

# Utjecaj hrapavosti površine na lomnu žilavost SiC tehničke keramike

---

**Hmura, Bruno**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2009**

*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:235:879453>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-06-22**

*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# ZAVRŠNI RAD

UTJECAJ HRAPAVOSTI POVRŠINE NA LOMNU ŽILAVOST  
SiC TEHNIČKE KERAMIKE

*Bruno Hmura*

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# ZAVRŠNI RAD

UTJECAJ HRAPAVOSTI POVRŠINE NA LOMNU ŽILAVOST  
SiC TEHNIČKE KERAMIKE

Voditelj rada:  
*Doc. dr. sc. Vera Rede*

*Bruno Hmura*

Zagreb, 2009.

## Izjava

Izjavljujem da sam ja, Bruno Hmura, izradio samostalno završni rad preddiplomskog studija na temu "Utjecaj hrapavosti površine na lomnu žilavost SiC tehničke keramike" koristeći navedenu literaturu i znanje stečeno tijekom studija.

Pomoć pri izvođenju pokusa i odabiru stručne literature pružili su mi mentorica doc. dr. sc. Vera Rede, prof. dr. sc. Lidija Ćurković, tehnički suradnik Tomislav Habek sa Zavoda za kvalitetu i laborant Roman Divjak. Posebno se zahvaljujem na neizmjernej pomoći laborantici Nadi Vargi iz laboratorija za metalografiju.

---

Bruno Hmura

# Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. TEHNIČKA KERAMIKA .....	2
2.1 Podjela tehničke keramike .....	2
2.1.1 Neoksidna keramika .....	3
2.2 Izrada proizvoda od tehničkih keramika .....	3
2.2.1 Načini proizvodnje SiC keramike .....	4
2.3 Svojstva tehničke keramike .....	5
2.3.1 Općenito .....	5
2.3.2 Gustoća tehničke keramike .....	6
2.3.3 Čvrstoća tehničke keramike .....	7
2.3.4 Elastična svojstva .....	9
2.3.5 Tvrdća .....	10
2.3.6 Lomna žilavost silicij karbidne keramike ( $K_{IC}$ ) .....	11
2.3.7 Toplinska svojstva tehničke keramike .....	13
2.3.8 Svojstva CVD SiC keramike .....	14
2.4 Primjena tehničke keramike i CVD SiC keramike .....	15
3. POVRŠINSKA HRAPAVOST .....	17
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	19
4.1 Priprema uzorka SiC keramike za određivanje tvrdoće i lomne žilavosti .....	20
4.2 Mjerenje hrapavosti .....	25
4.3 Mjerenje tvrdoće i lomne žilavosti .....	25
5. REZULTATI ISPITIVANJA .....	27
5.1 Rezultati mjerenja hrapavosti .....	27
5.2 Rezultati mjerenja tvrdoće i lomne žilavosti.....	29

6. ANALIZA REZULTATA .....	35
7. ZAKLJUČAK .....	37
8. PRILOG .....	38
8.1 Prilog 1 .....	38
8.2 Prilog 2 .....	42
8.3 Prilog 3 .....	47
9. POPIS LITERATURE .....	52

## Sažetak

U radu je određen utjecaj hrapavosti površine na tvrdoću i lomnu žilavost CVD SiC keramike. Pri određivanju lomne žilavosti i tvrdoće po Vickersu primijenjena su opterećenja od 9,81 N, 29,43 N i 49,05 N (HV1, HV3, HV5).

Lomna žilavost ( $K_{IC}$ ) određena je mjerenjem duljina pukotina koje nastaju iz vrhova otisaka kada se četverostrana dijamantna piramida utiskuje na ispoliranu površinu uzorka CVD silicij karbida. Za određivanje lomne žilavosti ( $K_{IC}$ ) korišten je matematički model po Anstisu.

Tvrdoće i lomne žilavosti utvrđivale su se na tri različite hrapavosti površina. Različite hrapavosti ispitivane površine dobivene su završnim poliranjem dijamantnom pastom s česticama od 0,25, 3 i 6  $\mu\text{m}$ .

Rezultati su pokazali da hrapavost površine neznatno utječe na promjenu tvrdoće, ali znatno utječe na promjenu lomne žilavosti. Smanjenjem površinske hrapavosti CVD SiC keramike smanjuje se lomna žilavost.

Također je utvrđeno da porastom sile utiskivanja vrijednosti tvrdoće padaju, a smanjuje se i lomna žilavost.

## Popis oznaka i mjernih jedinica

$R_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	srednje aritmetičko odstupanje profila
$\nu$	-	Poissonov omjer
G	[N/mm <sup>2</sup> ]	modul smičnosti, [N/mm <sup>2</sup> ]
HV	-	tvrdoća po Vickersu
F	[N]	primijenjena sila
d	[mm]	srednja vrijednost dijagonala baze piramide
$K_{IC}$	[MPa · $\sqrt{\text{m}}$ ]	lomna žilavost
c	[m]	duljina pukotine od centra otiska do vrha pukotine
E	[GPa]	Youngov modul elastičnosti
H	[GPa]	tvrdoća po Vickersu



## Popis slika

Slika 1. Prikaz proizvoda od oksidne i neoksidne keramike, [2] .....	4
Slika 2. Privlačne sile u ovisnosti o razmaku između atoma za tipičnu keramiku i metal, [3] .....	5
Slika 3. Usporedba gustoće nekih vrsta metala i keramike .....	7
Slika 4. Prikaz razdiobe srednje vrijednosti čvrstoće keramike i metala, [4] .....	7
Slika 5. Usporedba savojne čvrstoće super legura i vruće prešane silicij – karbidne keramike (HPSiC) .....	8
Slika 6. Utjecaj temperature na savojnu čvrstoću keramike i metala, [4] .....	8
Slika 7. Shematski prikaz utjecaja opterećenja na tvrdoću, [5] .....	10
Slika 8. Shematski prikaz Vickersovog penetratora i mogućih izgleda otisaka nakon rasterećenja, [8] .....	11
Slika 9. Prikaz izgleda Palmqvist pukotine, [11,12] .....	13
Slika 10. Prikaz izgleda Medijan pukotine [11,12] .....	13
Slika 11. Određivanje maksimalne visine profila Rz, [14] .....	17
Slika 12. Određivanje srednje linije hrapavosti oblika, [15] .....	18
Slika 13. Određivanje srednjeg aritmetičkog odstupanja mjenog profila Ra, [15] .....	19
Slika 14. Izgled uzorka nakon zalijevanja .....	20
Slika 15. Uređaj za brušenje i poliranje keramike .....	21
Slika 16. Prikaz površine nakon: a) 1. faze brušenja i b) 2. faze brušenja .....	22
Slika 17. Prikaz površine nakon: a) 3. faze brušenja i b) 4. faze brušenja .....	22
Slika 18. Prikaz površine nakon 5. faze brušenja .....	23
Slika 19. Prikaz površine nakon: a) 1. stupnja poliranja i b) 2. stupnja poliranja ....	24
Slika 20. Prikaz površine nakon 3. stupnja poliranja .....	24
Slika 21. Elektromehanički uređaj za ispitivanje hrapavosti površine MU2-127 .....	25
Slika 25. Tvrdomjer Zwick .....	26

Slika 26. Dijagramski prikaz izmjerene hrapavosti površine nakon poliranja dijamantnom pastom .....	27
Slika 27. Prikaz dobivenih rezultata mjerenja hrapavosti površine .....	28
Slika 28. Prikaz otiska i pukotina nastalih pri mjerenju tvrdoće HV5 za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 0,25 $\mu\text{m}$ .....	29
Slika 29. Ovisnost tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 0,25 $\mu\text{m}$ .....	30
Slika 30. Ovisnost lomne žilavosti o promjeni opterećenja za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 0,25 $\mu\text{m}$ .....	30
Slika 31. Prikaz otiska i pukotina nastalih pri mjerenju tvrdoće HV3 za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 3 $\mu\text{m}$ .....	31
Slika 32. Ovisnost tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 3 $\mu\text{m}$ .....	32
Slika 33. Ovisnost lomne žilavosti o promjeni opterećenja za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 3 $\mu\text{m}$ .....	32
Slika 34. Prikaz otiska i pukotina nastalih pri mjerenju tvrdoće HV5 za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 6 $\mu\text{m}$ .....	33
Slika 35. Ovisnost tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 6 $\mu\text{m}$ .....	34
Slika 36. Ovisnost lomne žilavosti o promjeni opterećenja za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 6 $\mu\text{m}$ .....	34
Slika 37. Dijagramski prikaz ovisnosti tvrdoće o sili utisnuća i hrapavosti .....	35
Slika 38. Dijagramski prikaz ovisnosti lomne žilavosti $K_{IC}$ o sili utisnuća i hrapavosti .....	36

## Popis tablica

Tablica 1. Primjena tehničke keramike ovisno o zahtijevanim svojstvima, [1] .....	15
Tablica 2. Svojstva ispitivane CVD SiC keramike [16] .....	19
Tablica 3. Parametri brušenja .....	21
Tablica 4. Parametri poliranja .....	23
Tablica 5. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća i izračunate lomne žilavosti $K_{IC}$ za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 0,25 $\mu\text{m}$ .....	29
Tablica 6. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća i izračunate lomne žilavosti $K_{IC}$ za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 3 $\mu\text{m}$ .....	31
Tablica 7. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća i izračunate lomne žilavosti $K_{IC}$ za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 6 $\mu\text{m}$ .....	33
Tablica 8. Prosječne vrijednosti tvrdoća i lomnih žilavosti za hrapavost površine nakon završnih poliranja dijamantnom pastom veličine čestica 0,25 $\mu\text{m}$ , 3 $\mu\text{m}$ i 6 $\mu\text{m}$ .....	35
Tablica 9. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 9,81 N (HV1), za površinu završno poliranu s česticama 0,25 $\mu\text{m}$ .....	38
Tablica 10. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 29,43 N (HV3), za površinu završno poliranu s česticama 0,25 $\mu\text{m}$ ..	39
Tablica 11. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 49,05 N (HV5), za površinu završno poliranu s česticama 0,25 $\mu\text{m}$ .....	41
Tablica 12. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 9,81 N (HV1), za površinu završno poliranu s česticama od 3 $\mu\text{m}$ .....	42
Tablica 13. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 29,43 N (HV3), za površinu završno poliranu s česticama od 3 $\mu\text{m}$ .....	44
Tablica 14. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 49,05 N (HV5), za površinu završno poliranu s česticama od 3 $\mu\text{m}$ .....	45
Tablica 15. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 9,81 N (HV1), za površinu završno poliranu s česticama od 6 $\mu\text{m}$ .....	47

Tablica 16. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 23,43 N (HV3), za površinu završno poliranu s česticama od 6 $\mu\text{m}$ .....	48
Tablica 17. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 49,05 N (HV5), za površinu završno poliranu s česticama od 6 $\mu\text{m}$ .....	50

# 1. UVOD

Keramika dolazi od grčke riječi **κεραμος** (keramos) koja označava glinu za lončarske predmete. Keramički materijali su kompleksni kemijski spojevi koji sadržavaju metalne i nemetalne elemente. To su tvrdi i krhki materijali s malom žilavosti i duktilnosti. Zbog odsutnosti vodljivih elektrona dobri su električni i toplinski izolatori. Imaju visoko talište i veliku kemijsku postojanost na mnoge agresivne medije zbog stabilnosti svojih jakih veza. Keramika ima negativan predznak temperaturnog koeficijenta električne otpornosti što je glavni pokazatelj granice između metala i keramike.

Tehnička keramika obuhvaća keramičke materijale i proizvode namijenjene za tehničku primjenu. Najčešće se upotrebljava u elektrotehničkoj industriji, no česta joj je primjena i u automobilskoj industriji zbog dimenzijske postojanosti na visokim temperaturama, potom u metalurgiji, te zavarivačkoj i toplinskoj tehnici. Zahvaljujući njenoj velikoj tvrdoći moguće ju je primijeniti za obradu čelika i drugih materijala. Zbog svoje velike tvrdoće i otpornosti na trošenje gotovo je savršen materijal za strojne dijelove i industrijska postrojenja gdje se javlja veliko trenje.

Lomna žilavost tehničke keramike određuje se mjerenjem duljina pukotina koje nastaju utiskivanjem penetratora pri određivanju tvrdoće. Uzimaju se jedino duljine pukotina koje izlaze iz vrhova otiska penetratora. Odnos duljine pukotine i lomne žilavosti je obrnuto proporcionalan što znači da se sa povećanjem duljine pukotine smanjuje lomna žilavost ispitivanog uzorka. Na žilavost keramike utječe promjena primijenjenog opterećenja i hrapavost površine.

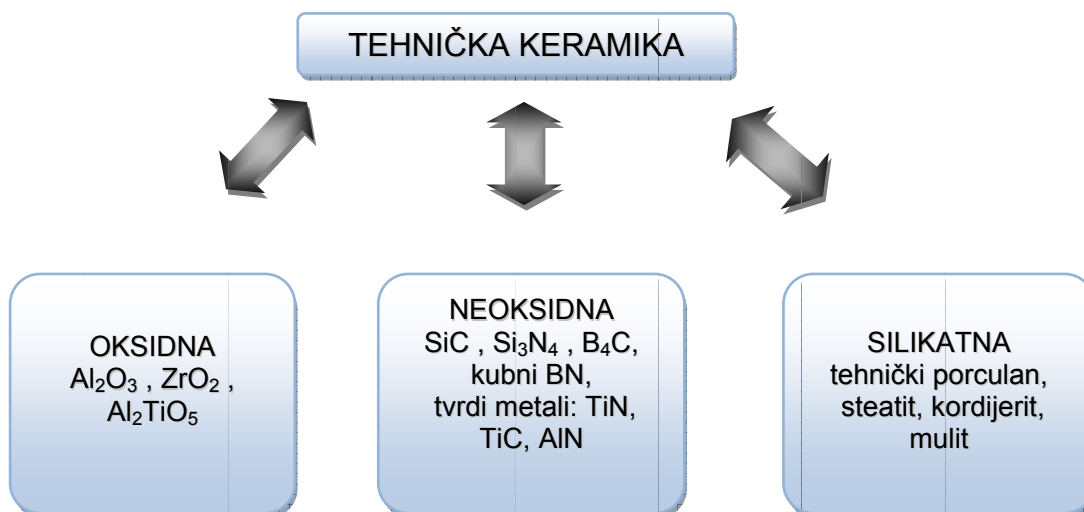
Osnovna pretpostavka ovog rada je da hrapavost površine ima veliki utjecaj na vrijednosti tvrdoće i lomne žilavosti.

Rezultati i spoznaje dobiveni tijekom istraživanja trebali bi doprinijeti boljem razumijevanju veze između hrapavosti površine i tvrdoće te lomne žilavosti CVD SiC tehničke keramike.

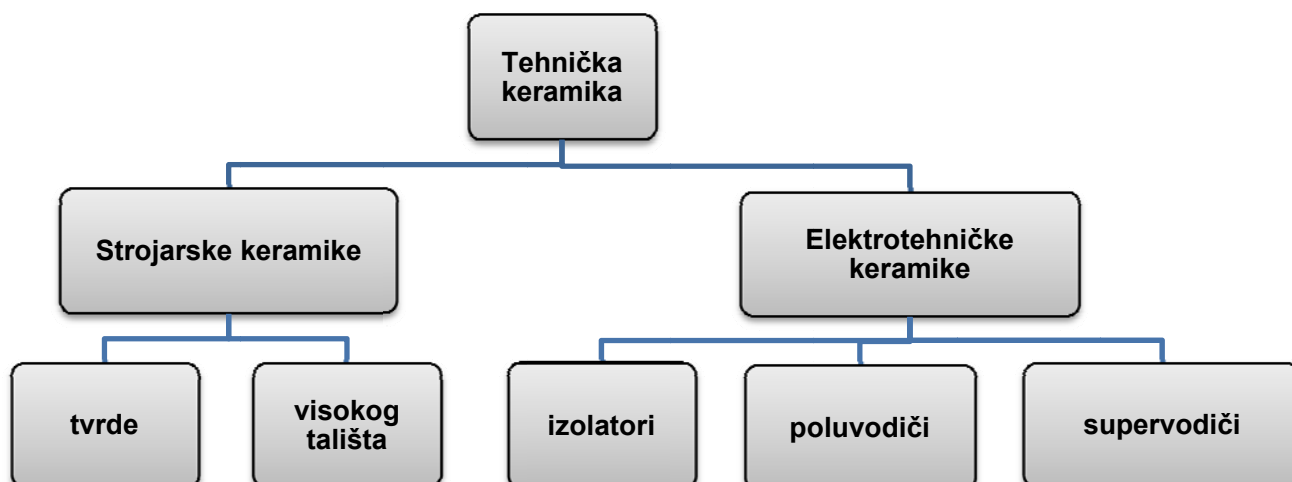
## 2. TEHNIČKA KERAMIKA

### 2.1 Podjela tehničke keramike

a) Podjela tehničke keramike prema sastavu:



b) Podjela tehničke keramike prema upotrebi:



Strojarske tehničke keramike su pretežno čisti spojevi (izuzetak je elementarni ugljik) s pretežno dva elementa a to su oksidi ili karbidi i nitridi.

### 2.1.1 Neoksidna keramika

Proizvodi se isključivo od sintetičkih sirovina. Za izvanredne kombinacije svojstava zaslužni su visoki udjeli kovalentnih veza u karbidnim i nitridnim kristalnim strukturama.

Postupak dobivanja gotovog dijela od sintetičkog sirovinskog praha nešto je skuplji nego kod oksidne keramike. Prilikom proizvodnje sirovina mora biti izuzetno fino mljevena, proces izgaranja zahtjeva atmosferu bez kisika, vakuum ili inertni plin u hermetički zatvorenim komorama, kao i temperature izgaranja od preko 2000 °C.

Najvažniji predstavnici neoksidne keramike jesu: silicij karbid (SiC), silicij nitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), aluminij nitrid (AlN), bor-karbid ( $\text{B}_4\text{C}_3$ ) i dr.

### 2.2 Izrada proizvoda od tehničkih keramika

Osnovna sirovina za proizvodnju tehničkih keramika je prah koji se dobiva:

- a) mehaničkim usitnjavanjem,
- b) kemijskom redukcijom ili,
- c) elektrolitičkim taloženjem.

Postupak proizvodnje dijelova od neoksidne keramike skuplji je nego od oksidne keramike. Sirovina mora biti izuzetno fino mljevena, proces izgaranja zahtjeva atmosferu bez kisika, vakuum ili inertni plin u hermetički zatvorenim komorama i temperature preko 2000 °C.

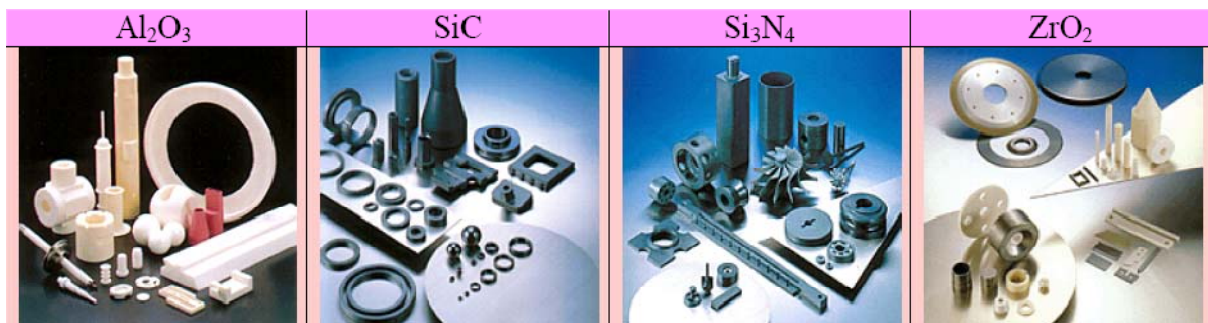
Keramički proizvodi izrađuju se od praha u četiri koraka, [1]:

1. priprava sirovine za oblikovanje:
  - određivanje sastava,
  - mljevenje,
  - miješanje i priprema samljevenog praha,
  - granuliranje,
  - spajanje pomoću veziva,
  - sušenje raspršivanjem.
2. oblikovanje poluproizvoda:
  - rotacijsko oblikovanje za simetrične dijelove,
  - isprešavanje profila, cijevi i šipki,
  - suho prešanje,
  - mokro prešanje,
  - izostatičko prešanje,
  - injekcijsko prešanje – za velik broj sitnih dijelova složenog oblika,
  - lijevanje u formu – za pojedinačne volumno šuplje oblike.
3. pečenje/sinteriranje – najvažnija operacija u proizvodnji keramičkih izradaka:
  - sinteriranje u različitim atmosferama,
  - reakcijsko sinteriranje,
  - sinteriranje uz vruće prešanje,
  - sinteriranje uz vruće izostatičko prešanje.

## 4. završna obrada:

- brušenje dijamantnim alatima,
- lepanje,
- honanje,
- poliranje,
- elektroerozija,
- lasersko rezanje i obrada.

Keramički proizvodi se u pravilu izrađuju kao jednodijelni budući da postoji problem sklapanja višedijelnih. Neki od keramičkih proizvoda prikazani su na slici 1.



Slika 1. Prikaz proizvoda od oksidne i neoksidne keramike, [2]

### 2.2.1 Načini proizvodnje SiC keramike

SiC keramika se može proizvesti na različite načine poput vrućeg prešanja, reakcijskog prešanja i sinteriranja. Najbolja svojstva ima ako se proizvodi CVD postupkom.

#### Vruće prešani SiC i sinterirani SiC

Vruće prešani SiC i sinterirani SiC spadaju pod dva jeftinija postupka proizvodnje silicij karbida. Dobivaju se sličnim proizvodnim postupcima i imaju slične karakteristike. No nedostaci ovako proizvedenog silicij karbida su velike dimenzijske promjene koje nastaju između hladnog i užarenog stanja, kao i relativno hrapava i porozna vanjska površina krajnjeg proizvoda. Pošto se silicij karbidna keramika uglavnom koristi za proizvodnju poluvodičkih dijelova, nedostatak ove keramike za tu primjenu čine dodatci keramici koji se koriste kod vrućeg prešanja i sinteriranja SiC keramike i koji su kemijski reaktivni što rezultira korozijom, oksidacijom i kemijskom erozijom, a što može dovesti do komplikacija u poluvodičkoj proizvodnji dijelova.

#### Reakcijski povezan SiC

Reakcijski povezan SiC ima relativno nisku gustoću ( $3,00-3,15 \text{ g/cm}^3$ ) i visoku količinu organskih nečistoća. Također reakcijski povezan SiC ima sklonost stvaranja lužnatih elemenata. Ovaj materijal je jako kemijski reaktivan i ne primjenjuje se u poluvodičkoj industriji.



## CVD SiC

Kao što je prikazano u tablici 2, SiC proizveden CVD postupkom ima bolja svojstva i veću dugotrajnost u iznimno agresivnim okolinama u odnosu na ostale tipove proizvodnje SiC. CVD SiC keramika proizvodi se tako da se dio izrađen iz visoko čistog grafita naknadno prevlači slojem CVD silicij karbida. Ipak vijek trajanja SiC prevučeni grafitnih komponenti je ograničen razaranjem SiC prevlake što rezultira nastankom mikropukotina u materijalu i kasnije brzim razaranjem grafita ispod sloja SiC.

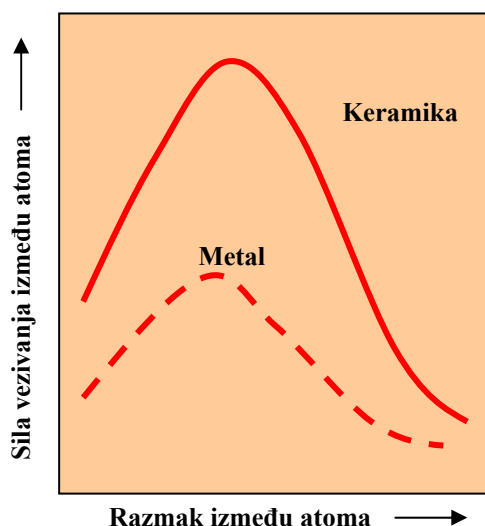
## 2.3 Svojstva tehničke keramike

### 2.3.1 Općenito

Zbog svojih ionskih i kovalentnih veza keramika je tvrda, krhka, ima visoku temperaturu taljenja, nisku električnu i toplinsku vodljivost, dobru toplinsku i kemijsku stabilnost i visoku tlačnu čvrstoću.

Iako je keramika lomljiva i krhka, postoje neki keramički kompozitni materijali kao primjerice **SiC**, čijim će se ispitivanjem i mehaničkim svojstvima ovaj rad baviti, koji postižu veće vrijednosti lomne žilavosti od nekih metala kao primjerice starenjem očvrstnute aluminijske legure. Ovaj keramički kompozitni materijal za razliku od mnogih keramika koji su dobri električni i toplinski izolatori ima vrijednosti toplinske vodljivosti blizu metala.

Između različitih atoma u keramici vladaju različite ionske i kovalentne veze sa vrlo snažnim privlačnim silama između atoma. Jakost privlačnih sila u ovisnosti o razmaku između atoma kod keramike i metala prikazuje slika 2.



Slika 2. Privlačne sile u ovisnosti o razmaku između atoma za tipičnu keramiku i metal, [3]

Da bi se u keramici atomi odvojili jedan od drugoga s mehaničkom ili kemijskom energijom potrebne su mnogo veće sile nego kod metala. Uspoređujući sa metalom

keramika zahtjeva značajno veće sile da bi se promijenio razmak između atoma u kristalnoj strukturi što znatno utječe na svojstva keramike. Upravo zbog snažnih privlačnih sila strani atomi teško mogu poremetiti veze unutar keramike i zbog toga je keramika jako stabilna. Keramika se također zbog ovog razloga mnogo manje elastično deformira, što pak uzrokuje da keramika ima veliku tvrdoću, malo lomno produljenje i veliki modul elastičnosti, [3].

Keramika ima visoku temperaturu taljenja jer su potrebne visoke temperature da bi se atomi potpuno razdvojili jedan od drugoga. Keramika se pri zagrijavanju manje širi nego metali zato što je pri porastu temperature utjecaj unutarnjih vibracija atoma na njihov razmak manji kod keramike nego kod metala. Budući da keramika često ima kombinaciju ionskih i kovalentnih veza kod kojih su elektroni vrlo snažno povezani sa svojim susjednim atomima ona ne vodi elektricitet i uvrštava se pod dobre električne izolatore. Zbog slabog kretanja elektrona ona je također i toplinski izolator. Kristalna struktura keramike je relativno komplicirana uspoređujući je s metalima, što uzrokuje da su kemijske reakcije kod keramike spore.

Prednosti tehničke keramike nad metalnim materijalima su, [1]:

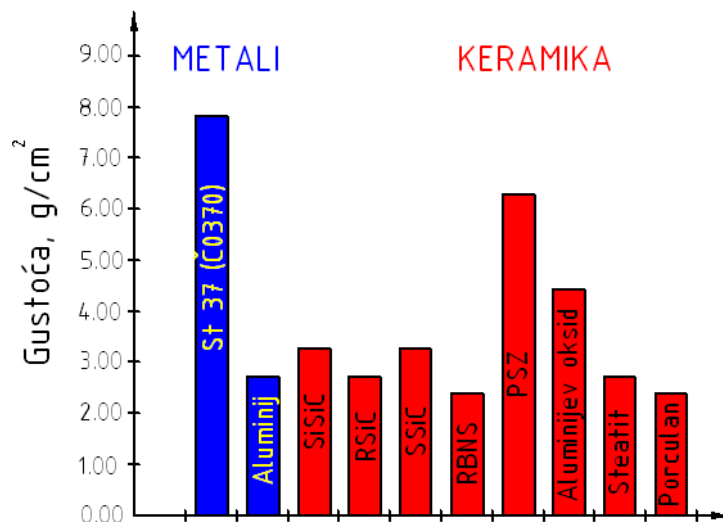
- viša tvrdoća, posebno na povišenim temperaturama,
- viša pritiska i savojna čvrstoća, posebno na povišenim temperaturama,
- bolja otpornost puzanju,
- viši modul elastičnosti – viša krutost,
- niža toplinska i električna provodnost – bolja izolacijska svojstva,
- visoka otpornost trošenju,
- visoka kemijska postojanost prema različitim medijima,
- niska gustoća,
- niža toplinska rastezljivost,
- dugoročnija, sigurna opskrba sirovinama.

Nedostatci tehničke keramike su, [1]:

- mala žilavost – visoka krhkost,
- niska otpornost toplinskom umoru,
- niska vlačna čvrstoća,
- velika rasipanja vrijednosti za svojstva,
- veliki troškovi sirovina i postupaka oblikovanja.

### 2.3.2 Gustoća tehničke keramike

Gustoća tehničke keramike iznosi 20 do 70% gustoće čelika. Ovo pak znači da bi se primjenom tehničke keramike u konstrukcijske svrhe moglo postići veliko smanjenje mase pri izradi pokretnih dijelova u strojarstvu. Smanjenjem gustoće materijala također smanjujemo i mehanička opterećenja što nam izravno poboljšava mehanička svojstva konstrukcije. Usporedba gustoće nekih vrsta metala i keramike prikazana je slikom 3.



Slika 3. Usporedba gustoće nekih vrsta metala i keramike

Gdje je:

SiSiC = silicijev karbid sa slobodnim Si,

RSiC = rekristalizirani silicijev karbid,

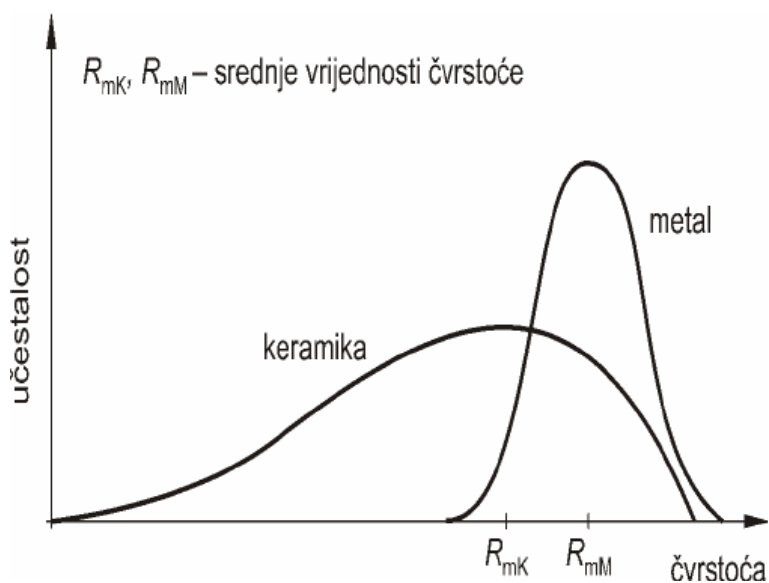
SSiC = silicijev karbid sinteriran bez praha,

RBNS = reakcijski spojen silicijev – nitrid,

PSZ = djelomično stabiliziran cirkonijev oksid sa MgO, CaO ili Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

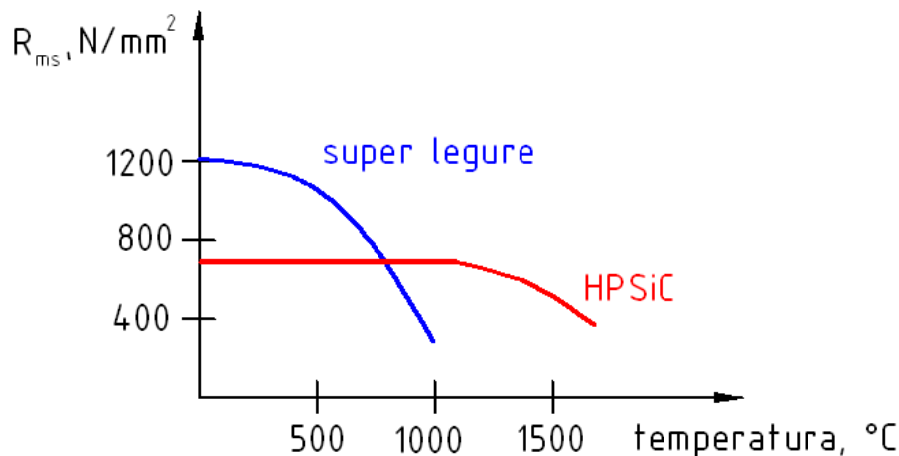
### 2.3.3 Čvrstoća tehničke keramike

Čvrstoća je jako ovisna o sastavu materijala, veličini zrna sirovine i dodatnih materijala, te o uvjetima i postupcima proizvodnje. Čvrstoća je znatno slabija od većine metala no neki keramički materijali ipak mogu pri zahtjevu na čvrstoću zamijeniti metalne dijelove. Na slici 4, prikazan je dijagram koji prikazuje odnos srednje vrijednosti čvrstoće za keramičke i metalne materijale.



Slika 4. Prikaz razdiobe srednje vrijednosti čvrstoće keramike i metala, [4]

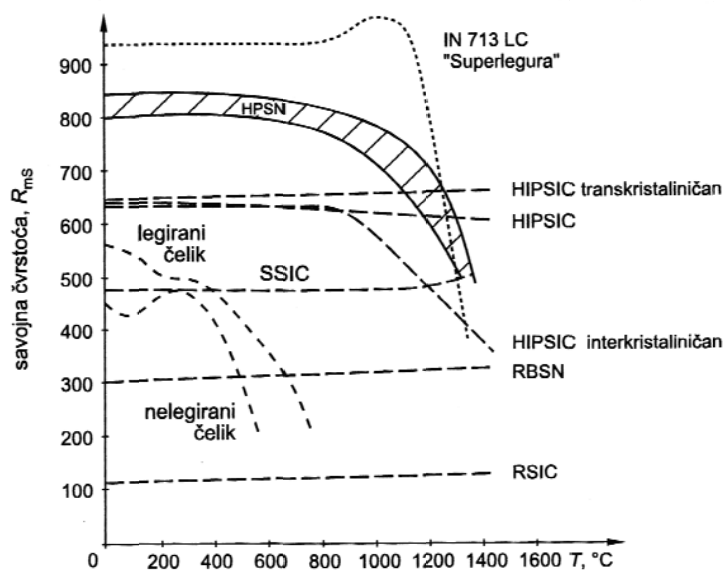
Savojna čvrstoća pri visokim radnim temperaturama nadmašuje čvrstoću metalnih super legura. Usporedba savojne čvrstoće na povišenim temperaturama za super leguru i vruće prešanu silicij - karbidnu keramiku vidljiva je na slici 5.



Slika 5. Usporedba savojne čvrstoće super legure i vruće prešane silicij – karbidne keramike (HPSiC)

Savojna čvrstoća najvažnija je veličina za procjenu čvrstoće. Vrijednost savojne čvrstoće ovisna je o veličini proizvoda, obliku, kvaliteti površine (brušena, polirana), te o nehomogenosti strukture koja je određena postupkom proizvodnje.

Najvažnija prednost tehničke keramike nad super legurama je njezina vrlo visoka čvrstoća pri visokim radnim temperaturama. Slika 6, prikazuje utjecaj temperature na savojnu čvrstoću keramike i metala.



Slika 6. Utjecaj temperature na savojnu čvrstoću keramike i metala, [4]

Gdje je:

HIPSiC = vruće izostatčki prešan silicijev karbid,  
RBSN = reakcijski spojen silicijev nitrid,  
SSiC = silicijev karbid sinteriran bez tlaka,  
RSiC = rekristalizirani silicijev karbid,  
IN 713LC = super legura bazirana na niklu.

Tlačna čvrstoća keramike 5 do 10 puta veća je od savojne. Vlačna čvrstoća je niska, do 20 puta manja od savojne.

### 2.3.4 Elastična svojstva

Elastična svojstva keramike određuje, [4]:

- Modul elastičnosti,
- Poprečna kontrakcija,
- Modul smičnosti,
- Rast pukotina,
- Puzanje.

Modul elastičnosti kod gotovo svih materijala oksidne i neoksidne keramike veći je nego kod čelika.

Poprečna kontrakcija ( $\nu$ ), odnosno Poissonov omjer prikazuje omjer (negativne) poprečne deformacije,  $\epsilon_2$ , prema istezanju,  $\epsilon_1$ . Vrijednosti Poissonova omjera za keramiku su  $\nu \approx 0,18 - 0,3$ .

Modul smičnosti ( $G$ ) je specifična deformacija pri čistom smiku i djelovanju tlaka sa svih strana a prikazuje se formulom:

$$G = \tau/\gamma \quad (2.1)$$

Gdje je:

$\tau$  = smično naprezanje,  
 $\gamma$  = kut smika.

Kod keramike modul smičnosti iznosi oko 1/3 modula elastičnosti

Rast pukotina važan je problem strojno opterećene keramike. Ukoliko je dio opterećen naprezanju ispod svoje čvrstoće i izložen vodi ili vlažnoj okolini može doći do sporog no pri povećanju naprezanja i vrlo brzog širenja pukotine što će na kraju rezultirati lomom. Ovaj podkritičan rast pukotine koji je poznatiji pod nazivom napetosna korozija nastupa kod neoksidne keramike koja ima amorfnu oksidnu fazu na granicama zrna.

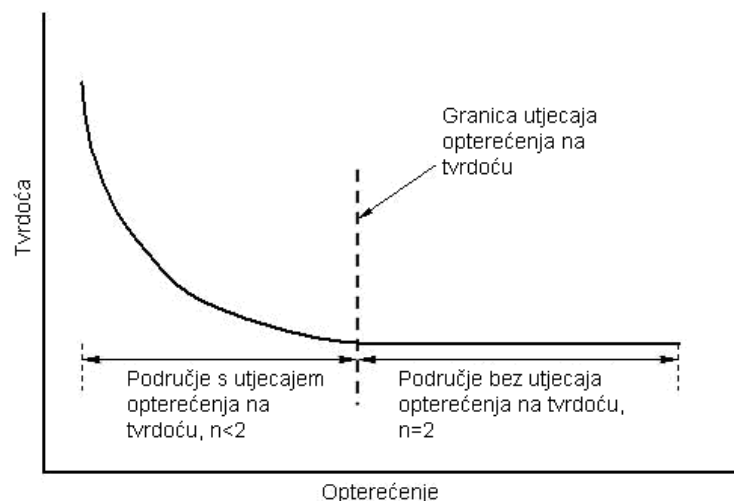
Puzanje keramičkih materijala je malo pri temperaturama nižim od 1000 °C. No do problema može doći pri temperaturama većim od 1000 °C zato što kod keramike za razliku od metalnih materijala deformacije od nekoliko postotaka nastale zbog puzanja mogu uzrokovati otkazivanje funkcije materijala. Bitno je napomenuti da se

pukotine u keramici homogeno raspoređuju i uzrokuju oštećenja po čitavom opterećenom volumenu. Na puzanje keramičkih materijala utječu kemijske veze, veličina zrna, oblik zrna, poroznost, granice zrna.

### 2.3.5 Tvrdoća

Tvrdoća je pokazatelj otpornosti na deformiranje. Keramički dijelovi imaju veliku tvrdoću što uvjetuje veliku krutost i stabilnost oblika. Visoka tvrdoća tehničke keramike vodi k boljoj otpornosti na trošenje. No zbog povišene tvrdoće keramika ima problem slabe mogućnosti plastične deformacije i razgradnje koncentracije naprezanja što uvjetuje da dio često puca iznenadno.

Tvrdoća ovisi o opterećenju. Kod nekih materijala tvrdoća se smanjuje porastom opterećenja (normalan utjecaj opterećenja na tvrdoću), dok kod nekih materijala tvrdoća se povećava sa opterećenjem (obrnuti utjecaj opterećenja na tvrdoću). Utjecaj opterećenja na tvrdoću shematski je prikazan na slici 7.



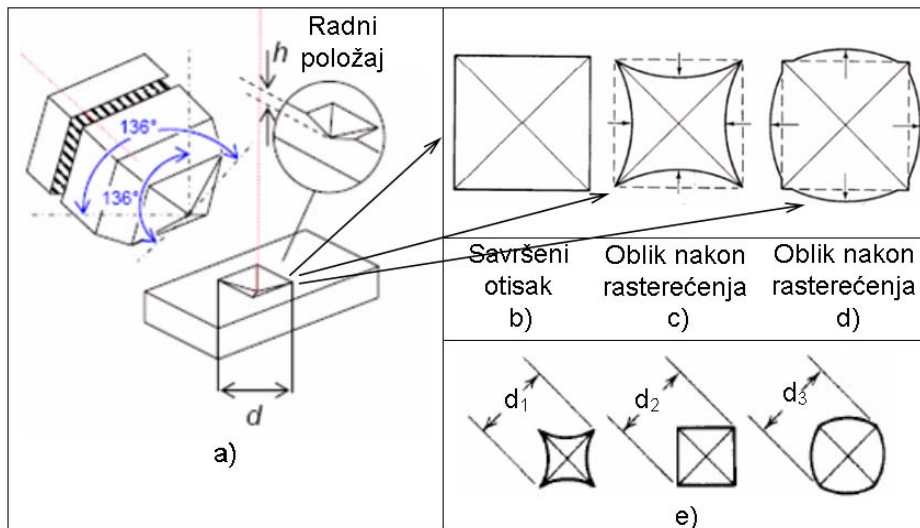
Slika 7. Shematski prikaz utjecaja opterećenja na tvrdoću, [5]

Iz shematskog prikaza može se zaključiti da porastom opterećenja tvrdoća tehničke neoksidne keramike opada. Postoji nekoliko objašnjenja o porijeklu utjecaja opterećenja na tvrdoću, a najčešće se ova pojava tumači kao [6,7]:

- pogreška koja proizlazi iz omjera elastične i plastične deformacije tijekom formiranja otiska,
- kočenje gibanja dislokacija, granice zrna, kao i elastičnih pomaka nakon rasterećenja,
- otvrdnjavanje tijekom utiskivanja,
- optička rezolucija leća objektiva koje se koriste,
- pojava zaostalih napetosti na površini uzorka nastalih uslijed brušenja i poliranja površine uzorka prije mjerenja tvrdoće.

Za određivanje tvrdoće keramičkih materijala koristi se najčešće metoda po Vickersu ili Knoopu. Određivanje tvrdoće 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 kutom između stranica od 136°. Utiskivanjem penetratora u materijalu ostaje otisak oblika piramide što je prikazano slikom 8.



Slika 8. Shematski prikaz Vickersovog penetratora i mogućih izgleda otisaka nakon rasterećenja, [8]

Otisak kojeg ostavi Vickersova piramida nije uvijek savršenog oblika (slika 8 a), već dolazi do iskrivljenja uslijed elastičnog efekta. Na slici 8 c), prikazan je oblik otiska nakon rasterećenja koji se deformirao uslijed elastičnog povrata materijala oko ravnih površina penetratora, odnosno došlo je do smanjivanja (skupljanja) površine otiska, a na slici 8 d), vidi se deformacija otiska uslijed proširenja površina odnosno povećanja površine otiska oko ravnih površina penetratora. Utjecaj elastične deformacije na veličinu otiska prikazuje slika 8 e), na kojoj su shematski prikazana tri otiska jednakih dijagonala, ali različitih površina ( $d_1 = d_2 = d_3$ ;  $A_1 < A_2 < A_3$ ).

Pomoću mjernog mikroskopa mjere se dijagonale ( $d_1$  i  $d_2$ ) baze piramide otisnute u materijalu, a tvrdoća se određuje iz jednadžbe:

$$HV = \frac{F \cdot 0,188}{d^2} \quad (2.2)$$

Gdje je:

F - primijenjena sila u njutnima (N)

d - srednja vrijednost dijagonala baze piramide u mm,  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$

### 2.3.6 Lomna žilavost silicij karbidne keramike ( $K_{IC}$ )

Lomna žilavost silicij karbidne keramike izračunava se iz vrijednosti duljina pukotina koje su nastale utiskivanjem penetratora pri određivanju tvrdoće. Za izračun se uzimaju jedino vrijednosti pukotina koje izlaze iz vrhova piramide nastale

utiskivanjem penetratora u materijal. Duljine pukotina koje nastaju iz vrhova otisaka kada se Vickersov penetrator utiskuje na ravnu ispoliranu ili brušenu površinu obrnuto su proporcionalne sa vrijednostima žilavosti materijala. Nakon što se izmjere duljine pukotina lomnu žilavost ( $K_{IC}$ ) moguće je utvrditi računskim putem.

Metoda za određivanje lomne žilavosti ima mnogo ali se uobičajeno koriste [8]:

- Metoda po Anstisu,
- Metoda po Casellasu,
- Metoda po Niihari.

#### Metoda po Anstisu:

Određivanje žilavosti mjerenjem duljine pukotina po Anstisu ovisi o modulu elastičnosti materijala, tvrdoći, duljini pukotina te primijenjenom opterećenju. Anstis [9,10] je predložio sljedeći izraz za određivanje lomne žilavosti:

$$K_{IC} = 0,016 \cdot \sqrt{\frac{E}{H}} \cdot \frac{F}{\sqrt{c^3}} \quad (2.3)$$

Gdje je:

$K_{IC}$  - lomna žilavost u  $MPa \cdot \sqrt{m}$ ,

F - opterećenje u njutnima (N),

c - duljina pukotine od centra otiska do vrha pukotine mjerena u metrima,

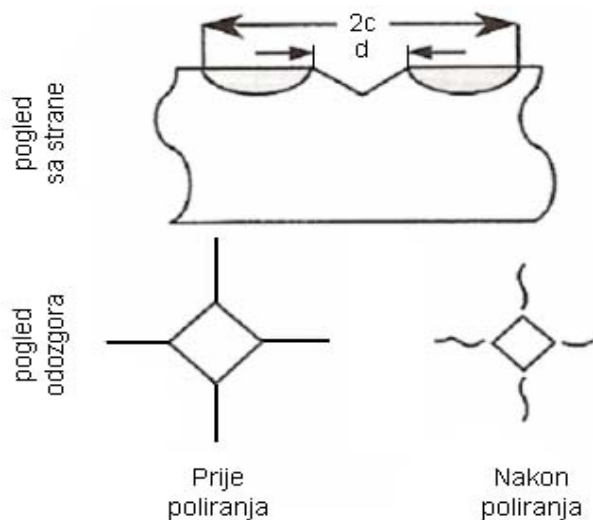
E - je Youngov modul elastičnosti u GPa,

H - tvrdoća po Vickersu mjerena u GPa. ( $H = 0,0098067 \cdot HV$ ).

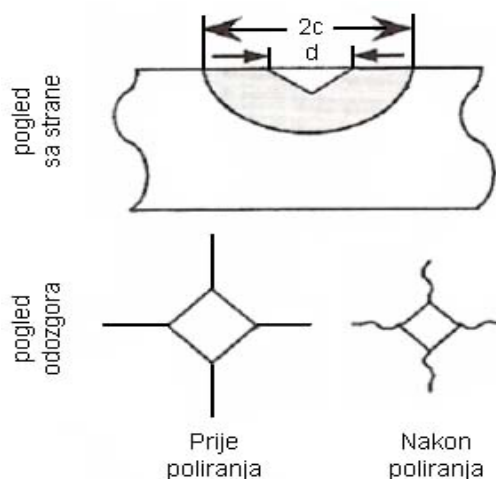
#### Pukotine za određivanje lomne žilavosti

Postoje dvije vrste pukotina: Palmqvist pukotine (slika 9) i Medijan pukotine (slika 10). Jednostavan način na koji možemo razlikovati ta dva tipa širenja pukotina je uklanjanje površinskih slojeva poliranjem, pri čemu će Medijan pukotina uvijek ostati povezana sa vrhom otiska, dok će se Palmquist pukotina odvojiti što je vidljivo na slikama 9,10, [11,12].





Slika 9. Prikaz izgleda Palmqvist pukotine, [11,12]



Slika 10. Prikaz izgleda Medijan pukotine [11,12]

### 2.3.7 Toplinska svojstva tehničke keramike

Toplinska svojstva keramike određuje [4]:

- Toplinska vodljivost,
- Toplinska rastezljivost,
- Otpornost na promjene temperature.

Toplinska vodljivost ( $\lambda$ ) keramičkih materijala uglavnom je manja nego kod čelika i bakra. Silicij karbidna keramika razlikuje se od ostalih keramika zbog svoje relativno velike toplinske vodljivosti u odnosu na ostale keramičke materijale koji se koriste kao izolatori zbog svoje relativno male toplinske vodljivosti. Mogućnost izolacijskog djelovanja keramike poboljšava se povećanjem poroznosti.

Toplinska rastezljivost ( $\alpha$ ) tehničke keramike za silicijev karbid manja je nego kod čelika i sivog lijeva.

Otpornost na promjene temperature za silicij karbidnu keramiku kao i velik broj keramičkih materijala je slaba što znači da je silicij karbidna keramika osjetljiva na toplinske šokove i nagle promjene temperature mogu dovesti do lomova. Osjetljivost keramike na toplinske šokove uzrokuju zaostala naprezanja uzrokovana gradijentima porasta temperature kao i izrazita krhkost tehničke keramike. Ukoliko imamo brze i velike promjene temperatura u keramici se počinju javljati naprezanja koja izazivaju rast pukotina koje će također dovesti do ubrzanog loma materijala.

### 2.3.8 Svojstva CVD SiC keramike

CVD postupak proizvodnje stvara monolitni CVD SiC jako visoke čistoće (99,9995%). Izotropna kubična  $\beta$  kristalna struktura omogućuje teoretsku gustoću od  $3.21 \text{ g/cm}^3$  bez mikroporoznosti i mikropukotina što osigurava homogenost u okvirima serijske proizvodnje. K tome je CVD znatno tvrdi od uobičajenih metala i keramika i može biti poliran na izdržljivu zrcalno čistu površinu. CVD SiC je lagan materijal, sličan aluminiju i ima jedne od najboljih trenutno dostupnih omjera krutosti i mase, [13].

Ove značajke nude nekoliko važnih prednosti u eksploataciji SiC. Sa svojom visokom otpornošću na trošenje i abraziju, CVD SiC je izuzetno izdržljiv materijal koji nije sklon pogrublivanju zrna i idealan je za proizvodnju poluvodičkih komponenti. Također sa svojom otpornošću na koroziju, oksidaciju i kemijsku eroziju, CVD SiC komponente se koriste za primjenu kod plazme i kiselina koje se koriste kod prerade i čišćenja poluvodiča.

CVD SiC također ima nizak koeficijent toplinske ekspanzije ( $4.5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$  od  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) i jako visoku toplinsku vodljivost ( $\geq 250 \text{ W/m-K}$  na  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) kao i jako dobre karakteristike na visokim temperaturama (do  $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

## 2.4 Primjena tehničke keramike i CVD SiC keramike

Primjena tehničkih keramika je sistematizirana u tablici 1, ovisno o zahtijevanim svojstvima.

Tablica 1. Primjena tehničke keramike ovisno o zahtijevanim svojstvima, [1].

PRETEŽNI UTJECAJI	ZAHTEJVANA SVOJSTVA	PRIMJERI PRIMJENE
TOPLINSKI	postojanost pri visokim temperaturama i promjenama temp., izolacijska svojstva	dijelovi gorionika, grijača, metalurgija, ispušni sistemi slojevi, izolatori
MEHANIČKI	čvrstoća pri visokim temp. dugotrajno opterećenje, otpornost umoru, tribološka svojstva	dijelovi tribosistema strojeva, klizni prstenovi, dijelovi motora, turbopunjač, dijelovi plinskih turbina, prevlake
KEMIJSKI I BIOLOŠKI	kemijska postojanost, biokompatibilnost, sposobnost adsorpcije	zaštita od korozije, nosači katalizatora, oprema u ekologiji, senzori, implantati-zglobovi, zubi
ELEKTRIČNI I MAGNETSKI	električna vodljivost/električna otpornost, piezoelektricitet i termoelektricitet, dielektrična svojstva	elementi grijača, izolatori, magneti, senzori, elektroničke komponente, substrati, feroelektrici, kućišta čvrsti elektroliti, poluvodiči, supervodiči
OPTIČKI	providnost i provođenje svjetlosti, fluorescencija fokusiranje svjetlosti	svjetiljke, prozori za razl. vrste zračenja, zrcala, optička vlakna
NUKLEARNI	propusnost zračenja odnosno upijanje zračenja, temp. i kemijska	dijelovi gorivih jezgri, apsorbri, spremnici visokoradioaktivnog otpada

Ovaj rad će se pobliže baviti neoksidnom tehničkom keramikom i stoga se navodi primjena neoksidne keramike. Najširu primjenu kod neoksidne keramike za sada imaju SiC i Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> i to u toplinskim strojevima i alatima izloženim trošenju. Osim najčešće navedene primjene neoksidna keramika se još primjenjuje za, [1]:

- lonce u metalurgiji za taljenje Al i Cu legura,
- dijelove pumpi za agresivne medije u kemijskoj industriji,
- alate za izvlačenje žica i cijevi,
- kuglične i klizne ležajeve koji omogućuju rad u agresivnoj okolini i do 700 °C,
- dijelove ventila izloženih eroziji,
- brtvene prstenove,
- dijelove filtara i izmjenjivača topline,
- dijelove turbina i motora, npr. rotor turbopunjača.

Izrazito povoljna temperaturna svojstva CVD SiC keramike čine je idealnim materijalom za primjenu pri naglim promjenama temperatura. Testiranje na nagle promjene temperatura podrazumijeva intenzivni toplinski udar nanesen na tanku keramičku pločicu na vrlo kratko vrijeme. Nakon toga uklanja se izvor temperature i keramička pločica se brzo hladi vodom, [13].

Visoka kemijska otpornost čini CVD SiC idealnim materijalom za primjenu u komorama za rezanje pomoću plazme, gdje se kroz CVD SiC ploče distribuira

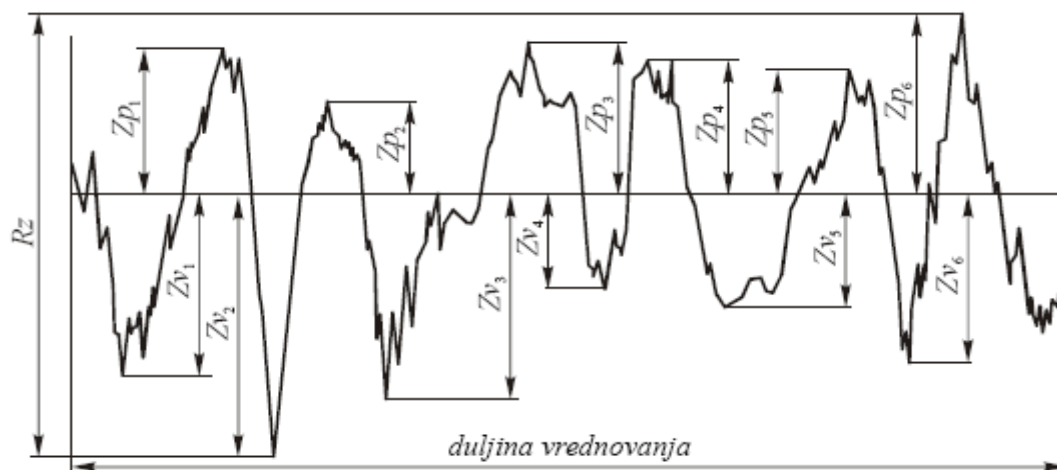
zaštitni plin u plazmu. Prednost CVD SiC materijala nad drugim materijalima je ta što ovaj materijal ima nisku reaktivnost na plinove koji sadrže klor i fluor, [13].

### 3. POVRŠINSKA HRAPAVOST

Površinska hrapavost je sveukupnost mikogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta koje su prouzrokovane postupkom obrade ili nekim drugim utjecajima. Veličina hrapavosti tehničkih površina može utjecati na :

- Smanjenje dinamičke izdržljivosti odnosno čvrstoće oblika,
- Pojačano trenje i habanje tribološki opterećenih površina,
- Smanjenje prijeklopa kod steznih spojeva čime se smanjuje i nosivost steznog spoja,
- Ubrzavanje korozije.

Maksimalna visina profila **Rz** je zbroj duljine najveće visine vrha profila **Zp** i najveće dubine dna profila **Zv** na dužini vrednovanja, [14]. Određivanje maksimalne visine profila **Rz** prikazano je slikom 11.



Slika 11. Određivanje maksimalne visine profila **Rz**, [14]

Srednje aritmetičko odstupanje mjenog profila **Ra** je aritmetički prosjek apsolutne ordinatne vrijednosti  $Z(x)$  na dužini uzorka, [7] i teoretski je objašnjeno formulom:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(X)| dx \quad \text{ili} \quad Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Zx_i| \quad (3.1)$$

Gdje je:

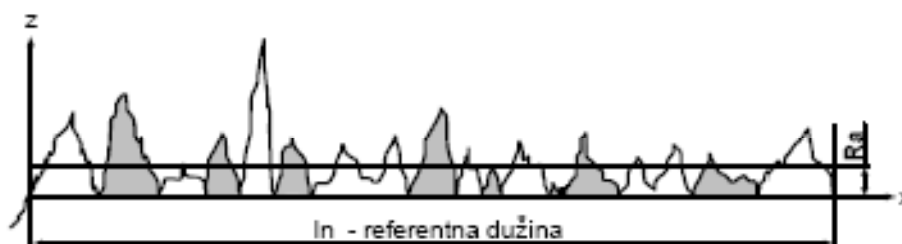
$n$  broj ordinata  $Zx$  koraka  $\Delta x$ .

Pri izračunavanju srednjeg aritmetičkog odstupanja mjenog profila **Ra** prvo je potrebno snimiti najveće visine vrha profila **Zp** i najveće dubine dna profila **Zv** i potom odrediti i nacrtati srednju liniju hrapavosti profila kao što prikazuje slika 12.



Slika 12. Određivanje srednje linije hrapavosti oblika, [15]

Sve udubine profila potrebno je proglasiti brjegovima, odrediti njihove visine vrha profila  $Z_p$  i zajedno sa već postojećim visinama vrha profila  $Z_p$  izračunati srednje aritmetičko odstupanje mjenog oblika  $R_a$  koje će predstavljati ravninu koja najbolje aproksimira polovicu udaljenosti između referentne dužine odnosno osi x i visine vrhova profila  $Z_p$  brjegova, što je prikazano slikom 13.



Slika 13. Određivanje srednjeg aritmetičkog odstupanja mjenog profila  $R_a$ , [15]

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

Sva ispitivanja su provedena na uzorku silicij karbidne keramike (SiC) iz tvrtke Applied Ceramics, Inc., Fremont, Kalifornija, SAD. Prema deklaraciji tvrtke Applied Ceramics ispitivana silicij karbidna keramika ima sljedeća svojstva koja su prikazana u tablici 2.

Tablica 2. Svojstva ispitivane CVD SiC keramike [16]

Svojstva	CVD SiC	Mjerne jedinice
Gustoća	3.21	g/cm <sup>3</sup>
Veličina zrna	5-10	μm
Čistoća	> 99,9995 %	%
Apsorpcija vode	0	%
Propusnost plina	0	%
Temperatura sublimacije	~ 2700	°C
Boja	Crna	-
Svojna čvrstoća	460	MPa
Modul Elastičnosti	450	GPa
Poissonov faktor	0,21	-
Tvrdoća, HV 0,5	2500	kg/mm <sup>2</sup>
Lomna žilavost	3,3	MPa m <sup>1/2</sup>
Toplinska provodnost	200	W/mK
Koeficijent toplinskog širenja 25-1000°C	665	J/kgK
Specifični toplinski kapacitet	665	J/kgK

Postupci CVD (Chemical Vapour Deposition) provode se na temperaturama od oko 1000°C i primjenjuju se najčešće za sinterirane tvrde metale. Budući da je prethodno sinteriranje provedeno pri višim temperaturama, pri postupku CVD ne nastaju promjene mikrostrukture i dimenzija.

Glavni parametri CVD postupka su, [16]:

- ✓ Temperatura,
- ✓ Tlak,
- ✓ koncentracija plinova reaktanata,
- ✓ ukupni protok plina.

CVD se provodi kroz kemijske reakcije u koje spadaju: piroliza, redukcija vodikom, redukcija metalnom parom, redukcija supstratom. Temperatura prevlačenja mora se postići i održavati tako da ne dođe do mikrostrukturnih promjena. Male promjene temperature (do 25°C) mogu izmijeniti reakciju, što će rezultirati nekvalitetnom prevlakom. Tlak na kojem se odvija CVD postupak može se kretati od atmosferskog pa do visokog vakuuma. Najčešće se CVD postupci odvijaju na tlaku koji je znatno ispod atmosferskog tlaka. Parametri kao što su koncentracija plinova reaktanata i ukupni protok plina reguliraju se u svrhu postizanja ravnomjernosti prevlake.

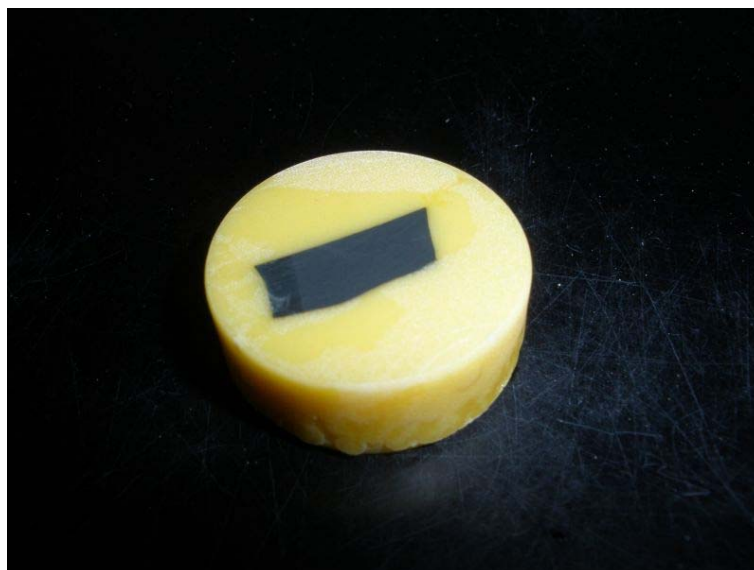
U okviru planiranog istraživanja provedeno je ispitivanje tvrdoće na opterećenjima HV1, HV3 i HV5. Izmjerene su pukotine nastale pri mjerenju tvrdoće i na temelju njihove duljine određena je žilavost keramike. Za kvalitetno ispitivanje tvrdoće potreban je dobro pripremljen uzorak sa ravnom glatkom i sjajnom površinom.

Potrebna ispitivanja su provedena na površini uzorka s tri različite vrijednosti hrapavosti postignute poliranjem dijamantnom pastom veličine čestica 6, 3 i 0,25  $\mu\text{m}$ . Prije ispitivanja izmjerena je površinska hrapavost.

#### 4.1 Priprema uzorka SiC keramike za određivanje tvrdoće i lomne žilavosti

##### Zalijevanje uzorka

Uzorak je zbog bolje kvalitete i lakšeg rukovanja potrebno zaliti u masu. Masa za zalijevanje uzorka je "Duro Fix – 2 Kit", zalijevanje se vrši na hladno u određeni kalup i nakon 20 minuta kada dođe do polimerizacije uzorak se može dalje pripremati. Masa "Duro Fix – 2 Kit" se sastoji od tekućine i praha u omjeru 1:2. Uzorak nakon zalijevanja prikazan je na slici 14.



Slika 14. Izgled uzorka nakon zalijevanja

Nakon zalijevanja uzorka uslijedilo je brušenje i poliranje uzorka na uređaju DAP - W STRUERS prikazanom na slici 15.





Slika 15. Uređaj za brušenje i poliranje keramike

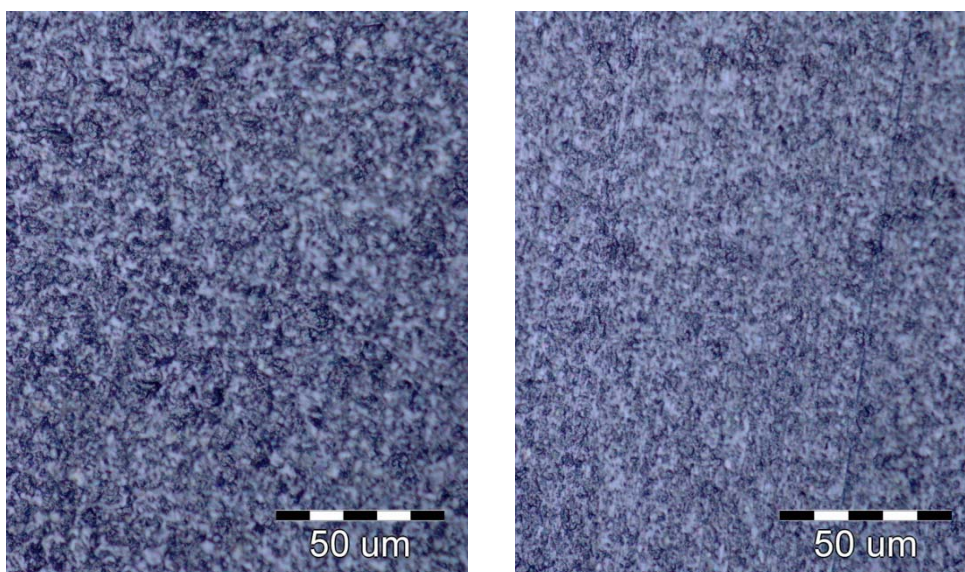
### Brušenje

Brušenje se provodi u 5 faza. Parametri brušenja prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Parametri brušenja

	1. faza	2. faza	3. faza	4. faza	5. faza
Podloga	Grit 220	Grit 600	Brusni papir	Brusni papir	Brusni papir
Abr. čestice	Dijamant	Dijamant	SiC	SiC	SiC
Finoća zrna	220	600	1200	2400	4000
Sila pritiska, N	75	75	75	75	75
Vrijeme, min	7	7	7	7	7
Sredstvo za hlađ. i podm.	voda	voda	voda	voda	voda
Brzina vrtnje, o/min	300	300	300	300	300

Na slici 16, vidi se površina uzorka nakon 1. i 2. faze brušenja.

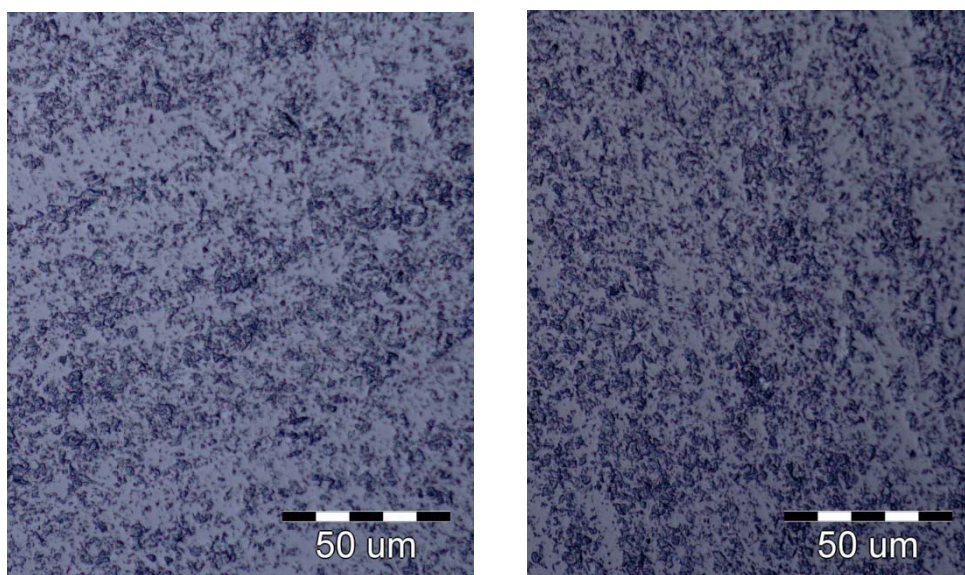


a)

b)

*Slika 16. Prikaz površine nakon: a) 1. faze brušenja i b) 2. faze brušenja*

Na slici 17, vidi se površina uzorka nakon 3. i 4. faze brušenja

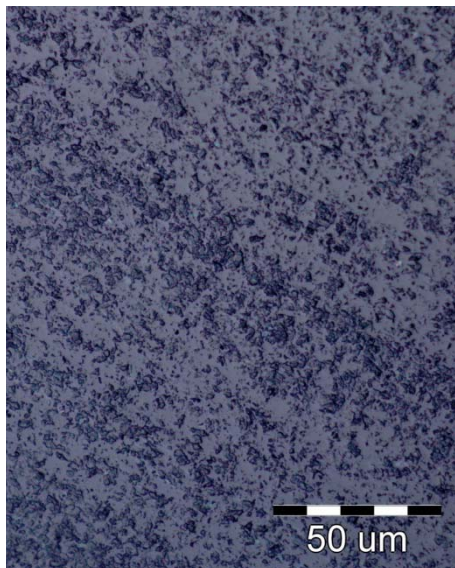


a)

b)

*Slika 17. Prikaz površine nakon: a) 3. faze brušenja i b) 4. faze brušenja*

Na slici 18, vidi se površina nakon 5. faze brušenja.



Slika 18. Prikaz površine nakon 5. faze brušenja

Brzina okretaja kod brušenja je 300 o/min. Tijekom brušenja uzorci se hlade i podmazuju vodom.

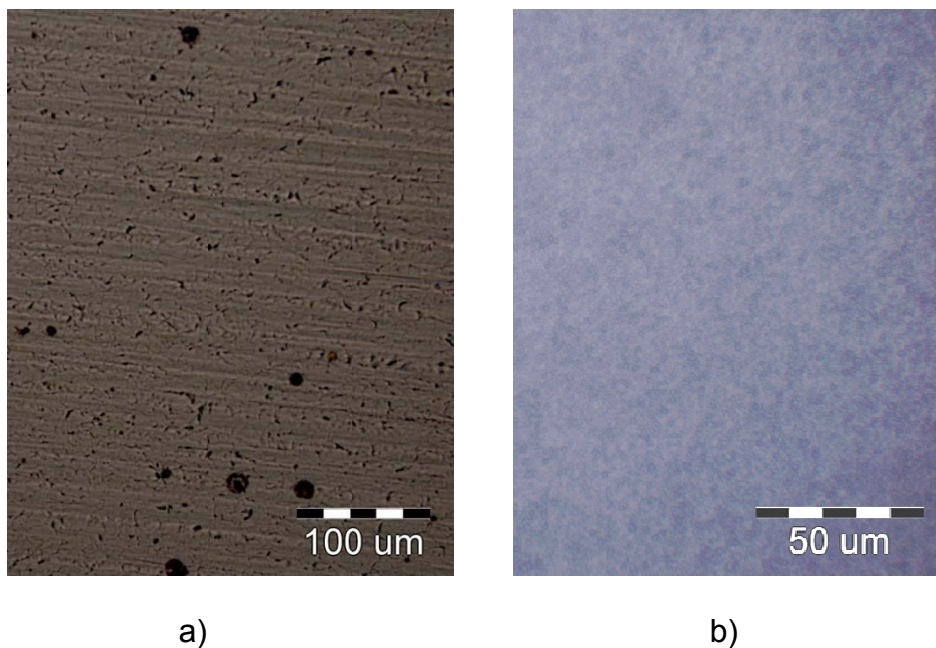
### Poliranje

Poliranje se vrši u tri stupnja. Parametri poliranja prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Parametri poliranja

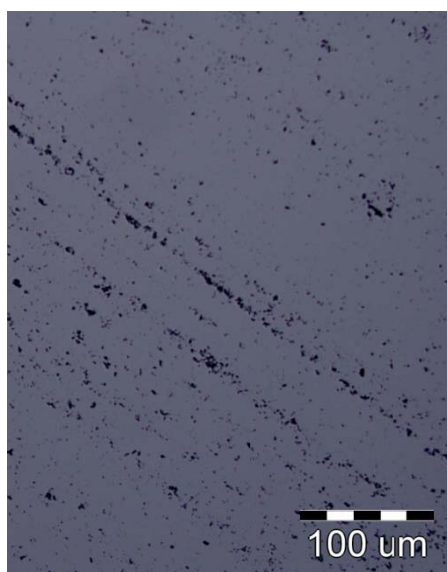
	1. stupanj	2. stupanj	3. stupanj
Podloga	DP -mol	DP - mol	OP CHEM
Abr. čestice	Dijamantna pasta	Dijamantna pasta	Dijamantna pasta
Finoća zrna	6 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	0,25 $\mu\text{m}$
Sila pritiska, N	75	75	75
Vrijeme, min	5	5	5
Brzina vrtnje, o/min	200	200	200

Na slici 19, vidi se površina nakon 1. i 2. stupnja poliranja.



Slika 19. Prikaz površine nakon: a) 1. stupnja poliranja i b) 2. stupnja poliranja

Na slici 20, vidi se površina nakon 3. stupnja poliranja.



Slika 20. Prikaz površine nakon 3. stupnja poliranja

Za razliku od brušenja kod poliranja je brzina okretaja bila 200 o/min. Uzorci su se nakon svakog stupnja ispirali vodom i deterdžentom. Nakon završenog poliranja nad uzorkom je izvršeno mjerenje hrapavosti.

## 4.2 Mjerenje hrapavosti

Hrapavost površine uzorka mjerena je na elektromehaničkom uređaju za ispitivanje hrapavosti površine MU2-127 u Laboratoriju za precizna mjerenja duljina na Zavodu za kvalitetu. Duljina mjerenja je bila različita za različite tipove hrapavosti i ovisila je o veličini hrapavosti, odnosno za veće hrapavosti korištena je veća mjerna duljina. Hrapavost je mjerena na tri proizvoljno odabrana mjesta. Elektromehanički uređaj za ispitivanje hrapavosti površine MU2-127 prikazan je na slici 21.



Slika 21. Elektromehanički uređaj za ispitivanje hrapavosti površine MU2-127

## 4.3 Mjerenje tvrdoće i lomne žilavosti

U ovom radu tvrdoća SiC keramike mjerena je metodom po Vickersu. Mjerene su tvrdoće HV1, HV3 i HV5 na uređaju Zwick koji je prikazan slikom 22. Mjerenja su izvršena u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava u Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje, a pukotine nastale od penetratora korištene su u izračunu lomne žilavosti. Na poliranom uzorku određena je tvrdoća HV1, HV3 i HV5 uz sljedeća opterećenja:

- 9,81 N za HV1,
- 29,43 N za HV3,
- 49,05 N za HV5.

Tvrdoće su utiskivane najprije na uzorku poliranom s dijamanтном pastom veličine čestica od 0,25  $\mu\text{m}$ , potom se površina pogrubljivala poliranjem sa dijamanтном pastom veličine čestica dijamanata od 3  $\mu\text{m}$  nakon čega je provedeno novo utiskivanje tvrdoća. Potom se površina pogrubljivala poliranjem sa dijamanтном pastom veličine čestica od 6  $\mu\text{m}$  nakon čega je vršeno posljednje utiskivanje tvrdoća i mjerenje otisaka dijagonala pomoću svjetlosnog elektronskog mikroskopa.

Za gore navedena opterećenja izvršena su mjerenja dijagonala otisaka ( $d_1$  i  $d_2$ ) i duljine pukotina  $c$ . Za svaku kvalitetu površine napravljeno je po 30 mjerenja

tvrdće HV1, HV3 i HV5. Pri kvantitativnom određivanju žilavosti korištena je metoda po Anstisu.

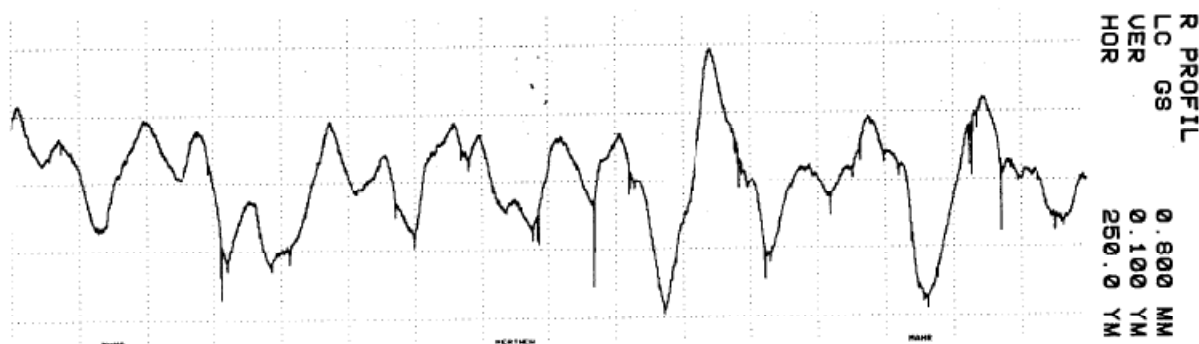


Slika 25. Tvrdomjer Zwick

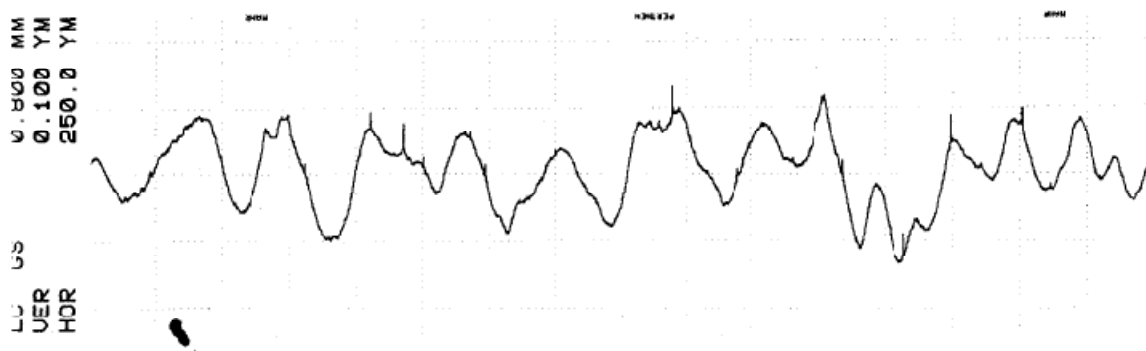
## 5.REZULTATI ISPITIVANJA

### 5.1 Rezultati mjerenja hrapavosti

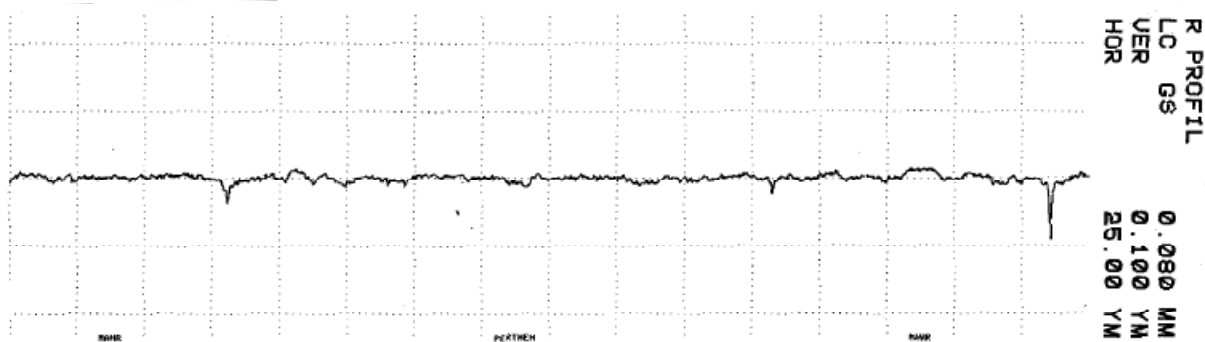
Nakon izvršenog poliranja površine dijamantnom pastom s različitim veličinama čestica (0,25, 3 i 6  $\mu\text{m}$ ) izmjerena je hrapavost površine. Dobiveni rezultati za sve tri kvalitete površine prikazani su dijagramima na slici 26, i tablicama na slici 27.



a) dijamantne čestice od 0,25  $\mu\text{m}$




b) dijamantne čestice od 3  $\mu\text{m}$



c) dijamantne čestice od 6  $\mu\text{m}$

Slika 26. Dijagramski prikaz izmjerene hrapavosti površine nakon poliranja dijamantnom pastom

perthometer S8P 4.5

		LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA  FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT: 1  NR.: 1 NAME: HABEK  MESS.-NR.: 3 T2 RHT1 6-50 50 16
LT	5.600 MM		
LM	4.000 MM		
UB	12.50 YM		

KENNWERT				STATISTIK N = 3						
	LC	GS	Ø. 800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										

a) hrapavost nakon poliranja dijamantnom pastom veličine čestica 0,25 µm

1	RMAX	YM	0.389	0.121	0.230	0.482	0.253		
2	RZ	YM	0.247	0.051	0.097	0.287	0.190		
3	RA	YM	0.046	0.003	0.005	0.047	0.043		
4	RP	YM	0.191	0.046	0.084	0.223	0.139		
5	RPM	YM	0.104	0.015	0.029	0.117	0.088		
6	WT	YM	0.438	0.019	0.035	0.452	0.417		
7	RT	YM	0.457	0.179	0.356	0.622	0.266		
8	PT	YM	0.751	0.143	0.275	0.912	0.636		

b) hrapavost nakon poliranja dijamantnom pastom veličine čestica 3 µm

1	RMAX	YM	0.061	0.041	0.079	0.107	0.028		
2	RZ	YM	0.033	0.015	0.028	0.050	0.021		
3	RA	YM	0.004	0.001	0.002	0.005	0.003		
4	RP	YM	0.013	0.002	0.005	0.015	0.011		
5	RPM	YM	0.011	0.001	0.002	0.012	0.010		
6	WT	YM	0.057	0.006	0.011	0.064	0.053		
7	RI	YM	0.061	0.041	0.079	0.107	0.028		
8	PT	YM	0.096	0.034	0.066	0.134	0.068		

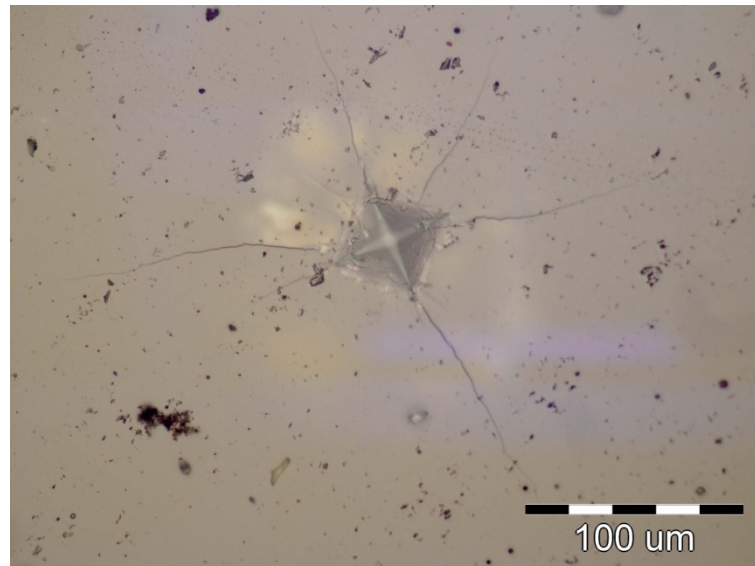
c) hrapavost nakon poliranja dijamantnom pastom veličine čestica 6 µm

Slika 27. Prikaz dobivenih rezultata mjerenja hrapavosti površine



## 5.2 Rezultati mjerenja tvrdoće i lomne žilavosti

Nakon mjerenja hrapavosti površine provedeno je ispitivanje tvrdoće pod opterećenjem od 9,81 N (HV1), potom od 29,43 N (HV3) i na kraju od 49,05 N (HV5). Produranjem penetratora u materijal nastao je otisak prikazan na slici 28.



Slika 28. Prikaz otiska i pukotina nastalih utiskivanjem tvrdoća pod opterećenjem od 49,05 N (HV5) za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 0,25  $\mu\text{m}$

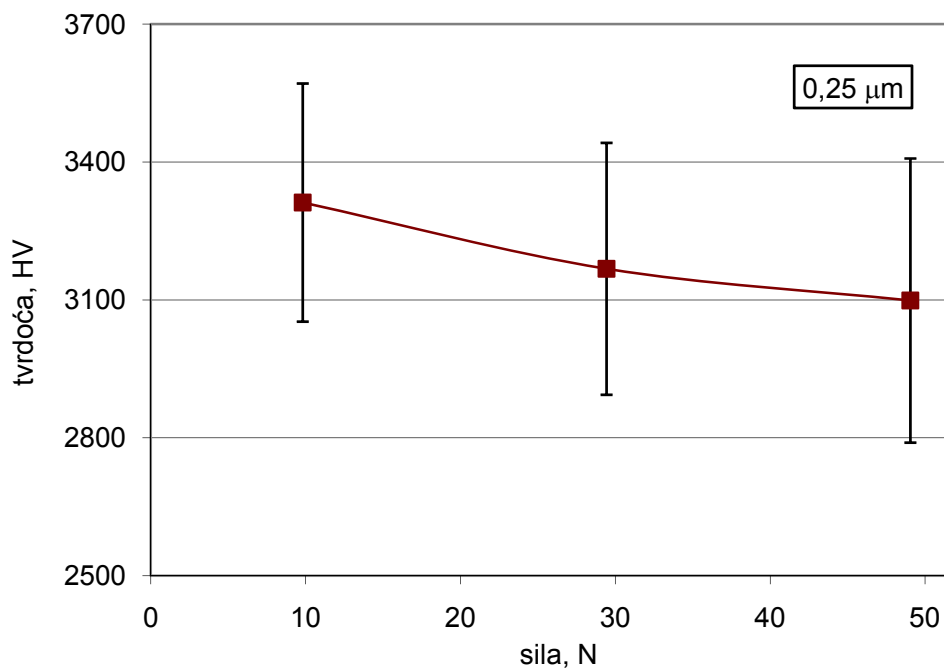
Izvršena su mjerenja dobivenih otisaka zajedno sa nastalim pukotinama iz vrhova otisaka. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici u Prilogu 1. Iz srednjih vrijednosti dijagonala računati su tvrdoće, a vrijednosti duljine pukotina korištene su za izračun lomne žilavosti ( $K_{IC}$ ).

U tablici 5, prikazane su srednje vrijednosti za izmjerene tvrdoće kao i srednje vrijednosti za žilavost  $K_{IC}$  izračunatih iz pukotina dobivenih pri mjerenju tvrdoće. Na slici 30, grafički je prikazana ovisnost tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 0,25  $\mu\text{m}$ .

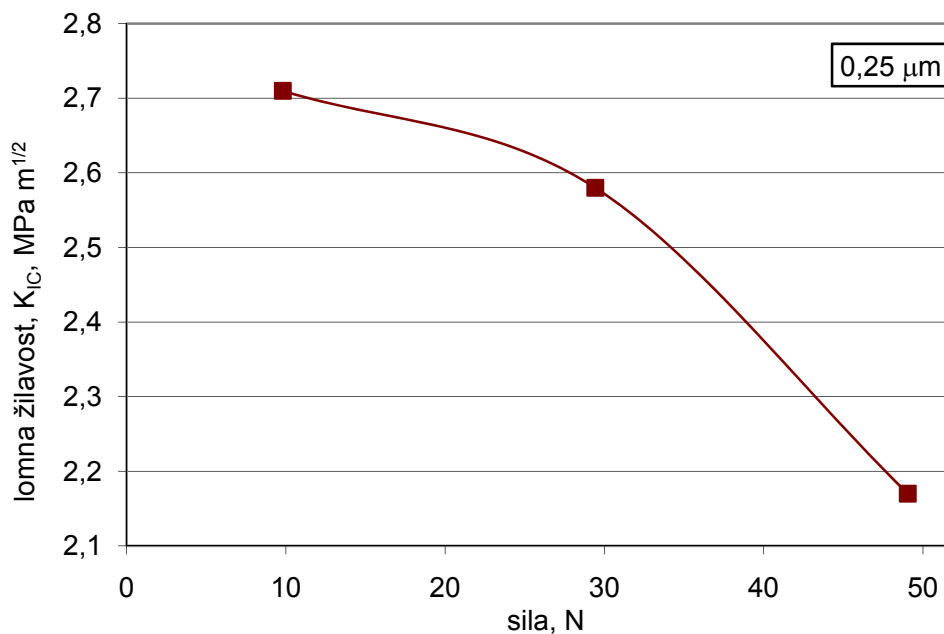
Tablica 5. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća i izračunate lomne žilavosti  $K_{IC}$  za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 0,25  $\mu\text{m}$

Masa, [kg]	Sila, [N]	Tvrdoća, [HV]	Lomna žilavost, $K_{IC}$ [MPa · $\sqrt{m}$ ]
1	9,81	3312	2,71
3	29,43	3168	2,58
5	49,05	3099	2,17

Prikazani su i rasponi u kojima se kreću dobiveni rezultati mjerenja HV. Slika 29, prikazuje dijagram ovisnosti tvrdoće o promjeni opterećenja, a slika 30, dijagram ovisnosti lomne žilavosti o promjeni opterećenja.

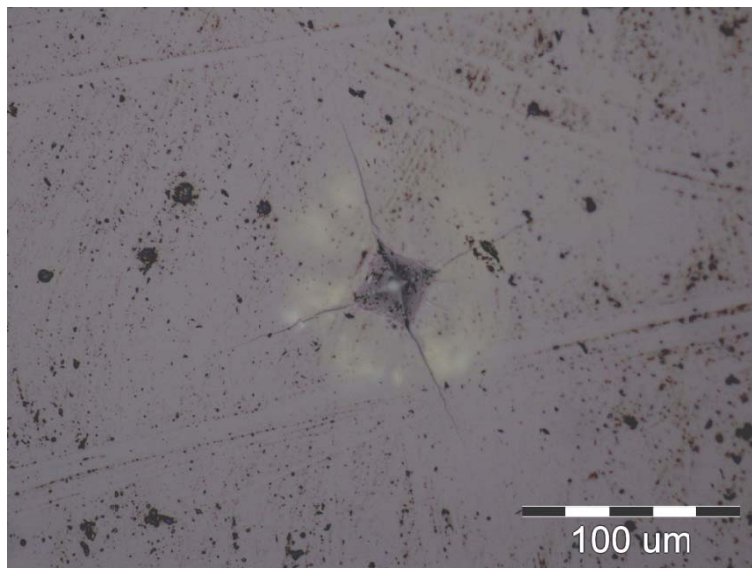


Slika 29. Ovisnost tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja za površinu završno poliranu dijamanтном pastom 0,25 μm



Slika 30. Ovisnost lomne žilavosti o promjeni opterećenja za površinu završno poliranu dijamanтном pastom 0,25 μm

Rezultati dobiveni ispitivanjem površine SiC keramike završno polirane dijamantnom pastom od 3  $\mu\text{m}$  nalaze se u Prilogu 2. Fotografija utisnuća HV 3 nalazi se na slici 31.



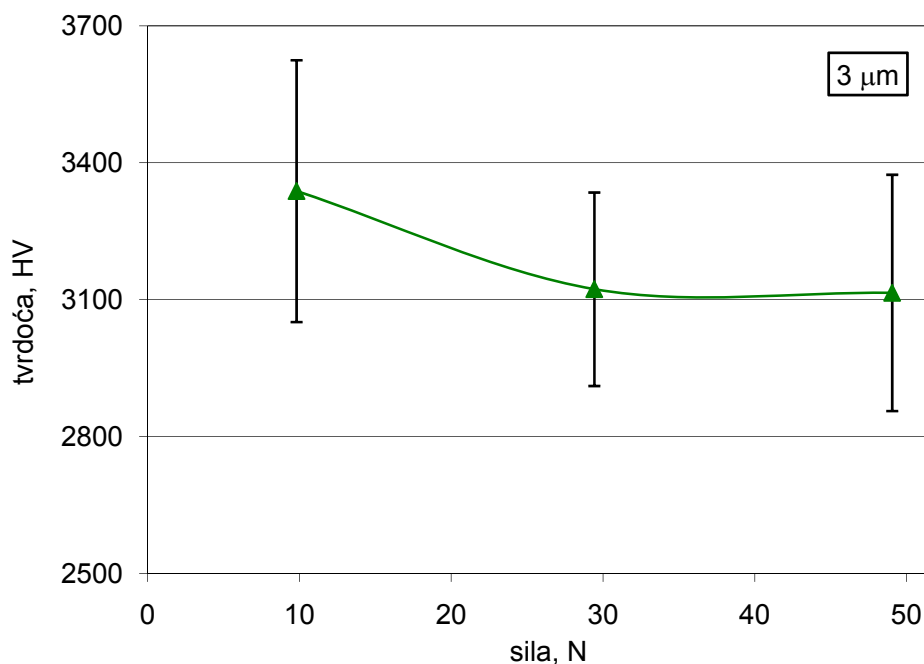
Slika 31. Prikaz otiska i pukotina nastalih pri mjerenju tvrdoće HV3 za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 3  $\mu\text{m}$

U tablici 6, prikazane su srednje vrijednosti od 30 mjerenja za tvrdoće HV1, HV3 i HV5. U istoj tablici nalaze se i srednje vrijednosti od 60 mjerenja za lomnu žilavost  $K_{IC}$  za različite sile utisnuća.

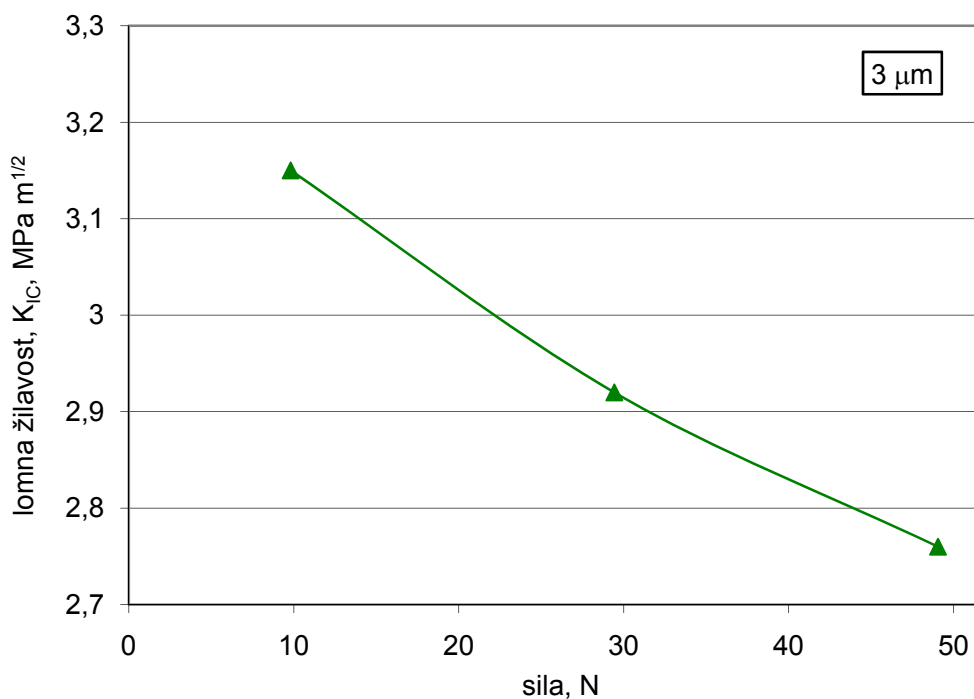
Tablica 6. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća i izračunate lomne žilavosti  $K_{IC}$  za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 3  $\mu\text{m}$ .

Masa, [kg]	Sila, [N]	Tvrdoća, [HV]	Lomna žilavost, $K_{IC}$ [MPa · $\sqrt{m}$ ]
1	9,81	3338	3,15
3	29,43	3123	2,92
5	49,05	3115	2,76

Na slici 32, dijagramski je prikazana ovisnost tvrdoće, a na slici 33, ovisnost žilavosti o promjeni opterećenja.

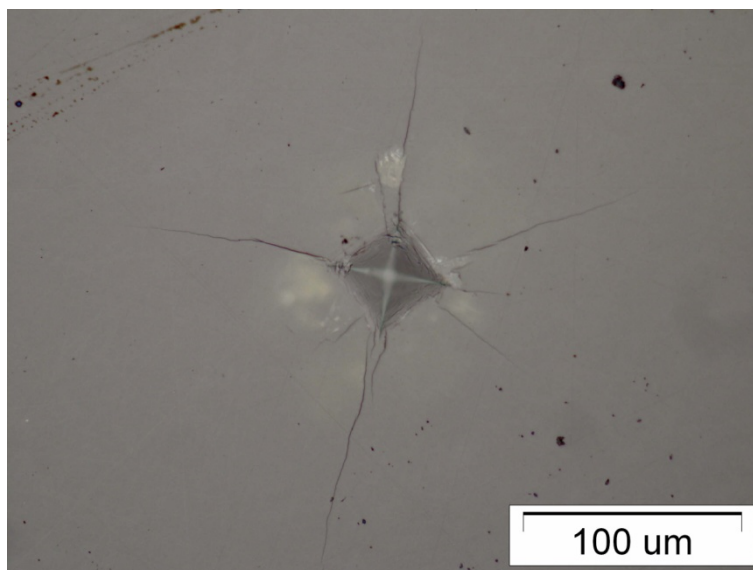


Slika 32. Ovisnost tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 3  $\mu\text{m}$



Slika 33. Ovisnost lomne žilavosti o promjeni opterećenja za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 3  $\mu\text{m}$

Rezultati dobiveni ispitivanjem površine SiC keramike završno polirane dijamantnom pastom od 6  $\mu\text{m}$  nalaze se u Prilogu 3. Fotografija utisnuća HV5 nalazi se na slici 34.



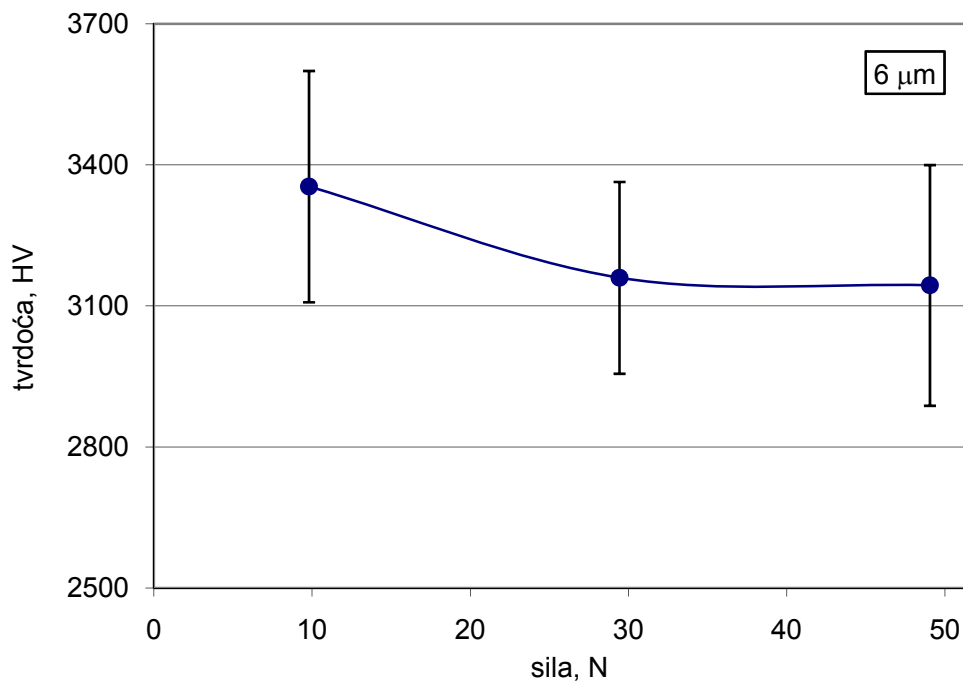
Slika 34. Prikaz otiska i pukotina nastalih pri mjerenju tvrdoće HV5 za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 6  $\mu\text{m}$

U tablici 7, prikazane su srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća i izračunatih lomnih žilavosti  $K_{IC}$ .

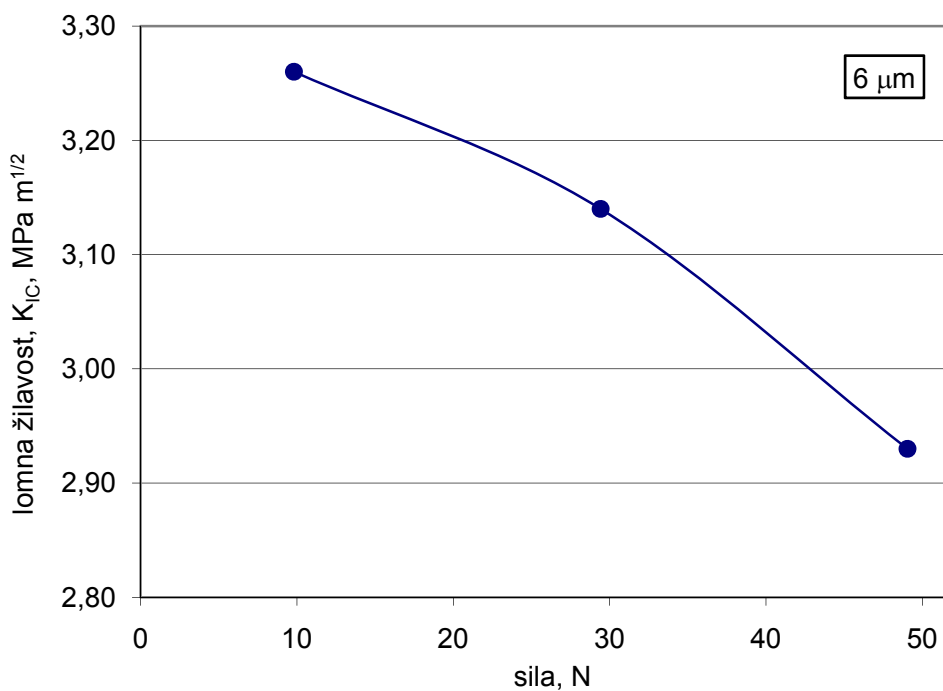
Tablica 7. Srednje vrijednosti izmjerenih tvrdoća i izračunate lomne žilavosti  $K_{IC}$  za površinu završno poliranu dijamantnom pastom 6  $\mu\text{m}$ .

Masa, [kg]	Sila, [N]	Tvrdoća, [HV]	Lomna žilavost, $K_{IC}$ [MPa · $\sqrt{m}$ ]
1	9,81	3354	3,26
3	29,43	3160	3,14
5	49,05	3144	2,93

Na slici 35, prikazana je ovisnost tvrdoće, a na slici 36, ovisnost lomne žilavosti o primijenjenom opterećenju.



Slika 35. Ovisnost tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja za površinu završno poliranu dijamanomnom pastom 6  $\mu\text{m}$



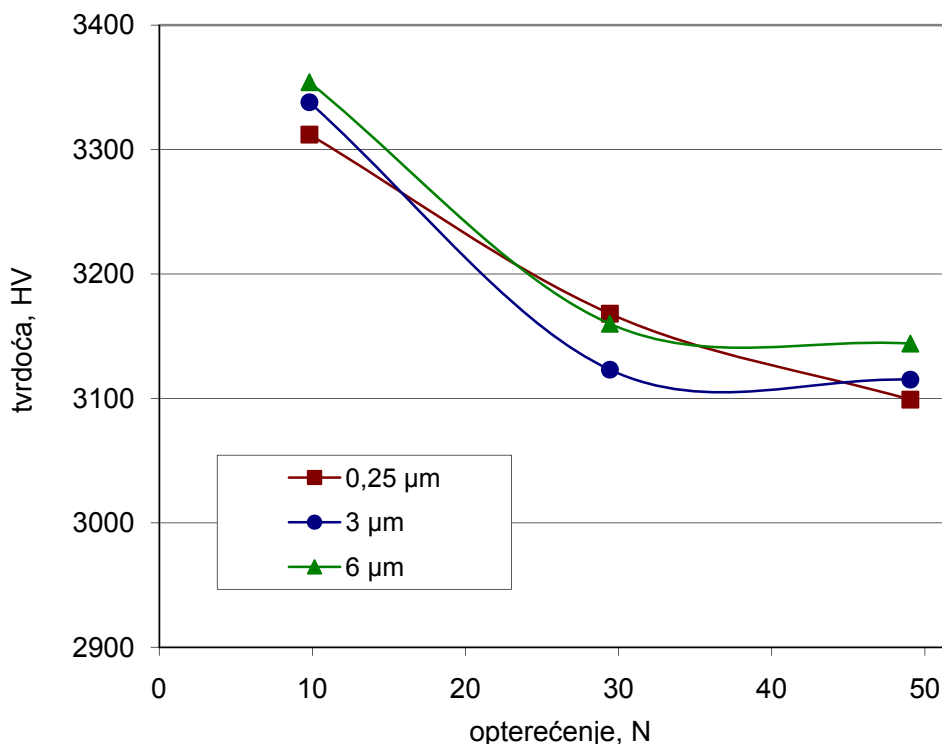
Slika 36. Ovisnost lomne žilavosti o promjeni opterećenja za površinu završno poliranu dijamanomnom pastom 6  $\mu\text{m}$

## 6. ANALIZA REZULTATA

Da bi se dobila jasna slika o promjeni tvrdoće i lomne žilavosti u ovisnosti o različitoj hrapavosti površine CVD SiC keramike, napravljen je dijagram koji objedinjuje sve tri krivulje tvrdoće odnosno lomne žilavosti. U tablici 8, navedene su sve prosječne tvrdoće i lomne žilavosti koje su dobivene ispitivanjem na površini s različitom hrapavošću. Na slici 37, prikazana je ovisnost tvrdoće o hrapavosti i sili utisnuća.

Tablica 8. Prosječne vrijednosti tvrdoća i lomnih žilavosti za hrapavost površine nakon završnih poliranja dijamanom pastom veličine čestica 0,25  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  i 6  $\mu\text{m}$

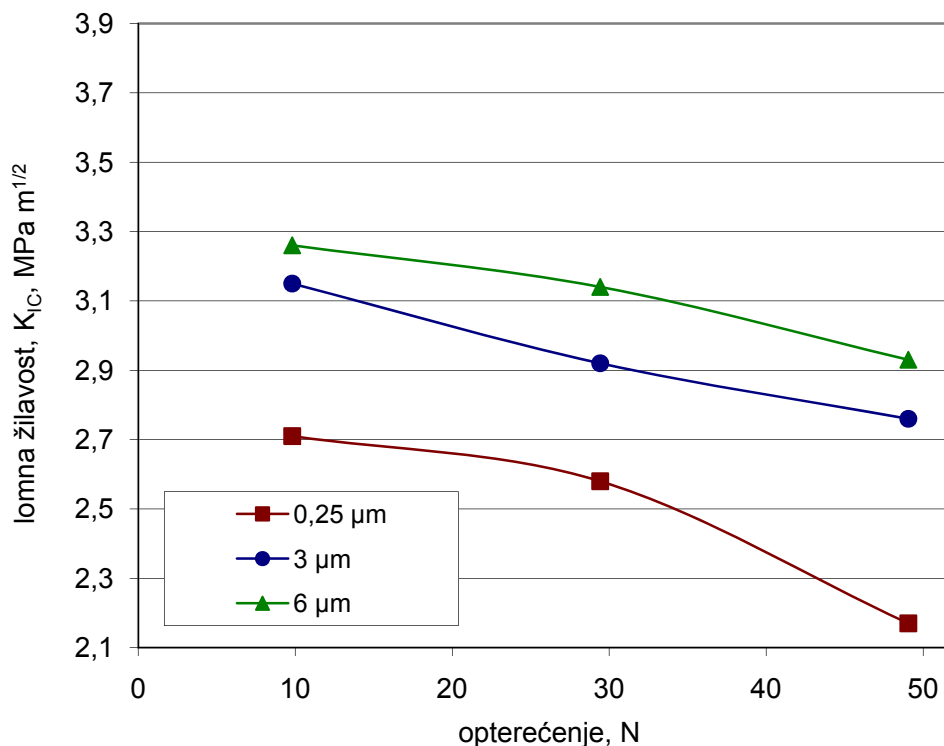
Sila, F [N]	Tvrdoća, HV			Lomna žilavost, $K_{IC}$ [ $MPa \cdot \sqrt{m}$ ]		
	0,25 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$	0,25 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$
9,81	3312	3338	3354	2,71	3,15	3,26
29,43	3168	3123	3160	2,58	2,92	3,14
49,05	3099	3115	3144	2,17	2,76	2,93



Slika 37. Dijagramski prikaz ovisnosti tvrdoće o sili utisnuća i hrapavosti

Očito je da hrapavost nema značajniji utjecaj na izmjerenu tvrdoću. Također se vidi da tvrdoća pada ako se sila utisnuća povećava. Ovo je osobito izraženo povećanjem sile od 9,81 na 29,43 N

Na slici 38, predložena je promjena žilavosti u ovisnosti o hrapavosti i sili utisnuća.



Slika 38. Dijagramski prikaz lomne žilavosti  $K_{IC}$  o sili utisnuća i hrapavosti

Vidljivo je da porastom hrapavosti raste i žilavost. Također je vidljivo da porastom sile utisnuća lomna žilavost pada.



## 7. ZAKLJUČAK

Cilj ovoga rada bio je utvrditi da li promjena površinske hrapavosti CVD SiC keramike utječe na promjenu lomne žilavosti. Provedena su istraživanja na uzorcima s tri različite hrapavosti površine. Različite hrapavosti dobivene su poliranjem uzorka dijamantnom pastom veličine čestica od 0,25  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  i 6  $\mu\text{m}$ . Istodobno su određene i promjene tvrdoće u ovisnosti o promjeni opterećenja utiskivanja i hrapavosti površine.

Na temelju provedenih istraživanja i dobivenih rezultata, može se zaključiti sljedeće:

- Promjena hrapavosti površine ne utječe značajno na promjenu tvrdoće,
- Tvrdoća pada ako se sila utisnuća povećava, što je osobito izraženo povećanjem sile od 9,81 na 29,43 N,
- Porastom hrapavosti raste žilavost,
- Porastom sile utisnuća lomna žilavost pada.

Pretpostavka je da je s povećanjem hrapavosti površine došlo do porasta žilavosti zbog toga što je veća hrapavost uvjetovala bolje akumuliranje energije koju je stvorila sila prilikom utiskivanja tvrdoće. Veće akumuliranje energije smanjilo je intenzitet širenja sile u ravnini paralelnoj sa površinom uzorka što je izazvalo manje duljine pukotina.

## 8. PRILOG

### 8.1 Prilog 1

Tablica 9. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 9,81 N (HV1), za površinu završno poliranu s česticama 0,25  $\mu\text{m}$

	HV1	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1, m$	$c_3$	$c_{3/2}$	$K_{Ic}$
1	3649,5	22,48	31,45	0,00003145	3,11073E-14	1,76373E-07	3,31
2	3649,5	22,48	31,55	0,00003155	3,14049E-14	1,77214E-07	3,30
3	3563,4	22,75	31,91	0,00003191	3,24923E-14	1,80256E-07	3,24
4	3560,3	22,76	32,07	0,00003207	3,29835E-14	1,81614E-07	3,22
5	3477,3	23,03	32,09	0,00003209	3,30453E-14	1,81784E-07	3,21
6	3394,2	23,31	32,13	0,00003213	3,3169E-14	1,82124E-07	3,21
7	3351,0	23,46	32,47	0,00003247	3,42332E-14	1,85022E-07	3,16
8	3351,0	23,46	32,54	0,00003254	3,4455E-14	1,85621E-07	3,15
9	3314,1	23,59	32,60	0,0000326	3,4646E-14	1,86134E-07	3,14
10	3311,3	23,60	32,73	0,00003273	3,50621E-14	1,87249E-07	3,12
11	3302,9	23,63	32,85	0,00003285	3,54492E-14	1,8828E-07	3,10
12	3236,8	23,87	33,24	0,00003324	3,67268E-14	1,91642E-07	3,05
13	3236,8	23,87	33,24	0,00003324	3,67268E-14	1,91642E-07	3,05
14	3231,4	23,89	33,34	0,00003334	3,70593E-14	1,92508E-07	3,03
15	3170,1	24,12	33,37	0,00003337	3,71594E-14	1,92768E-07	3,03
16	3170,1	24,12	33,66	0,00003366	3,81366E-14	1,95286E-07	2,99
17	3100,3	24,39	33,96	0,00003396	3,91654E-14	1,97903E-07	2,95
18	3097,8	24,40	33,97	0,00003397	3,92001E-14	1,9799E-07	2,95
19	3097,8	24,40	34,57	0,00003457	4,13141E-14	2,03259E-07	2,87
20	3092,7	24,42	34,97	0,00003497	4,27648E-14	2,06797E-07	2,83
21	3735,4	22,22	34,99	0,00003499	4,28383E-14	2,06974E-07	2,82
22	3030,3	24,67	34,99	0,00003499	4,28383E-14	2,06974E-07	2,82
23	3030,3	24,67	35,09	0,00003509	4,32066E-14	2,07862E-07	2,81
24	3027,9	24,68	35,13	0,00003513	4,33545E-14	2,08217E-07	2,81
25	3018,1	24,72	35,87	0,00003587	4,61524E-14	2,14831E-07	2,72
26	3742,1	22,20	35,94	0,00003594	4,64231E-14	2,1546E-07	2,71
27	2962,7	24,95	36,08	0,00003608	4,69677E-14	2,1672E-07	2,70
28	3738,8	22,21	36,21	0,00003621	4,74773E-14	2,17893E-07	2,68
29	2955,6	24,98	36,23	0,00003623	4,7556E-14	2,18073E-07	2,68
30	3752,3	22,17	36,60	0,0000366	4,90279E-14	2,21422E-07	2,64
31			36,65	0,00003665	4,92291E-14	2,21876E-07	2,63
32			36,83	0,00003683	4,9958E-14	2,23513E-07	2,61
33			37,03	0,00003703	5,07763E-14	2,25336E-07	2,59
34			37,05	0,00003705	5,08586E-14	2,25519E-07	2,59
35			37,07	0,00003707	5,0941E-14	2,25701E-07	2,59
36			37,26	0,00003726	5,17283E-14	2,27439E-07	2,57
37			37,31	0,00003731	5,19369E-14	2,27897E-07	2,56

	HV1	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, m$	$c3$	$c\ 3/2$	$K_{Ic}$
38			37,36	0,00003736	5,2146E-14	2,28355E-07	2,56
39			37,54	0,00003754	5,29033E-14	2,30007E-07	2,54
40			37,56	0,00003756	5,29879E-14	2,30191E-07	2,54
41			37,84	0,00003784	5,41818E-14	2,3277E-07	2,51
42			37,85	0,00003785	5,42248E-14	2,32862E-07	2,51
43	Prosječna tvrdoća		38,16	0,00003816	5,5568E-14	2,35729E-07	2,48
44	3312		38,29	0,00003829	5,61379E-14	2,36934E-07	2,47
45	Standardna devijacij		38,33	0,00003833	5,6314E-14	2,37306E-07	2,46
46	259		38,49	0,00003849	5,70222E-14	2,38793E-07	2,45
47			38,81	0,00003881	5,84562E-14	2,41777E-07	2,42
48	Prosječna žilavost K <sub>ic</sub>		39,04	0,00003904	5,95017E-14	2,4393E-07	2,40
49	2,71		39,20	0,0000392	6,02363E-14	2,45431E-07	2,38
50			39,23	0,00003923	6,03747E-14	2,45713E-07	2,38
51	Stand. dev žil. :		39,52	0,00003952	6,17235E-14	2,48442E-07	2,35
52	0,32		39,56	0,00003956	6,19111E-14	2,4882E-07	2,35
53			39,71	0,00003971	6,26181E-14	2,50236E-07	2,33
54			39,78	0,00003978	6,29498E-14	2,50898E-07	2,33
55			39,97	0,00003997	6,38561E-14	2,52698E-07	2,31
56			40,16	0,00004016	6,47711E-14	2,54502E-07	2,30
57			40,43	0,00004043	6,60863E-14	2,57072E-07	2,27
58			40,50	0,0000405	6,64301E-14	2,5774E-07	2,27
59			40,64	0,00004064	6,71214E-14	2,59078E-07	2,26
60			40,71	0,00004071	6,74688E-14	2,59748E-07	2,25

Tablica 10. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 29,43 N (HV3), za površinu završno poliranu s česticama 0,25  $\mu\text{m}$

	HV3	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, m$	$c3$	$c\ 3/2$	$K_{Ic}$
1	2716,5	45,13	60,25	0,00006025	2,18711E-13	4,67666E-07	3,83
2	2662,0	45,59	61,33	0,00006133	2,30685E-13	4,80297E-07	3,73
3	3622,8	39,08	64,52	0,00006452	2,68586E-13	5,18253E-07	3,46
4	3611,7	39,14	65,4	0,00006540	2,79726E-13	5,28892E-07	3,39
5	3589,6	39,26	67,32	0,00006732	3,05093E-13	5,52352E-07	3,24
6	3428,8	40,17	67,82	0,00006782	3,11942E-13	5,58517E-07	3,21
7	3428,8	40,17	68,23	0,00006823	3,17633E-13	5,6359E-07	3,18
8	3427,1	40,18	68,98	0,00006898	3,28223E-13	5,72908E-07	3,13
9	3427,1	40,18	71,2	0,00007120	3,60944E-13	6,00786E-07	2,98
10	3427,1	40,18	72,01	0,00007201	3,73404E-13	6,11068E-07	2,93
11	3415,2	40,25	72,19	0,00007219	3,76211E-13	6,1336E-07	2,92
12	3338,5	40,71	72,82	0,00007282	3,86146E-13	6,21407E-07	2,88
13	3323,7	40,8	73,88	0,00007388	4,03256E-13	6,35024E-07	2,82
14	3251,6	41,25	73,91	0,00007391	4,03747E-13	6,35411E-07	2,82
15	3250,0	41,26	74,69	0,00007469	4,16665E-13	6,45496E-07	2,78

	HV3	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, m$	$c3$	$c\ 3/2$	$K_{IC}$
16	2782,3	57,57	74,77	0,00007477	4,18006E-13	6,46534E-07	2,77
17	2833,3	57,05	75,51	0,00007551	4,3054E-13	6,56155E-07	2,73
18	3242,2	41,31	76,65	0,00007665	4,50336E-13	6,71071E-07	2,67
19	3163,6	41,82	76,72	0,00007672	4,51571E-13	6,7199E-07	2,67
20	3154,5	41,88	77,09	0,00007709	4,58136E-13	6,76857E-07	2,65
21	3142,5	41,96	77,61	0,00007761	4,67469E-13	6,83717E-07	2,62
22	3133,5	42,02	77,66	0,00007766	4,68373E-13	6,84378E-07	2,62
23	3083,4	42,36	78,26	0,00007826	4,79313E-13	6,92325E-07	2,59
24	3009,1	42,88	78,59	0,00007859	4,85402E-13	6,96708E-07	2,57
25	3007,7	42,89	78,88	0,00007888	4,90796E-13	7,00568E-07	2,56
26	2997,9	42,96	79,25	0,00007925	4,97735E-13	7,05503E-07	2,54
27	2934,7	43,42	79,32	0,00007932	4,99055E-13	7,06438E-07	2,54
28	2930,7	43,45	79,85	0,00007985	5,09125E-13	7,1353E-07	2,51
29	2918,6	43,54	80,05	0,00008005	5,12961E-13	7,16213E-07	2,50
30	2786,5	44,56	80,33	0,00008033	5,18362E-13	7,19974E-07	2,49
31			80,34	0,00008034	5,18556E-13	7,20108E-07	2,49
32			80,44	0,00008044	5,20495E-13	7,21453E-07	2,48
33			80,75	0,00008075	5,26535E-13	7,25628E-07	2,47
34			80,87	0,00008087	5,28886E-13	7,27246E-07	2,46
35			80,87	0,00008087	5,28886E-13	7,27246E-07	2,46
36			81,52	0,00008152	5,41742E-13	7,36031E-07	2,43
37			81,76	0,00008176	5,46541E-13	7,39284E-07	2,42
38			81,99	0,00008199	5,51166E-13	7,42406E-07	2,41
39			82	0,00008200	5,51368E-13	7,42542E-07	2,41
40			82,07	0,00008207	5,52781E-13	7,43493E-07	2,41
41			82,41	0,00008241	5,5968E-13	7,48118E-07	2,40
42			82,45	0,00008245	5,60495E-13	7,48662E-07	2,39
43	Prosječna tvrdoća		82,62	0,00008262	5,63969E-13	7,50979E-07	2,39
44	3168,0		82,71	0,00008271	5,65814E-13	7,52206E-07	2,38
45	Standardna devijacij		83,18	0,00008318	5,75515E-13	7,58627E-07	2,36
46	274,2		84,42	0,00008442	6,01639E-13	7,75654E-07	2,31
47			84,63	0,00008463	6,0614E-13	7,7855E-07	2,30
48	Prosječna žilav. Kic:		85,83	0,00008583	6,32291E-13	7,95168E-07	2,25
49	2,58		86,3	0,00008630	6,42736E-13	8,01708E-07	2,24
50			86,31	0,00008631	6,42959E-13	8,01847E-07	2,23
51	Stand. dev. žil.:		86,9	0,00008690	6,56235E-13	8,10083E-07	2,21
52	0,41		87,52	0,00008752	6,70381E-13	8,18768E-07	2,19
53			89,11	0,00008911	7,07586E-13	8,41181E-07	2,13
54			89,68	0,00008968	7,21252E-13	8,49265E-07	2,11
55			89,99	0,00008999	7,28757E-13	8,53673E-07	2,10
56			90,3	0,00009030	7,36314E-13	8,58088E-07	2,09
57			91,19	0,00009119	7,58301E-13	8,70805E-07	2,06
58			91,85	0,00009185	7,74885E-13	8,80276E-07	2,04
59			92,5	0,00009250	7,91453E-13	8,89637E-07	2,01
60			93,26	0,00009326	8,11122E-13	9,00623E-07	1,99

Tablica 11. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 49,05 N (HV5), za površinu završno poliranu s česticama 0,25  $\mu\text{m}$

	HV5	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, m$	$c3$	$c\ 3/2$	$K_{Ic}$
1	2541,1	60,24	84,12	0,00008412	5,95248E-13	7,7152E-07	3,91
2	2634,8	59,16	86,78	0,00008678	6,5352E-13	8,0841E-07	3,74
3	2839,2	56,99	87,01	0,00008701	6,5873E-13	8,1162E-07	3,72
4	3542,5	51,02	87,93	0,00008793	6,79847E-13	8,2453E-07	3,66
5	3537,0	51,06	90,41	0,00009041	7,39008E-13	8,5966E-07	3,51
6	2833,3	57,05	95,12	0,00009512	8,60628E-13	9,277E-07	3,26
7	3468,7	51,56	96,86	0,00009686	9,08727E-13	9,5327E-07	3,17
8	3467,4	51,57	96,94	0,00009694	9,1098E-13	9,5445E-07	3,16
9	3397,2	52,1	99,03	0,00009903	9,71181E-13	9,8549E-07	3,06
10	3395,9	52,11	99,85	0,00009985	9,95507E-13	9,9775E-07	3,03
11	3395,9	52,11	100	0,00010000	1E-12	0,000001	3,02
12	3395,9	52,11	100,96	0,00010096	1,02908E-12	1,0144E-06	2,98
13	3390,7	52,15	101,59	0,00010159	1,04846E-12	1,0239E-06	2,95
14	3326,6	52,65	101,63	0,00010163	1,0497E-12	1,0245E-06	2,95
15	3325,3	52,66	104,21	0,00010421	1,13169E-12	1,0638E-06	2,84
16	3254,5	53,23	104,93	0,00010493	1,15531E-12	1,0749E-06	2,81
17	3238,7	53,36	105,2	0,00010520	1,16425E-12	1,079E-06	2,80
18	3194,2	53,73	105,56	0,00010556	1,17625E-12	1,0845E-06	2,78
19	3129,8	54,28	106,11	0,00010611	1,19473E-12	1,093E-06	2,76
20	3068,4	54,82	106,43	0,00010643	1,20557E-12	1,098E-06	2,75
21	3068,4	54,82	106,47	0,00010647	1,20693E-12	1,0986E-06	2,75
22	3068,4	54,82	107,06	0,00010706	1,2271E-12	1,1077E-06	2,73
23	2951,0	55,9	109,83	0,00010983	1,32484E-12	1,151E-06	2,62
24	2951,0	55,9	109,86	0,00010986	1,32592E-12	1,1515E-06	2,62
25	2923,8	56,16	111,2	0,00011120	1,37504E-12	1,1726E-06	2,58
26	2839,2	56,99	112,5	0,00011250	1,42383E-12	1,1932E-06	2,53
27	2833,3	57,05	112,92	0,00011292	1,43983E-12	1,1999E-06	2,52
28	2782,3	57,57	113,09	0,00011309	1,44635E-12	1,2026E-06	2,51
29	2634,8	59,16	113,4	0,00011340	1,45827E-12	1,2076E-06	2,50
30	2541,1	60,24	115,58	0,00011558	1,544E-12	1,2426E-06	2,43
31			117,1	0,00011710	1,60572E-12	1,2672E-06	2,38
32			118,47	0,00011847	1,66274E-12	1,2895E-06	2,34
33			118,86	0,00011886	1,67922E-12	1,2958E-06	2,33
34			119,56	0,00011956	1,70906E-12	1,3073E-06	2,31
35			119,61	0,00011961	1,71121E-12	1,3081E-06	2,31
36			120,22	0,00012022	1,73752E-12	1,3182E-06	2,29
37			120,38	0,00012038	1,74447E-12	1,3208E-06	2,29
38			120,59	0,00012059	1,75361E-12	1,3242E-06	2,28
39			120,73	0,00012073	1,75973E-12	1,3265E-06	2,28
40			121,03	0,00012103	1,77288E-12	1,3315E-06	2,27

	HV5	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	C1, m	c3	c 3/2	$K_{Ic}$
41			121,34	0,00012134	1,78654E-12	1,3366E-06	2,26
42			122,51	0,00012251	1,83872E-12	1,356E-06	2,23
43	Prosječna tvrdoća		123,05	0,00012305	1,86314E-12	1,365E-06	2,21
44	3099,0		123,32	0,00012332	1,87543E-12	1,3695E-06	2,21
45	Standardna devijacij		123,37	0,00012337	1,87771E-12	1,3703E-06	2,20
46	308,7		123,46	0,00012346	1,88182E-12	1,3718E-06	2,20
47			124,09	0,00012409	1,91078E-12	1,3823E-06	2,18
48	Pros. žilavost Kic:		124,2	0,00012420	1,91586E-12	1,3841E-06	2,18
49	2,17		124,66	0,00012466	1,93723E-12	1,3918E-06	2,17
50			125,37	0,00012537	1,97052E-12	1,4038E-06	2,15
51	Stand. dev. žil. :		125,47	0,00012547	1,97524E-12	1,4054E-06	2,15
52	0,49		125,6	0,00012560	1,98139E-12	1,4076E-06	2,15
53			125,94	0,00012594	1,99752E-12	1,4133E-06	2,14
54			126,52	0,00012652	2,02524E-12	1,4231E-06	2,12
55			127,68	0,00012768	2,08146E-12	1,4427E-06	2,09
56			129,8	0,00012980	2,18688E-12	1,4788E-06	2,04
57			130,48	0,00013048	2,22143E-12	1,4904E-06	2,03
58			132,25	0,00013225	2,31306E-12	1,5209E-06	1,99
59			132,56	0,00013256	2,32936E-12	1,5262E-06	1,98
60			133,06	0,00013306	2,35582E-12	1,5349E-06	1,97

Tablica 12. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 9,81 N (HV1), za površinu završno poliranu s česticama od 3  $\mu\text{m}$

	HV1	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	C1, m	c3	c 3/2	$K_{Ic}$
1	4202,027	20,95	47,4	0,0000474	1,06496E-13	3,26338E-07	1,78
2	3923,813	21,68	45,05	4,505E-05	9,14291E-14	3,02372E-07	1,92
3	3722,001	22,26	44,59	4,459E-05	8,86569E-14	2,97753E-07	1,95
4	3649,507	22,48	43,83	4,383E-05	8,42004E-14	2,90173E-07	2,01
5	3607,661	22,61	42,85	4,285E-05	7,86778E-14	2,80496E-07	2,07
6	3572,812	22,72	42,77	4,277E-05	7,8238E-14	2,79711E-07	2,08
7	3462,225	23,08	41,95	4,195E-05	7,38237E-14	2,71705E-07	2,14
8	3456,232	23,1	41,64	4,164E-05	7,21992E-14	2,68699E-07	2,17
9	3438,347	23,16	41,64	4,164E-05	7,21992E-14	2,68699E-07	2,17
10	3385,518	23,34	40,83	4,083E-05	6,80672E-14	2,60897E-07	2,23
11	3379,724	23,36	27,53	2,753E-05	2,0865E-14	1,44447E-07	4,03
12	3373,944	23,38	27,79	2,779E-05	2,14618E-14	1,46498E-07	3,97
13	3368,179	23,4	29,05	2,905E-05	2,45154E-14	1,56574E-07	3,72
14	3316,953	23,58	29,07	2,907E-05	2,4566E-14	1,56736E-07	3,71
15	3291,777	23,67	29,46	2,946E-05	2,55681E-14	1,599E-07	3,64
16	3291,777	23,67	29,72	2,972E-05	2,6251E-14	1,62022E-07	3,59

	HV1	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, m$	$c3$	$c 3/2$	$K_{Ic}$
17	3283,448	23,7	29,97	2,997E-05	2,69191E-14	1,6407E-07	3,55
18	3283,448	23,7	29,98	2,998E-05	2,6946E-14	1,64152E-07	3,55
19	3255,914	23,8	30,18	3,018E-05	2,74889E-14	1,65798E-07	3,51
20	3239,56	23,86	30,74	3,074E-05	2,90477E-14	1,70434E-07	3,41
21	3215,258	23,95	31,01	3,101E-05	2,98198E-14	1,72684E-07	3,37
22	3209,895	23,97	31,02	3,102E-05	2,98487E-14	1,72768E-07	3,37
23	3183,279	24,07	31,03	3,103E-05	2,98776E-14	1,72851E-07	3,37
24	3080,058	24,47	31,03	3,103E-05	2,98776E-14	1,72851E-07	3,37
25	3052,552	24,58	31,81	3,181E-05	3,21878E-14	1,7941E-07	3,24
26	3027,865	24,68	32,47	3,247E-05	3,42332E-14	1,85022E-07	3,15
27	3025,413	24,69	32,66	3,266E-05	3,48376E-14	1,86648E-07	3,12
28	2950,848	25	32,98	3,298E-05	3,58717E-14	1,89398E-07	3,07
29	2946,132	25,02	33,17	3,317E-05	3,64953E-14	1,91037E-07	3,05
30	2941,428	25,04	33,28	3,328E-05	3,68595E-14	1,91988E-07	3,03
31			33,39	3,339E-05	3,72262E-14	1,92941E-07	3,02
32			33,73	3,373E-05	3,83751E-14	1,95896E-07	2,97
33			33,89	3,389E-05	3,89238E-14	1,97291E-07	2,95
34			34,2	0,0000342	4,00017E-14	2,00004E-07	2,91
35			34,26	3,426E-05	4,02126E-14	2,00531E-07	2,90
36			34,26	3,426E-05	4,02126E-14	2,00531E-07	2,90
37			34,4	0,0000344	4,07076E-14	2,01761E-07	2,88
38			34,56	3,456E-05	4,12782E-14	2,0317E-07	2,86
39			34,84	3,484E-05	4,22897E-14	2,05645E-07	2,83
40			35,01	3,501E-05	4,29118E-14	2,07152E-07	2,81
41			35,09	3,509E-05	4,32066E-14	2,07862E-07	2,80
42			35,11	3,511E-05	4,32805E-14	2,0804E-07	2,80
43	Prosječna tvrdoća		35,17	3,517E-05	4,35028E-14	2,08573E-07	2,79
44	3338		35,29	3,529E-05	4,39496E-14	2,09642E-07	2,78
45	Standardna devijacij		35,46	3,546E-05	4,45878E-14	2,11158E-07	2,76
46	287		35,76	3,576E-05	4,57291E-14	2,13844E-07	2,72
47			36,18	3,618E-05	4,73593E-14	2,17622E-07	2,67
48	Pros. žil. Kic:		36,23	3,623E-05	4,7556E-14	2,18073E-07	2,67
49	3,15		36,41	3,641E-05	4,82683E-14	2,197E-07	2,65
50			36,45	3,645E-05	4,84276E-14	2,20063E-07	2,64
51	Stand. dev. žil.:		29,07	2,907E-05	2,4566E-14	1,56736E-07	3,71
52	0,78		29,05	2,905E-05	2,45154E-14	1,56574E-07	3,72
53			27,79	2,779E-05	2,14618E-14	1,46498E-07	3,97
54			27,53	2,753E-05	2,0865E-14	1,44447E-07	4,03
55			27,27	2,727E-05	2,02794E-14	1,42406E-07	4,09
56			26,87	2,687E-05	1,94001E-14	1,39284E-07	4,18
57			26,02	2,602E-05	1,76166E-14	1,32728E-07	4,38
58			25,2	0,0000252	1,6003E-14	1,26503E-07	4,60
59			22,72	2,272E-05	1,1728E-14	1,08296E-07	5,37
60			22,2	0,0000222	1,0941E-14	1,04599E-07	5,56

Tablica 13. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 29,43 N (HV3), za površinu završno poliranu s česticama od 3  $\mu\text{m}$

	HV3	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, m$	$c3$	$c\ 3/2$	$K_{Ic}$
1	3399,98	40,34	99,36	0,00009936	9,80923E-13	9,90415E-07	1,82
2	3127,588	42,06	92,79	0,00009279	7,9892E-13	8,93823E-07	2,02
3	2986,782	43,04	86,62	0,00008662	6,49912E-13	8,06171E-07	2,24
4	3002,108	42,93	85,96	0,00008596	6,35169E-13	7,96975E-07	2,26
5	3399,98	40,34	85,67	0,00008567	6,28762E-13	7,92945E-07	2,28
6	3388,211	40,41	85,48	0,00008548	6,24588E-13	7,90309E-07	2,28
7	3269,035	41,14	85,48	0,00008548	6,24588E-13	7,90309E-07	2,28
8	3154,531	41,88	84,26	0,00008426	5,98225E-13	7,7345E-07	2,33
9	3379,842	40,46	84,26	0,00008426	5,98225E-13	7,7345E-07	2,33
10	3280,188	41,07	82,29	0,00008229	5,57239E-13	7,46484E-07	2,42
11	3027,442	42,75	82,29	0,00008229	5,57239E-13	7,46484E-07	2,42
12	3489,359	39,82	82,26	0,00008226	5,56629E-13	7,46076E-07	2,42
13	3124,616	42,08	82,26	0,00008226	5,56629E-13	7,46076E-07	2,42
14	3379,842	40,46	81,46	0,00008146	5,40547E-13	7,35219E-07	2,46
15	3047,369	42,61	81,46	0,00008146	5,40547E-13	7,35219E-07	2,46
16	3063,164	42,5	80,96	0,00008096	5,30654E-13	7,2846E-07	2,48
17	3074,729	42,42	80,96	0,00008096	5,30654E-13	7,2846E-07	2,48
18	3180,297	41,71	80,37	0,00008037	5,19137E-13	7,20512E-07	2,51
19	2834,632	44,18	79,95	0,00007995	5,11041E-13	7,14871E-07	2,52
20	2865,682	43,94	79,95	0,00007995	5,11041E-13	7,14871E-07	2,52
21	2887,986	43,77	79,92	0,00007992	5,10466E-13	7,14469E-07	2,53
22	2889,306	43,76	79,92	0,00007992	5,10466E-13	7,14469E-07	2,53
23	2905,217	43,64	79,26	0,00007926	4,97923E-13	7,05637E-07	2,56
24	2907,882	43,62	79,26	0,00007926	4,97923E-13	7,05637E-07	2,56
25	2911,886	43,59	77,19	0,00007719	4,59921E-13	6,78175E-07	2,66
26	2913,223	43,58	76,54	0,00007654	4,484E-13	6,69627E-07	2,70
27	2918,578	43,54	73,08	0,00007308	3,90297E-13	6,24738E-07	2,89
28	3489,359	39,82	73,07	0,00007307	3,90137E-13	6,2461E-07	2,89
29	3399,98	40,34	71,91	0,00007191	3,7185E-13	6,09795E-07	2,96
30	2978,472	43,1	71,56	0,00007156	3,66447E-13	6,05349E-07	2,98
31			71,56	0,00007156	3,66447E-13	6,05349E-07	2,98
32			71,32	0,00007132	3,62772E-13	6,02306E-07	3,00
33			71	0,000071	3,57911E-13	5,98257E-07	3,02
34			70,47	0,00007047	3,49955E-13	5,9157E-07	3,05
35			70,37	0,00007037	3,48468E-13	5,90312E-07	3,06
36			69,44	0,00006944	3,34834E-13	5,78648E-07	3,12
37			68,95	0,00006895	3,27795E-13	5,72534E-07	3,15
38			68,76	0,00006876	3,25093E-13	5,70169E-07	3,17
39			68,69	0,00006869	3,24101E-13	5,69299E-07	3,17
40			68,69	0,00006869	3,24101E-13	5,69299E-07	3,17



	HV3	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, m$	$c3$	$c\ 3/2$	$K_{Ic}$
41			68,46	0,00006846	3,20856E-13	5,66442E-07	3,19
42			68,35	0,00006835	3,19312E-13	5,65077E-07	3,19
43	Prosječna tvrdoća		66,42	0,00006642	2,9302E-13	5,41313E-07	3,33
44	3123		66,42	0,00006642	2,9302E-13	5,41313E-07	3,33
45	Standardna devijacij		66,35	0,00006635	2,92094E-13	5,40457E-07	3,34
46	212		66,24	0,00006624	2,90644E-13	5,39114E-07	3,35
47			66,13	0,00006613	2,89198E-13	5,37772E-07	3,36
48	Prosječna žil. Kic:		66,13	0,00006613	2,89198E-13	5,37772E-07	3,36
49	2,92		65,9	0,0000659	2,86191E-13	5,34968E-07	3,37
50			65,71	0,00006571	2,83723E-13	5,32656E-07	3,39
51	Stand. dev. žil.:		64,5	0,0000645	2,68336E-13	5,18012E-07	3,48
52	0,53		63,85	0,00006385	2,60305E-13	5,10201E-07	3,54
53			63,73	0,00006373	2,5884E-13	5,08763E-07	3,55
54			63,45	0,00006345	2,55444E-13	5,05414E-07	3,57
55			63,07	0,00006307	2,50881E-13	5,00881E-07	3,60
56			61,52	0,00006152	2,32835E-13	4,8253E-07	3,74
57			60,29	0,00006029	2,19147E-13	4,68132E-07	3,86
58			60,06	0,00006006	2,16649E-13	4,65455E-07	3,88
59			59,7	0,0000597	2,12776E-13	4,61277E-07	3,91
60			59,47	0,00005947	2,10326E-13	4,58614E-07	3,94

Tablica 14. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 49,05 N (HV5), za površinu završno poliranu s česticama od 3  $\mu\text{m}$

	HV5	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, m$	$c3$	$c\ 3/2$	$K_{Ic}$
1	3335,46	52,58	129,97	0,00013	2,19548E-12	1,48172E-06	2,03
2	3276,62	53,05	128,69	0,000129	2,13125E-12	1,45988E-06	2,06
3	3249,612	53,27	126,57	0,000127	2,02765E-12	1,42395E-06	2,12
4	3216,919	53,54	125,89	0,000126	1,99514E-12	1,41249E-06	2,13
5	3212,118	53,58	123,27	0,000123	1,87315E-12	1,36863E-06	2,20
6	3168,21	53,95	122,16	0,000122	1,823E-12	1,35019E-06	2,23
7	3162,346	54	121,24	0,000121	1,78212E-12	1,33496E-06	2,26
8	3155,33	54,06	120,97	0,000121	1,77024E-12	1,33051E-06	2,26
9	3130,958	54,27	119,89	0,00012	1,72325E-12	1,31273E-06	2,29
10	3130,958	54,27	119,61	0,00012	1,71121E-12	1,30813E-06	2,30
11	3122,897	54,34	119,26	0,000119	1,69623E-12	1,30239E-06	2,31
12	3100,035	54,54	118,8	0,000119	1,67668E-12	1,29487E-06	2,33
13	3061,742	54,88	118,6	0,000119	1,66822E-12	1,2916E-06	2,33
14	3061,742	54,88	117,05	0,000117	1,60367E-12	1,26636E-06	2,38
15	2993,718	55,5	115,93	0,000116	1,55807E-12	1,24823E-06	2,41
16	2986,181	55,57	87,8	8,78E-05	6,76836E-13	8,22701E-07	3,66
17	2986,181	55,57	89,31	8,93E-05	7,12361E-13	8,44015E-07	3,57

	HV5	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, m$	$c3$	$c\ 3/2$	$K_{Ic}$
18	2984,032	55,59	90,26	9,03E-05	7,35336E-13	8,57518E-07	3,51
19	2974,393	55,68	90,82	9,08E-05	7,49108E-13	8,6551E-07	3,48
20	2960,553	55,81	91,03	9,1E-05	7,54317E-13	8,68514E-07	3,47
21	2928,979	56,11	91,99	9,2E-05	7,78434E-13	8,82289E-07	3,41
22	2884,598	56,54	93,08	9,31E-05	8,06435E-13	8,98017E-07	3,35
23	3212,118	53,58	93,79	9,38E-05	8,2503E-13	9,08311E-07	3,32
24	2850,215	56,88	95,45	9,55E-05	8,69617E-13	9,32532E-07	3,23
25	2802,713	57,36	96,36	9,64E-05	8,94727E-13	9,459E-07	3,18
26	2802,713	57,36	96,64	9,66E-05	9,02549E-13	9,50026E-07	3,17
27	2802,713	57,36	97,77	9,78E-05	9,34581E-13	9,66737E-07	3,12
28	3168,21	53,95	98,8	9,88E-05	9,6443E-13	9,82054E-07	3,07
29	3637,457	50,35	98,85	9,89E-05	9,65895E-13	9,828E-07	3,06
30	4100,849	47,42	98,87	9,89E-05	9,66482E-13	9,83098E-07	3,06
31			99,26	9,93E-05	9,77964E-13	9,88921E-07	3,05
32			99,96	1E-04	9,988E-13	9,994E-07	3,01
33			100,49	0,0001	1,01477E-12	1,00736E-06	2,99
34			100,74	0,000101	1,02236E-12	1,01112E-06	2,98
35			101,7	0,000102	1,05187E-12	1,02561E-06	2,94
36			102,08	0,000102	1,06371E-12	1,03136E-06	2,92
37			102,28	0,000102	1,06997E-12	1,03439E-06	2,91
38			102,47	0,000102	1,07595E-12	1,03728E-06	2,90
39			102,67	0,000103	1,08226E-12	1,04032E-06	2,90
40			102,82	0,000103	1,08701E-12	1,0426E-06	2,89
41			103,53	0,000104	1,10968E-12	1,05341E-06	2,86
42			104,13	0,000104	1,12909E-12	1,06259E-06	2,83
43	Prosječna tvrdoća		105,47	0,000105	1,17324E-12	1,08316E-06	2,78
44	3115		105,47	0,000105	1,17324E-12	1,08316E-06	2,78
45	Standardna devijacij		106,38	0,000106	1,20387E-12	1,09721E-06	2,75
46	259		108,35	0,000108	1,272E-12	1,12783E-06	2,67
47			108,72	0,000109	1,28507E-12	1,13361E-06	2,66
48	Prosje. žil. Kic:		108,86	0,000109	1,29005E-12	1,1358E-06	2,65
49	2,76		109,09	0,000109	1,29824E-12	1,1394E-06	2,64
50			109,35	0,000109	1,30754E-12	1,14348E-06	2,63
51	Stand. dev. žil.:		110,07	0,00011	1,33354E-12	1,15479E-06	2,61
52	0,42		110,7	0,000111	1,35657E-12	1,16472E-06	2,59
53			110,88	0,000111	1,3632E-12	1,16756E-06	2,58
54			111,49	0,000111	1,38582E-12	1,17721E-06	2,56
55			111,77	0,000112	1,39629E-12	1,18165E-06	2,55
56			111,83	0,000112	1,39854E-12	1,1826E-06	2,55
57			111,89	0,000112	1,40079E-12	1,18355E-06	2,55
58			112,38	0,000112	1,41928E-12	1,19133E-06	2,53
59			112,53	0,000113	1,42497E-12	1,19372E-06	2,52
60			114,01	0,000114	1,48193E-12	1,21735E-06	2,47

Tablica 15. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 9,81 N (HV1), za površinu završno poliranu s česticama od 6  $\mu\text{m}$

	HV1	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C_1, m$	$c_3$	$c_{3/2}$	$K_{Ic}$
1	3037,7	24,64	23,07	0,00002307	1,22784E-14	1,10808E-07	5,24
2	3115,6	24,33	23,17	0,00002317	1,24388E-14	1,11529E-07	5,21
3	3348,1	23,47	24,03	0,00002403	1,38759E-14	1,17796E-07	4,93
4	3317,0	23,58	24,25	0,00002425	1,42605E-14	1,19417E-07	4,86
5	3025,4	24,69	25,49	0,00002549	1,65619E-14	1,28693E-07	4,51
6	3247,7	23,83	25,6	0,0000256	1,67772E-14	1,29527E-07	4,48
7	3848,9	21,89	26,79	0,00002679	1,92273E-14	1,38663E-07	4,19
8	3745,5	22,19	27,13	0,00002713	1,99687E-14	1,41311E-07	4,11
9	2979,4	24,88	27,14	0,00002714	1,99908E-14	1,41389E-07	4,11
10	3675,6	22,4	27,2	0,0000272	2,01236E-14	1,41858E-07	4,09
11	3643,0	22,5	27,47	0,00002747	2,07289E-14	1,43975E-07	4,03
12	3610,9	22,6	27,55	0,00002755	2,09105E-14	1,44605E-07	4,01
13	3576,0	22,71	28,07	0,00002807	2,21171E-14	1,48718E-07	3,90
14	3576,0	22,71	28,25	0,00002825	2,25453E-14	1,50151E-07	3,87
15	3529,2	22,86	28,81	0,00002881	2,39128E-14	1,54638E-07	3,75
16	3507,7	22,93	29,06	0,00002906	2,45407E-14	1,56655E-07	3,71
17	3507,7	22,93	29,08	0,00002908	2,45914E-14	1,56816E-07	3,70
18	3498,5	22,96	29,58	0,00002958	2,58818E-14	1,60878E-07	3,61
19	3453,2	23,11	29,67	0,00002967	2,61188E-14	1,61613E-07	3,59
20	3438,3	23,16	29,93	0,00002993	2,68114E-14	1,63742E-07	3,55
21	3391,3	23,32	30,6	0,0000306	2,86526E-14	1,69271E-07	3,43
22	3362,4	23,42	30,65	0,00003065	2,87933E-14	1,69686E-07	3,42
23	3348,1	23,47	30,7	0,0000307	2,89344E-14	1,70101E-07	3,41
24	3317,0	23,58	31,11	0,00003111	3,01093E-14	1,7352E-07	3,35
25	3247,7	23,83	32,25	0,00003225	3,3542E-14	1,83145E-07	3,17
26	3123,3	24,3	32,36	0,00003236	3,38864E-14	1,84083E-07	3,15
27	3115,6	24,33	32,51	0,00003251	3,43598E-14	1,85364E-07	3,13
28	3037,7	24,64	32,68	0,00003268	3,49017E-14	1,8682E-07	3,11
29	3025,4	24,69	33,15	0,00003315	3,64293E-14	1,90865E-07	3,04
30	2979,4	24,88	33,18	0,00003318	3,65283E-14	1,91124E-07	3,04
31			33,28	0,00003328	3,68595E-14	1,91988E-07	3,02
32			33,36	0,00003336	3,7126E-14	1,92681E-07	3,01
33			33,52	0,00003352	3,76628E-14	1,94069E-07	2,99
34			34,27	0,00003427	4,02478E-14	2,00619E-07	2,89
35			34,38	0,00003438	4,06366E-14	2,01585E-07	2,88
36			34,61	0,00003461	4,14577E-14	2,03612E-07	2,85
37			34,71	0,00003471	4,18181E-14	2,04495E-07	2,84
38			35,06	0,00003506	4,30959E-14	2,07595E-07	2,80
39			35,18	0,00003518	4,35399E-14	2,08662E-07	2,78
40			35,18	0,00003518	4,35399E-14	2,08662E-07	2,78

	HV1	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, m$	$c3$	$c\ 3/2$	$K_{Ic}$
41			35,2	0,0000352	4,36142E-14	2,0884E-07	2,78
42			35,64	0,00003564	4,52703E-14	2,12768E-07	2,73
43	Prosječna tvrdoća:		35,68	0,00003568	4,54229E-14	2,13126E-07	2,72
44	3354		36,04	0,00003604	4,68117E-14	2,1636E-07	2,68
45	Standardna devijacij		36,41	0,00003641	4,82683E-14	2,197E-07	2,64
46	246		36,49	0,00003649	4,85872E-14	2,20425E-07	2,63
47			36,58	0,00003658	4,89476E-14	2,21241E-07	2,62
48			36,79	0,00003679	4,97954E-14	2,23149E-07	2,60
49	Prosječna žil. Kic:		36,87	0,00003687	5,0121E-14	2,23877E-07	2,59
50	3,26		36,93	0,00003693	5,03661E-14	2,24424E-07	2,59
51			37,08	0,00003708	5,09823E-14	2,25793E-07	2,57
52	Stand. dev. žil. :		37,09	0,00003709	5,10235E-14	2,25884E-07	2,57
53	0,76		37,41	0,00003741	5,23556E-14	2,28813E-07	2,54
54			38,08	0,00003808	5,52193E-14	2,34988E-07	2,47
55			38,26	0,00003826	5,6006E-14	2,36656E-07	2,45
56			38,44	0,00003844	5,68002E-14	2,38328E-07	2,44
57			38,45	0,00003845	5,68446E-14	2,38421E-07	2,44
58			38,52	0,00003852	5,71556E-14	2,39072E-07	2,43
59			38,71	0,00003871	5,80055E-14	2,40843E-07	2,41
60			39,08	0,00003908	5,96848E-14	2,44305E-07	2,38

Tablica 16. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 23,43 N (HV3), za površinu završno poliranu s česticama od 6  $\mu\text{m}$

	HV3	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, m$	$c3$	$c\ 3/2$	$K_{Ic}$
1	3622,8	39,08	42,91	0,00004291	7,90088E-14	2,81085E-07	6,38
2	3524,7	39,62	43,5	0,0000435	8,23129E-14	2,86902E-07	6,25
3	3430,5	40,16	46,41	0,00004641	9,99619E-14	3,16168E-07	5,68
4	3338,5	40,71	49,58	0,00004958	1,21876E-13	3,49108E-07	5,14
5	3338,5	40,71	51,61	0,00005161	1,37468E-13	3,70767E-07	4,84
6	3336,8	40,72	52,38	0,00005238	1,43713E-13	3,79095E-07	4,73
7	3336,8	40,72	54,84	0,00005484	1,64927E-13	4,06112E-07	4,42
8	3333,5	40,74	57,95	0,00005795	1,94608E-13	4,41144E-07	4,07
9	3251,6	41,25	59,18	0,00005918	2,07264E-13	4,55263E-07	3,94
10	3250,0	41,26	59,2	0,0000592	2,07475E-13	4,55494E-07	3,94
11	3242,2	41,31	59,7	0,0000597	2,12776E-13	4,61277E-07	3,89
12	3242,2	41,31	60,05	0,00006005	2,1654E-13	4,65339E-07	3,86
13	3242,2	41,31	62,06	0,00006206	2,39021E-13	4,88897E-07	3,67
14	3206,4	41,54	63,15	0,00006315	2,51837E-13	5,01834E-07	3,58
15	3168,1	41,79	63,65	0,00006365	2,57867E-13	5,07806E-07	3,53
16	3166,6	41,8	64,19	0,00006419	2,64486E-13	5,14282E-07	3,49
17	3159,1	41,85	64,78	0,00006478	2,71846E-13	5,21388E-07	3,44

	HV3	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	C1, m	c3	c 3/2	$K_{Ic}$
18	3086,4	42,34	64,81	0,00006481	2,72224E-13	5,21751E-07	3,44
19	3086,4	42,34	67,19	0,00006719	3,03329E-13	5,50753E-07	3,26
20	3084,9	42,35	67,41	0,00006741	3,06318E-13	5,5346E-07	3,24
21	3083,4	42,36	67,52	0,00006752	3,0782E-13	5,54816E-07	3,23
22	3009,1	42,88	67,52	0,00006752	3,0782E-13	5,54816E-07	3,23
23	3007,7	42,89	67,61	0,00006761	3,09053E-13	5,55925E-07	3,23
24	2934,7	43,42	68,08	0,00006808	3,15543E-13	5,61732E-07	3,19
25	2934,7	43,42	68,77	0,00006877	3,25235E-13	5,70294E-07	3,15
26	2934,7	43,42	68,94	0,00006894	3,27653E-13	5,7241E-07	3,13
27	2930,7	43,45	69,14	0,00006914	3,30513E-13	5,74902E-07	3,12
28	2860,5	43,98	69,94	0,00006994	3,42119E-13	5,84909E-07	3,07
29	2859,2	43,99	70,86	0,00007086	3,55798E-13	5,96488E-07	3,01
30	2794,0	44,5	72,38	0,00007238	3,79189E-13	6,15783E-07	2,91
31			72,53	0,00007253	3,81551E-13	6,17698E-07	2,90
32			75,14	0,00007514	4,24242E-13	6,51339E-07	2,75
33			75,68	0,00007568	4,33454E-13	6,58373E-07	2,73
34			75,84	0,00007584	4,36209E-13	6,60461E-07	2,72
35			76,22	0,00007622	4,42799E-13	6,65432E-07	2,70
36			76,94	0,00007694	4,55467E-13	6,74883E-07	2,66
37			77,16	0,00007716	4,59385E-13	6,77779E-07	2,65
38			77,38	0,00007738	4,63325E-13	6,8068E-07	2,64
39			78,52	0,00007852	4,84106E-13	6,95778E-07	2,58
40			78,58	0,00007858	4,85217E-13	6,96575E-07	2,58
41			79,81	0,00007981	5,08361E-13	7,12994E-07	2,52
42			80,51	0,00008051	5,21855E-13	7,22395E-07	2,48
43	Prosječna tvrdoća:		81,48	0,00008148	5,40945E-13	7,3549E-07	2,44
44	3160		81,85	0,00008185	5,48348E-13	7,40505E-07	2,42
45	Standardna devijacij		82,52	0,00008252	5,61924E-13	7,49616E-07	2,39
46	204		82,54	0,00008254	5,62333E-13	7,49889E-07	2,39
47			83,08	0,00008308	5,73442E-13	7,5726E-07	2,37
48			84,64	0,00008464	6,06355E-13	7,78688E-07	2,30
49	Prosječna žil. Kic:		84,88	0,00008488	6,11528E-13	7,82002E-07	2,29
50	3,14		85,27	0,00008527	6,19996E-13	7,87398E-07	2,28
51			86,04	0,00008604	6,36944E-13	7,98088E-07	2,25
52	Stand. dev. žil. :		86,2	0,0000862	6,40504E-13	8,00315E-07	2,24
53	1,00		86,49	0,00008649	6,4699E-13	8,04357E-07	2,23
54			88,35	0,00008835	6,89636E-13	8,30443E-07	2,16
55			88,36	0,00008836	6,8987E-13	8,30584E-07	2,16
56			88,39	0,00008839	6,90573E-13	8,31007E-07	2,16
57			88,55	0,00008855	6,9433E-13	8,33264E-07	2,15
58			88,59	0,00008859	6,95271E-13	8,33829E-07	2,15
59			88,67	0,00008867	6,97156E-13	8,34959E-07	2,15
60			89,56	0,00008956	7,1836E-13	8,47561E-07	2,12

Tablica 17. Prikaz dobivenih vrijednosti srednjih dijagonala ( $d_{sr}$ ) i veličina pukotina ( $c_1$ ) za opterećenje 49,05 N (HV5), za površinu završno poliranu s česticama od 6  $\mu\text{m}$

	HV5	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, \text{m}$	$c3$	$c_{3/2}$	$K_{Ic}$
1	3614,4	50,51	56,57	5,66E-05	1,81033E-13	4,2548E-07	7,05
2	3603,0	50,59	61,5	6,15E-05	2,32608E-13	4,82295E-07	6,22
3	3527,3	51,13	72,93	7,29E-05	3,87899E-13	6,22815E-07	4,81
4	3455,3	51,66	73,59	7,36E-05	3,98526E-13	6,31289E-07	4,75
5	3394,6	52,12	74	0,000074	4,05224E-13	6,36572E-07	4,71
6	3384,2	52,2	81,46	8,15E-05	5,40547E-13	7,35219E-07	4,08
7	3361,0	52,38	84,77	8,48E-05	6,09153E-13	7,80483E-07	3,84
8	3326,6	52,65	88,07	8,81E-05	6,831E-13	8,26498E-07	3,63
9	3316,5	52,73	89,7	8,97E-05	7,21734E-13	8,49549E-07	3,53
10	3305,2	52,82	91,16	9,12E-05	7,57553E-13	8,70375E-07	3,44
11	3259,4	53,19	93,99	9,4E-05	8,30319E-13	9,11218E-07	3,29
12	3210,9	53,59	99,6	9,96E-05	9,88048E-13	9,94006E-07	3,02
13	3175,3	53,89	100,06	0,0001	1,0018E-12	1,0009E-06	3,00
14	3153,0	54,08	100,69	0,000101	1,02084E-12	1,01037E-06	2,97
15	3112,6	54,43	101,09	0,000101	1,03306E-12	1,01639E-06	2,95
16	3102,3	54,52	101,11	0,000101	1,03367E-12	1,0167E-06	2,95
17	3092,1	54,61	101,84	0,000102	1,05622E-12	1,02773E-06	2,92
18	3078,5	54,73	102,09	0,000102	1,06402E-12	1,03151E-06	2,91
19	3070,7	54,8	103,9	0,000104	1,12162E-12	1,05907E-06	2,83
20	3070,7	54,8	104,02	0,000104	1,12551E-12	1,0609E-06	2,83
21	3011,1	55,34	104,23	0,000104	1,13234E-12	1,06412E-06	2,82
22	3002,4	55,42	104,52	0,000105	1,14182E-12	1,06856E-06	2,81
23	2953,1	55,88	105,2	0,000105	1,16425E-12	1,07901E-06	2,78
24	2945,8	55,95	105,29	0,000105	1,16724E-12	1,08039E-06	2,78
25	2927,9	56,12	106,46	0,000106	1,20659E-12	1,09845E-06	2,73
26	2908,2	56,31	106,51	0,000107	1,20829E-12	1,09922E-06	2,73
27	2881,5	56,57	106,92	0,000107	1,2223E-12	1,10558E-06	2,71
28	2863,3	56,75	108,38	0,000108	1,27306E-12	1,1283E-06	2,66
29	2633,0	59,18	108,46	0,000108	1,27588E-12	1,12955E-06	2,65
30	2586,4	59,71	108,59	0,000109	1,28047E-12	1,13158E-06	2,65
31			109,1	0,000109	1,2986E-12	1,13956E-06	2,63
32			110,02	0,00011	1,33173E-12	1,154E-06	2,60
33			110,06	0,00011	1,33318E-12	1,15463E-06	2,60
34			110,38	0,00011	1,34484E-12	1,15967E-06	2,59
35			110,72	0,000111	1,35731E-12	1,16504E-06	2,57
36			110,89	0,000111	1,36357E-12	1,16772E-06	2,57
37			112,56	0,000113	1,42611E-12	1,1942E-06	2,51
38			112,62	0,000113	1,42839E-12	1,19515E-06	2,51
39			112,92	0,000113	1,43983E-12	1,19993E-06	2,50
40			113,69	0,000114	1,46949E-12	1,21223E-06	2,47

	HV5	$d_{sr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$c_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	$C1, m$	$c3$	$c\ 3/2$	$K_{Ic}$
41			114,01	0,000114	1,48193E-12	1,21735E-06	2,46
42			114,31	0,000114	1,49366E-12	1,22216E-06	2,45
43	Prosječna tvrdoća:		114,48	0,000114	1,50034E-12	1,22488E-06	2,45
44	3144		114,66	0,000115	1,50743E-12	1,22777E-06	2,44
45	Standardna devijacij		114,67	0,000115	1,50782E-12	1,22793E-06	2,44
46	256		115,09	0,000115	1,52445E-12	1,23469E-06	2,43
47			115,9	0,000116	1,55686E-12	1,24774E-06	2,40
48			116,45	0,000116	1,57913E-12	1,25664E-06	2,39
49	Prosječna žil. Kic:		117,56	0,000118	1,62472E-12	1,27465E-06	2,35
50	2,93		117,75	0,000118	1,63261E-12	1,27774E-06	2,35
51			117,85	0,000118	1,63677E-12	1,27936E-06	2,34
52	Stand. dev. žil. :		117,95	0,000118	1,64094E-12	1,28099E-06	2,34
53	0,92		117,95	0,000118	1,64094E-12	1,28099E-06	2,34
54			118,67	0,000119	1,67118E-12	1,29274E-06	2,32
55			118,86	0,000119	1,67922E-12	1,29585E-06	2,31
56			118,98	0,000119	1,68431E-12	1,29781E-06	2,31
57			119,47	0,000119	1,7052E-12	1,30583E-06	2,30
58			121,09	0,000121	1,77552E-12	1,33249E-06	2,25
59			121,8	0,000122	1,80693E-12	1,34422E-06	2,23
60			122,35	0,000122	1,83152E-12	1,35334E-06	2,22

## 9. POPIS LITERATURE

- [1] [http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/keramika\\_korema92.pdf](http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/keramika_korema92.pdf)
- [2] <http://www.ffri.hr/~zvonimir/06%20Keramike.pdf>
- [3] <http://www.pfri.hr/~tomac/TMO/TMO%2016%20KERAMI%C8KI%20MATERIJALI.doc>
- [4] T. Filetin, I. Kramer : TEHNIČKA KERAMIKA priručnik za primjenu, Zagreb, 2004.
- [5] I. Martinek: Određivanje tvrdoće I lomne žilavosti silicij karbida (diplomski rad), Zagreb, 2008.
- [6] Kolemen, U.: Analysis of ISE in microhardness measurements of bulk MgB<sub>2</sub> superconductors using different models, *J. Alloys Compd.* **425**, 429-435 (2006).
- [7] Sahin, O.; Uzun, O.; Kolemen, U.; Ucar, N.: Vickers microindentation hardness studies of -Sn single crystal, *Mater. Characterization*, **58**, 197-204 (2007).
- [8] <http://bama.ua.edu/~mwear/courses/MechBeh/M02a.pdf>
- [9] Laugier, M. T.: Palmquist indentation crack analyses for toughness determination in WC–Co composites. *Key Eng. Mat.* **32**, 77–84 (1989).
- [10] De Moraes, M. C. C. de S. B.; Elias, C. N.; Filho, J. D.; De Oliveira, L. Mechanical properties of aliminia-zirconia composites for ceramic abutments, *Mater. Research*, Vol. 7, No. 4, 643-649, 2004
- [11] Chinn, R. E.: Ceramography Preparation and Analysis of Cearmic Microstructures, ASM Interantional, USA, 2002.
- [12] Ren, X. J.; Hooper, R. M.; Griffiths, C.; Henshall, J. L.: Indentation size effect in ceramics: correlation with H/E, *J. Mater. Sci. Let.* **22**, 1105-1106 (2003).
- [13] [http://www.morgantechnicalceramics.com/articles/CVD\\_SiC.html](http://www.morgantechnicalceramics.com/articles/CVD_SiC.html)
- [14] [http://www.fsb.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost\\_tehnickih\\_povrsina.pdf](http://www.fsb.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf)
- [15] [http://www.fsb.hr/NewsUpload/01\\_01\\_2009\\_6457\\_TTM2006-1.pdf](http://www.fsb.hr/NewsUpload/01_01_2009_6457_TTM2006-1.pdf)
- [16] [http://147.91.212.195/ZM/2007\(2\)/ZM\\_48\\_2\\_25.pdf](http://147.91.212.195/ZM/2007(2)/ZM_48_2_25.pdf)