bi se odredila promjena mase izazvana trošenjem. Da bi se otpornost na trošenje različitih materijala mogla međusobno uspoređivati nužno je gubitak mase preračunati u gubitak volumena. Dijeljenjem gubitka volumena s površinom koja je izložena trošenju dobije se intenzitet trošenja.

4.2. Ispitivani materijal

Uzorci aluminijske keramike oblikovani su postupkom hladnog izostatičkog prešanja i naknadnog sinteriranja. Prah aluminijskog oksida (Al_2O_3) iz kojeg su napravljeni uzorci dobiven je sušenjem i raspršivanjem (engl. *spray drying*). Uzorci su oblikovani hladnim izostatičkim prešanjem pod tlakom od 90 MPa u preši prikazanoj na slici 4.1.



Slika 4.1. Preša za izostatičko prešanje

Nakon prešanja uzorci su strojno obrađeni na željene dimenzije. Potom u svrhu dobivanja aluminijske keramike sinterirani su u plinskoj peći za sinteriranje, prikazano je na slici 4.2.

Sinteriranje je provedeno pri temperaturi od 1650 °C u trajanju od 140 sati uz postepeno grijanje i hlađenje. Na slici 4.3. prikazan je uređaj za kontrolu temperature u peći.

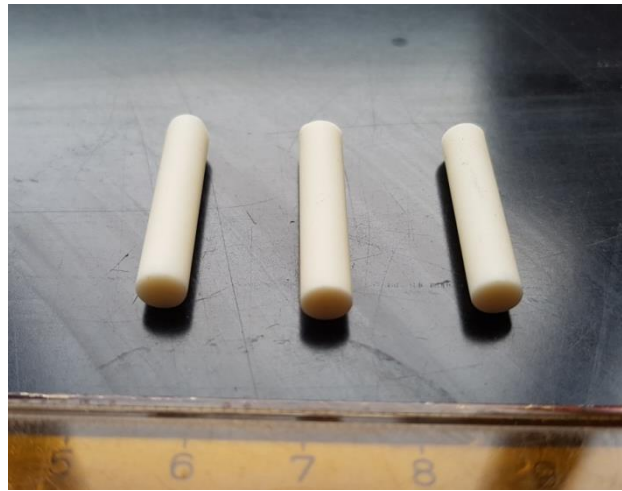


Slika 4.2. Peć za sinteriranje



Slika 4.3. Uređaj za kontrolu temperature u peći

Dobiveni uzorci su cilindričnog oblika i prikazani su na slici 4.4.



Slika 4.4. Uzorci aluminij-oksidge keramike za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

4.3. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture ispitivanih uzoraka provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na uzorcima je provedena keramografska analiza koja se sastojala od pripreme uzorka (zalijevanje, brušenje i poliranje), toplinskog nagrizanja, analize mikrostrukture i mjernje mikrotvrdoće.

Uzorak je zaliven u masu za zalijevanje pod nazivom *Acry Fix Kit*. Vrijeme skrućivanja mase bilo je oko 10 minuta. Prije zalijevanja uzorka masa se miješa 1 min i nakon skrućivanja odnosno vađenja iz kalupa zaliveni uzorak pere se vodom.

Nakon zalijevanja slijedi brušenje koje se sastojalo od tri koraka, odnosno napravljeno je na tri dijamantne brusne ploče različitih granulacija:

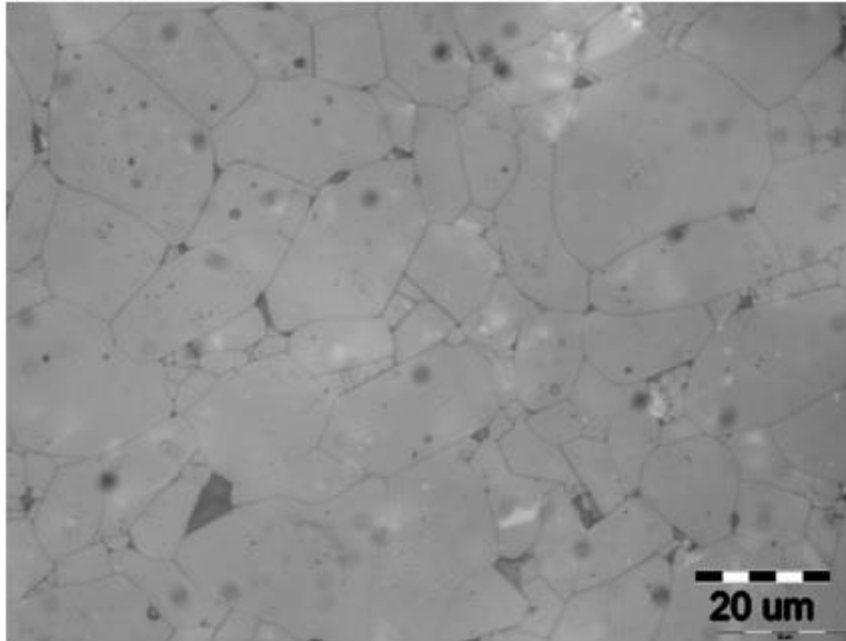
- grit 120 - veličina čestica 181 μm
- grit 220 - veličina čestica 65 μm
- grit 600 - veličina čestica 20 μm .

Broj okretaja brusnih ploča je približno 300 okretaja u minuti. Brušenje se obavlja uz hlađenje vodom. Osim što hladi uzorak voda odnosi čestice trošenja iz područja brušenja. Nakon završene jedne faze brušenja, uzorak se ispiri vodom i zatim brusi na isti način brusnom pločom finije granulacije. Potom slijedi brušenje papirom (brusno sredstvo je SiC) finoće 1200, 2400 i 4000 oko 1 minutu po jednom brusnom papiru.

Za poliranje uzoraka korsičila se dijamantna pasta veličine čestica dijamanta od 6 μm . Poliranje ovom kvalitetom trajalo je 5 minuta. Nakon toga slijedi poliranje pastom s finijim česticama

promjera oko 3 μm u trajanju također 5 minuta i pri istim uvjetima. Treći dio poliranja rađen je dijamantnom pastom veličine čestica dijamanta 1 μm u vremenu oko 5 minuta.

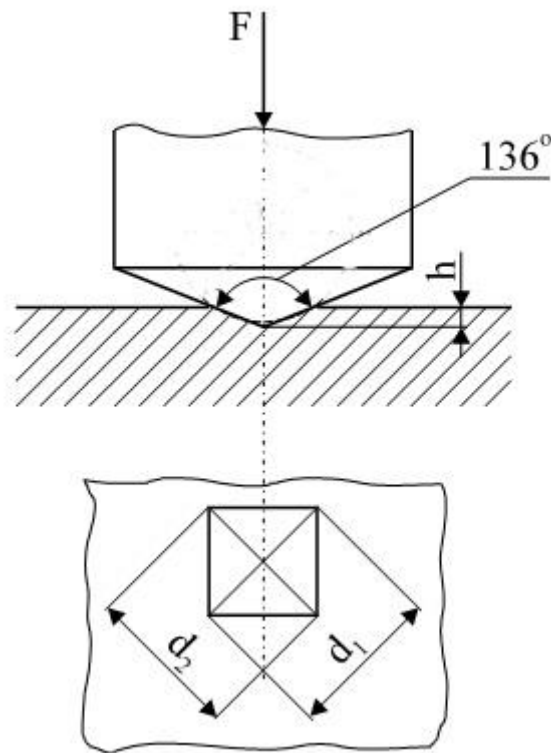
Uzorak je toplinski nagrižen na temperaturi od 1500 °C, u trajanju od 30 min, uz postepeno grijanje i hlađenje. Nakon nagrizanja optičkim mikroskopom mikrostruktura je snimljena i prikazana je na slici 4.5.



Slika 4.5. Mikrostruktura aluminij-oksidne keramike u nagriženom stanju

4.4. Mjerenje mikrotvrdoće

Mjerenje mikrotvrdoće provedeno je u Laboratoriju za ispitavanje mehaničkih svojstava Zavoda za materijale, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, u Zagrebu. Za utvrđivanje mikrotvrdoće koristila se metoda po Vickersu. Određivanje mikrotvrdoće metodom po Vickersu temelji se na mjerenju veličine otiska koji je nastao nakon utiskivanja dijamantnog penetratora određenim opterećenjem na ispoliranu površinu uzorka. Penetrator je istostrana četverostrana piramida s kutem između stranica od 136°, slika 4.8. [13]



Slika 4.8. Metoda po Vickersu [12]

Mjerenje mikrotvrdoće po Vickersu napravljeno je na mikrotvrdomjeru *Indetec*, slika 4.9. Opterećenje pod kojim je izvršeno mjerenje je 1 kg, odnosno 9,807 N. Na uzorku su napravljena tri mjerenja. Iznosi mikrotvrdoćadobili su se prema jednadžbi (1) i (2).

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

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

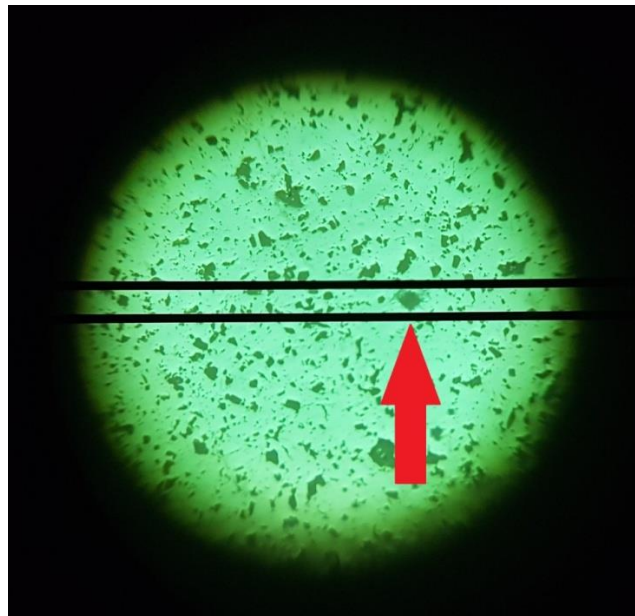
Gdje je:

- HV tvrdoća po Vickersu
- F sila opterećenja
- d aritmetička sredina duljina dijagonala otiska u milimetrima
- d_1 duljina prve dijagonale otiska u milimetrima
- d_2 duljina druge dijagonale otiska u milimetrima.



Slika 4.9. Mikrotvrdomjer *Indetec*

Otisak penetratora prikazan je na slici 4.10.



Slika 4.10. Otisak penetratora na uzroku

Mjerenjem su dobiveni rezultati koji su prikazani u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće

	Mikrotvrdoća HV1
mjerenje 1	1756
mjerenje 2	1896
mjerenje 3	1778
prosječna vrijednost	1810

Prosječna izmjerena mikrotvrdoća iznosi 1810 HV1. Silicijev karbid koji se nalazi na brusnim papirima koji su korišteni za trošenje keramičkih uzoraka ima tvrdoću u rasponu 2600 HV - 3500 HV prema [4].

4.3. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

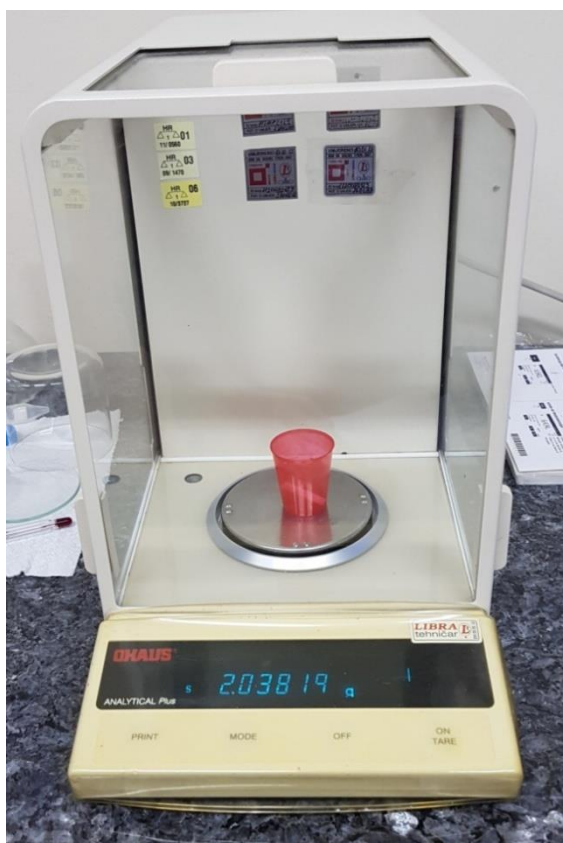
Prije i nakon svakog ciklusa trošenja uzorci su čišćeni u trajanju od 5 do 10 minuta u ultrazvučnoj kupci prikazanoj naslici 4.11. u Laboratoriju za kemijsku analizu metala Zavoda za materijale, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, u Zagrebu. Uzorci su uronjeni u etanol u čašici koja je bila u kupki ispunjenoj destiliranom vodom. Nakon toga uzorci su sušeni usušioniku prikazanom na slici 4.12. u trajanju od desetak minuta. Tako su se uklonile čestice trošenja koje su eventualno ostale naljepljene na uzorke i nečistoće koje su se prije i tijekom ispitivanja pojavile na uzorcima. Budući da aluminijska keramika ima visoku tvrdoću, gubitak mase kod trošenja je mali pa bi takve čestice mogle bitno utjecati na rezultate mjerenja mase.



Slika 4.11. Ultrazvučna kupka

Slika 4.12. Sušionik *Instrumentaria*

Nakon što su očišćeni, keramičkim se uzorcima mjerila masa na mjernom na uređaju *OHAUS Analytical Plus* sa slike 4.13.

Slika 4.13. Mjerni uređaj *OHAUS Analytical Plus*

Na izvaganim i očišćenim uzorcima ispitana je otpornost na abrazijsko trošenje na uređaju *Taber abrader*, prikazanom na slici 4.14. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za tribologiju Zavoda za materijale, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, u Zagrebu. Uzorci su trošeni u ciklusima od 1000 okretaja, uz brzinu vrtnje od 1 okretaj po sekundi. Obodna je brzina bila 0,251 m/s, a duljina trošenja ≈ 250 m. Svi uzorci kod trošenja na uređaju bili su pod istim opterećenjem. Za trošenje su se koristili brusni papiri različitih kvaliteta, odnosno granulacija. Materijal abrazivnih čestica je silicijev karbid - SiC.



Slika 4.14. *Taber abrader*

Za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje korištene su četiri različite kvalitete brusnog papira. Korištene kvalitete i pripadne veličine čestica prikazane su u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Kvalitete korištenih brusnih papira i vrijednosti promjera abrazivnih čestica

Kvalitete papira (ISO/FEPA)	Srednji promjer čestica, μm
P600	25,8
P400	35,0
P320	46,2
P220	68

Na svakom brusnom papiru, odnosno svakoj veličini abrazivnih čestica ispitana su po tri uzorka, a za svaki uzorak korišten je novi brusni papir.

Prosječni gubitak mase za ispitane uzorke na različitim veličinama abrazivnih čestica prikazan je u tablici 4.4.

Tablica 4.4. Gubitak mase za određeni promjer abrazivnih čestica

Srednji promjer abrazivnih čestica, μm	Prosječni gubitak mase Δm_{sr} , mg
25,8	0,09
35,0	0,16
46,2	0,23
68	0,20

Kako bi se dobiveni rezultati mogli uspoređivati s drugim materijalima koji imaju različitu gustoću, gubitak mase treba prevesti u gubitak volumena. Gustoća je određena na mjerачu gustoće *Mettler toledo Jewelry JP* prikazanom na slici 4.15. Mjerenje je rađeno tri puta i uzela se srednja od tri vrijednosti. Gustoća tako iznosi $3,843 \text{ g/cm}^3$. Teorijska gustoća aluminijske oksidne keramike iznosi $3,986 \text{ g/cm}^3$ [14] pa se na temelju ova dva podatka može zaključiti da je poroznost keramičkih uzoraka na kojima je provedeno ispitivanje $3,588 \%$.

Promjena volumena je dobivena preko promjene mase pomoću jednadžbe (3).

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3)$$

Gdje je:

- ρ gustoća
- m masa
- V volumen.



Slika 4.15. Mjerni uređaj *Mettler toledo Jewelry JP*

Pomičnim mjerilom izmjeren je promjer poprečnog presjeka cilindričnih uzoraka. Promjer iznosi 4,98 mm, a površina trošenog presjeka je 19,48 mm².

Intenzitet trošenja izračunat je kao gubitak volumena po površini trošenog poprečnog presjeka. U tablici 4.5. prikazane su vrijednosti prosječnog gubitka volumena i intenziteta trošenja na svim kvalitetama brusnog papira.

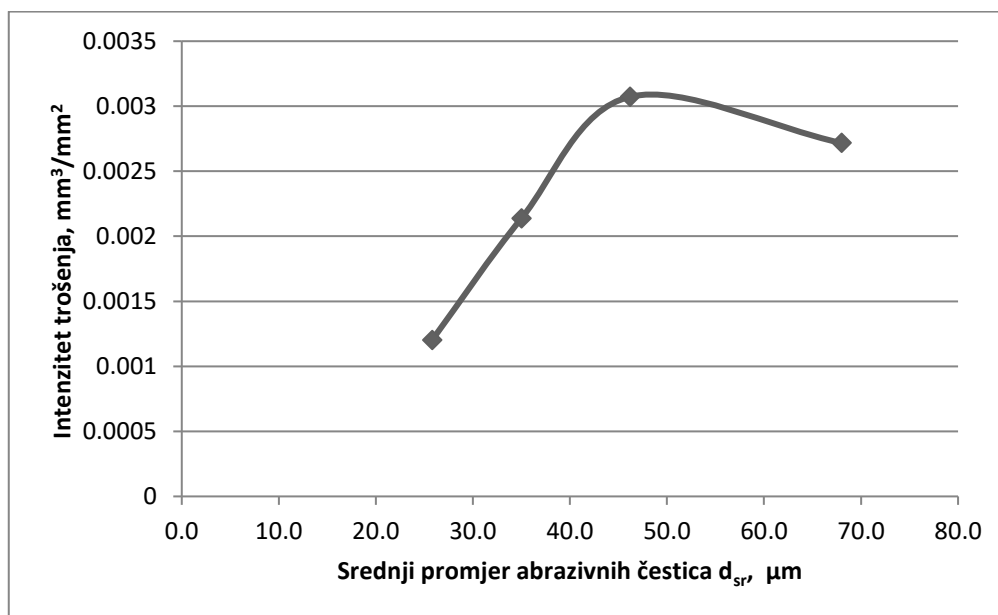
Tablica 4.5. Prosječni gubitak volumena i intenzitet abrazijskog trošenja za sve kvalitete brusnog papira

Srednji promjer abrazivnih čestica d_{sr} , μm	Prosječni gubitak volumena ΔV_{sr} , mm ³	Intenzitet trošenja $\Delta V_{sr}/A$, mm ³ /mm ²
25,8	0,0234	0,0012
35,0	0,0416	0,0021
46,2	0,0598	0,0031
68	0,0529	0,0027

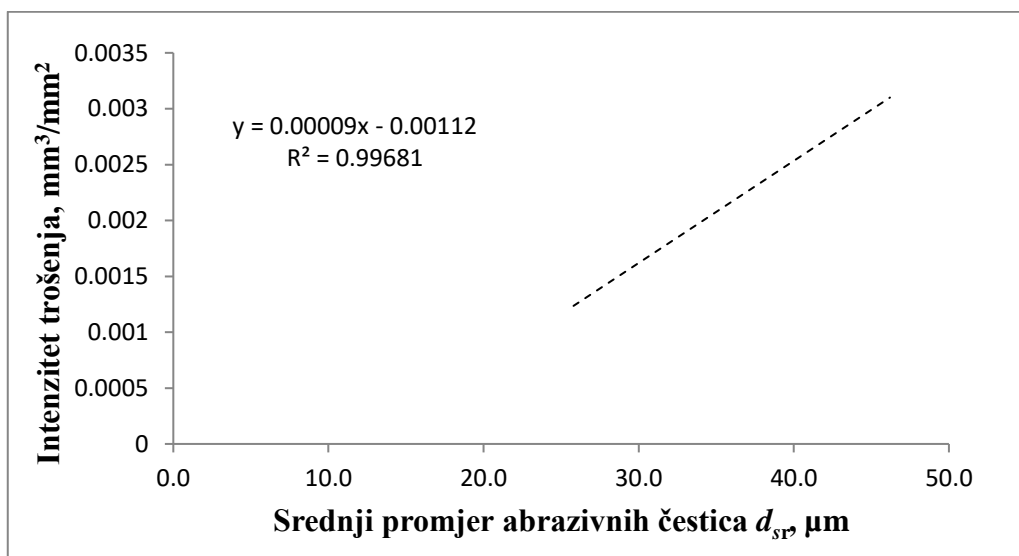
Grafički prikaz ovisnosti intenziteta trošenja o veličini abrazivnih čestica prikazan je na slici 4.16.

Za prve tri kvalitete brusnog papira ovisnost intenziteta trošenja o veličini abrazivnih čestica je linearna, slika 4.17. Što je veći promjer abrazivnih čestica to je i intenzitet trošenja veći. Koeficijent determinacije (R^2) je vrlo visok i iznosi 0,99681, što znači da je snažna korelacija između trošenja i promjera abrazivnih čestica za prva tri brusna papira.

Na zadnjoj kvaliteti brusnog papira, gdje je srednji promjer čestica bio oko 68 μm , intenzitet trošenja nije slijedio dotadašnji trend rasta već je došlo do njegovog pada u odnosu na prethodnu kvalitetu brusnog papira s srednjim promjerom abrazivnih čestica od 46,2 μm . Ovaj fenomen je poznat pod nazivom kritična veličina abrazivnog zrna i izražena je kod mnogih tehničkih materijala.



Slika 4.16. Ovisnost intenziteta trošenja o veličini abrazivnih čestica



Slika 4.17. Linearnost u ovisnosti intenziteta trošenja i promjera abrazivnih čestica

5. ZAKLJUČAK

Na temelju rezultata dobivenih pri ispitivanjima mogu se donijeti sljedeći zaključci:

Prosječna izmjerena mikrotvrdoća aluminijske keramike dobivene hladnim izostatičkim prešanjem i naknadnim sinteriranjem iznosi 1810 HV1.

Izmjerena gustoća iznosi 3,843 g/cm³, a poroznost keramičkih uzoraka na kojima je provedeno ispitivanje iznosi 3,588%.

Intenzitet abrazivnog trošenja linearno se povećava s povećanjem prosječnog promjera abrazivnih zrna sve do kritične veličine abrazivnog zrna.

Povećanjem abrazivnih čestica preko kritične veličine intenzitet abrazivnog trošenja se smanjuje.

Kritična veličina abrazivnog zrna nalazi se između 46,2 μm i 68 μm. Za preciznije utvrđivanje kritične veličine zrna potrebno je uzorke ispitati na više kvaliteta brusnog papira unutar navedenog raspona.

LITERATURA

- [1] Kyocera, <https://global.kyocera.com/prdct/fc/list/material/alumina/alumina.html>, (preuzeto 12.2.2020.)
- [2] Ivušić, V.: Tribologija, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 1998.
- [3] Czichos, H.: "Tribology - a system approach to the science and technology of friction, lubrication and wear", Elsevier, Amsterdam - Oxford - New York, 1978.
- [4] Grilec K., Ivušić V.: Tribologija, autorizirana predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [5] Tylczak, J.H., Oregon, A.: Abrasive wear, ASM Handbook, Vol. 18 – Friction, Lubrication, and Wear Technology, Blau, P.J. (Ed), ASM International (1992), 184-190.
- [6] Coronado, J.J.: „Effect of Abrasive Size on Wear“, Research Group of Fatigue and Surfaces, Mechanical Engineering School, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- [7] Abrasion resistance of Materials,
<https://books.google.hr/books?id=iHCPDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=hr#v=onepage&q&f=false>, (preuzeto 2.1.2020.)
- [8] Filetin, T., Kramer I.: Tehnička keramika - Priručnik za primjenu [prijevod djela Brevier Technische Keramik], Zagreb, 2004.
- [9] Ćurković, L.: Keramika, beton, drvo - podloge za predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [10] Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS,
https://www.ikts.fraunhofer.de/en/departments/structural_ceramics/oxide_ceramics/materials_synthesis_development/medical_applications.html, 15.1.2020.
- [11] http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/keramika_korema92.pdf , (preuzeto 15.1.2020.)
- [12] Substech,
https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=methods_of_shape_forming_ceramic_powers, (preuzeto 5.2.2020.)
- [13] Ivušić V., Franz M., Španiček Đ., Ćurković L., Materijali I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2014.
- [14] R. R. Menezes, R. H. G. A. Kiminami, *Microwave sintering of alumina-zirconia nanocomposites*, Elsevier B.V., (2007)