

# Rezna keramika

---

**Nekić, Antonio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:162232>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-08**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Tehnički fakultet u Puli



**Antonio Nekić**

## **REZNA KERAMIKA**

Završni rad

Pula, srpanj, 2022. godine

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Tehnički fakultet u Puli



**Antonio Nekić**

## **REZNA KERAMIKA**

Završni rad

**JMB: 0069072704, izvanredni student**

**Studijski smjer: Preddiplomski stručni studij proizvodno strojarstvo**

**Predmet: Materijali I.**

**Znanstveno područje: Tehničke znanosti**

**Znanstveno polje: Strojarstvo**

**Znanstvena grana: Proizvodno strojarstvo**

**Mentor: doc.dr.sc. Vedrana Špada**

**Komentor: izv.prof.dr. sc. Dario Iljkić**

Pula, srpanj, 2022. godine

doc.dr.sc. Vedrana Špada  
(Ime i prezime nastavnika)



Tehnički fakultet u Puli

Materijali I.  
(Predmet)

**Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
TEHNIČKI FAKULTET U PULI  
ZADATAK TEME ZAVRŠNOGA RADA**

**Pristupniku/ci** Antonio Nekić **MBS:** 0069072704

**Studentu/ci stručnog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za završni rad – tema završnog rada pod nazivom:**

**Rezna keramika**

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o završnom radu Sveučilišta u Puli.

**Izvanredni, proizvodno strojarstvo**

*(izvanredni, proizvodno strojarstvo)*

**Datum:** 11.04.2022.

**Potpis nastavnika** doc.dr.sc. Vedrana Špada

**Potpis nastavnika** izv.prof.dr. sc. Dario Iljkić



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Antonio Nekić kandidat za prvostupnika proizvodnog strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student

---

U Puli, lipanj, 2022. godine



IZJAVA  
o korištenju autorskog djela

Ja, Antonio Nekić dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom „Rezna keramika“ koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, 04. srpanj 2022. godine

Student

---

## Sažetak

Ovim radom istražena je uloga tehničke keramike u procesu obrade odvajanjem čestica. Rad obuhvaća osvrt na alate za obradu odvajanjem čestica, gdje su navedeni standardni materijali za proizvodnju reznih alata, tipovi alata te tipovi trošenja alata tijekom procesa obrade. Prikazana je podjela keramike na tehničku i tradicionalnu keramiku, te su navedeni primjeri primjene tehničke keramike. Opisan je proces proizvodnje i oblikovanja tehničke keramike. Prikazana je detaljna podjela tehničke keramike koja se koristi u obradi odvajanjem čestica te su analizirana svojstva i strukturalna građa istih. Rad je zaključen osvrtom na globalno tržište u proizvodnji strojnom obradom.

Ključne riječi: tehnička keramika, proces obrade odvajanjem čestica, alati za obradu odvajanjem čestica, keramika

## Summary

This work deals with the role of technical ceramics in the manufacturing method of processing by separating particles. The paper includes a review of particle separation processing tools, where standard materials for the production of cutting tools, types of tools, and types of tool wear during the processing process are listed. The division of ceramics into technical and traditional ceramics is presented, and examples of the application of technical ceramics are given. The process of production and design of technical ceramics is described. The detailed division of technical ceramics used in particle separation processing is presented, and the properties and physical structure of them are analyzed. The work was concluded with a review of the global market in production by machining.

Keywords: technical ceramics, particle separation processing, particle separation processing tools, ceramics



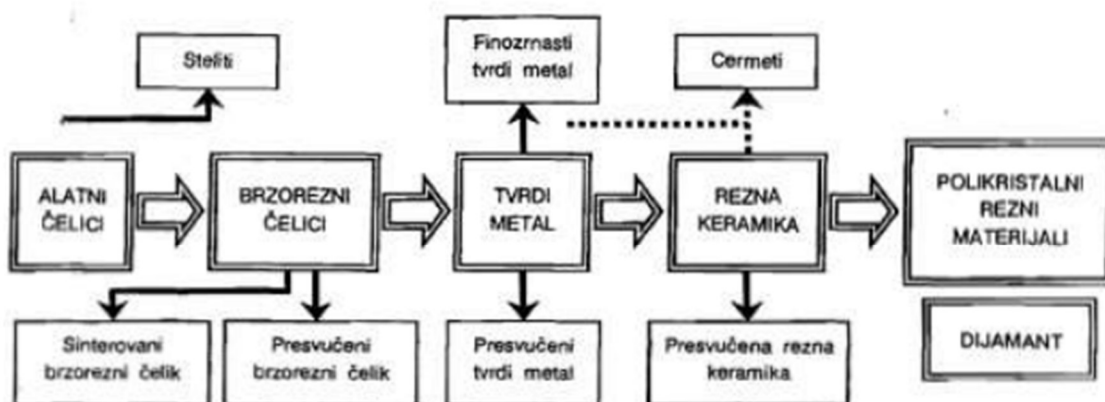
# Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Alati za obradu odvajanjem čestica.....	2
2.1 Tokarski nož.....	6
2.2 Tokarski nož s izmjenjivom pločicom.....	8
2.3 Trošenje alata.....	9
3. Keramika.....	11
3.1 Proces proizvodnje i oblikovanja tehničkih keramika.....	12
3.2 Oksidna keramika.....	17
3.2.1 Aluminijska oksidna keramika $Al_2O_3 + TiC/TiN$ .....	18
3.2.2 Vlaknima ojačana oksidna keramika.....	20
3.2.3 Cirkonijski oksid $ZrO_2 - Al_2O_3$ .....	23
3.3 Neoksidna keramika.....	23
3.3.1 Silicijski nitrid $Si_3N_4$ .....	24
3.4 Keramike visoke tvrdoće.....	27
3.4.1 Polikristalni dijamant (PCD).....	28
3.4.2 Kubični bor nitrid (CBN).....	29
4. Zastupljenost rezne keramike u proizvodnji strojnom obradom.....	32
5. Zaključak.....	35
Popis Literature.....	36
Popis slika.....	37
Popis Tablica.....	38

## 1. Uvod

U ovome radu istražiti će se svojstva tehničke keramike u proizvodnji odvajanjem čestica, te primjena i namjena za koju se pojedina keramika koristi. Čovjek je uvijek imao potrebu za proizvodnjom i oblikovanjem oruđa i oružja, a za to su mu bili potrebni alati. U početku su to bili primitivni kameni alati, a s industrijskom revolucijom pojavila se strojna obrada slična onoj danas. Napretkom tehnologije, te sukladno razvijanjem strojeva, razvijali su se i alati. Težnja je bila k što većoj produktivnosti uz što veću preciznost i efikasnost. Početkom 20.stoljeća otkriven je novi materijal, brzorezni alatni čelik (HSS). Pojavom alata od ovog materijala postizale su se drastično veće brzine rezanja nego kod dotadašnjih ugljičnih čelika. Krajem drugog svjetskog rata otkrivaju se nove legure i materijali, te se time dodatno povećavaju brzine rezanja i postojanost alata. [1]

Veliki napredak u industriji alata za odvajanje čestica postignut je pojavom sinteriranih tvrdih metala i tehničke keramike čije su brzine rezanja i do 1500 m/min ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Prilikom izrade proizvoda, pogotovo u malim poduzećima, gdje je riječ isključivo o maloserijskim proizvodnjama te konstantnom mijenjanju zahtjeva i materijala izratka, pouzdan i dugovječan alat je od neizmjerne važnosti. [1] Proces razvoja reznih alata prikazan je na slici 1.



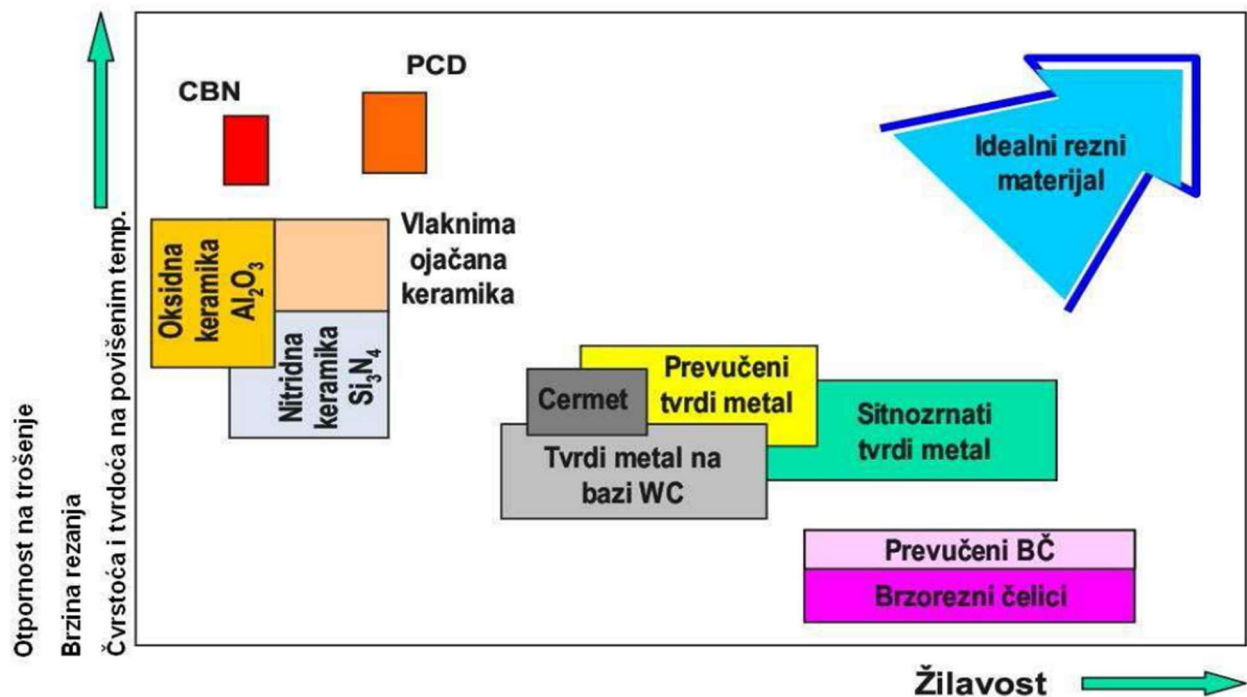
Slika 1. Razvoj reznih alata [2]

## 2. Alati za obradu odvajanjem čestica

Alati za odvajanje čestica služe za oblikovanje, preoblikovanje i poboljšavanje površina obradaka. Ove radnje rezanjem (struganjem) odvajaju materijal od obratka po unaprijed određenoj putanji alata. Najčešći alati za odvajanje čestica su tokarski noževi, svrdla, glodala, razvrtala. Ovakvi alati koriste se na specijaliziranim strojevima namijenjenima za obradu materijala, koji mogu biti jednostavnih oblika i s malim brojem reznih oštrica ili profilno oblikovani alati s mnogobrojnim oštricama. [3] Najčešći materijali koji se upotrebljavaju za izradu alata za obradu odvajanjem čestica su:

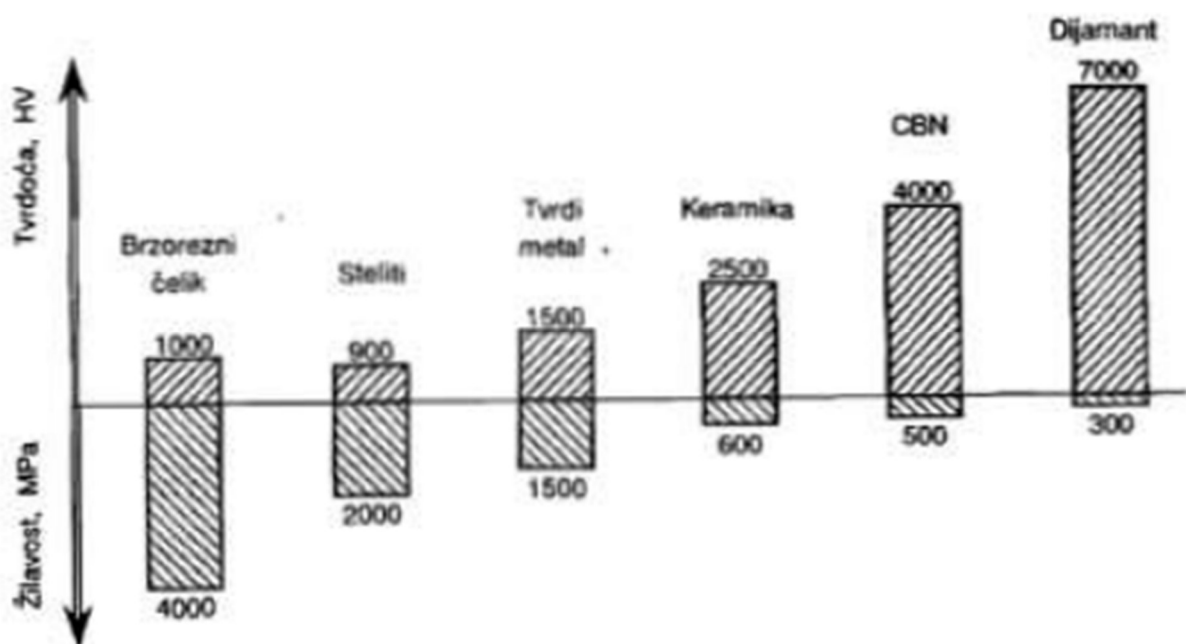
- brzorezni čelici (HSS),
- tvrdi metali (cementni karbidi),
- ceremet (keramičko-metalni kompozit),
- oksidne rezne keramike,
- nitridne rezne keramike,
- kubični bor nitrid (CBN),
- polikristalni dijamanti (PCD).

Na slici 2 prikazana je međuovisnost svojstava materijala za obradu odvajanjem čestica.



Slika 2. Svojstva materijala alata za obradu odvajanjem čestica [3]

Postoje uvjeti koje materijal mora zadovoljiti kako bih bio podoban za izradu alata za obradu odvajanjem čestica. Glavna dva uvjeta su otpornost na trošenje i udarna izdržljivost (žilavost). Načelno se može reći kako alatni čelici imaju izraženo svojstvo žilavosti, što znači da se alat neće trajno deformirati pod konstantnim djelovanjem naprezanja, za razliku od reznih keramika koje imaju loše svojstvo udarne izdržljivosti. Rezne keramike odlikuje mogućnost postizanja velikih brzina rezanja i rada na visokim temperaturama što utječe na smanjenje sila rezanja, te trošenje materijala. Na slici 3 prikazane su prosječne vrijednosti žilavosti i tvrdoće osnovnih materijala alata za obradu odvajanjem čestica. [2,3]



Slika 3. Prosječne vrijednosti žilavosti i tvrdoće osnovnih materijala alata za obradu odvajanjem čestica [2]

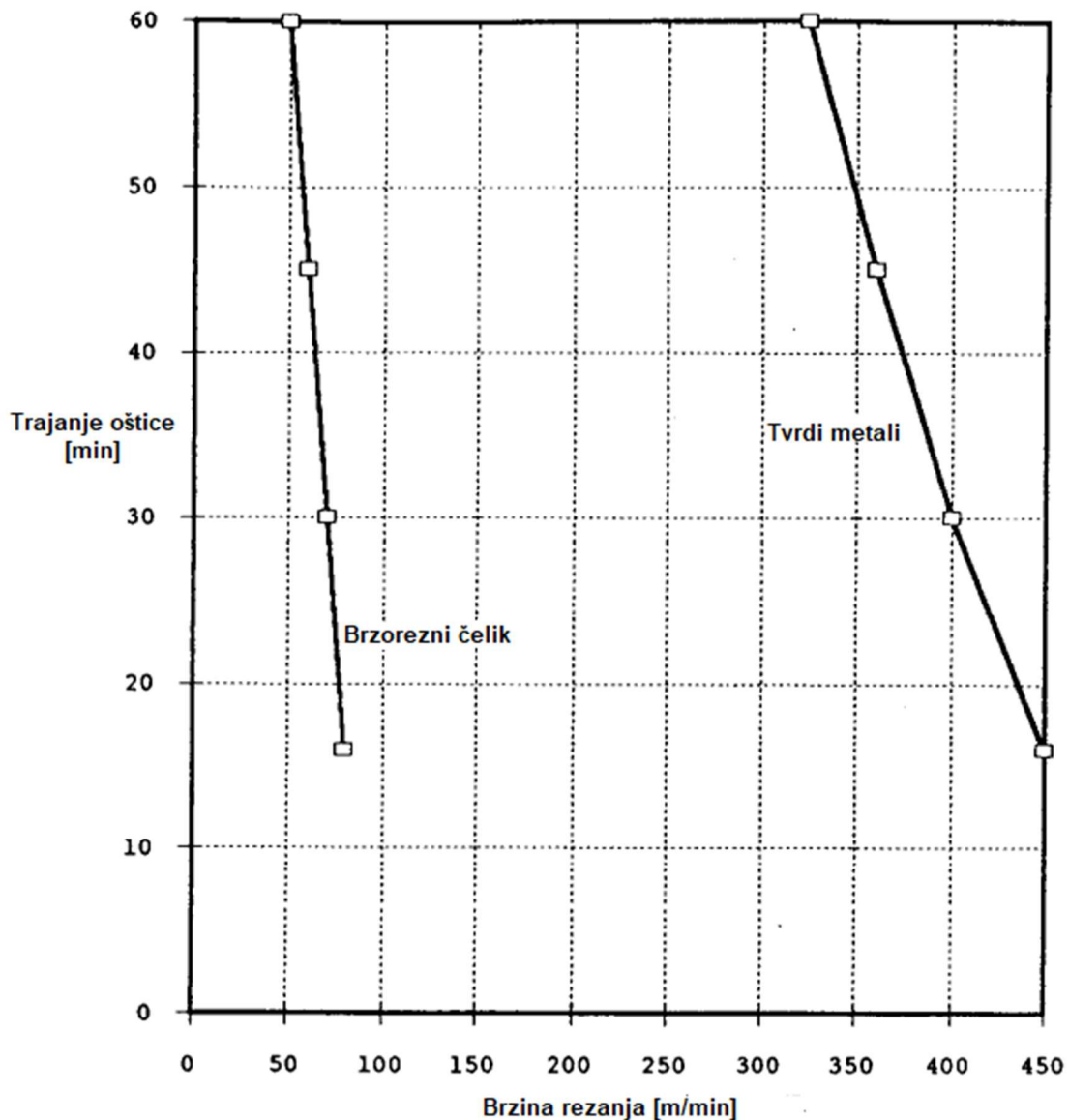
Za odabir materijala reznog alata najvažniji čimbenik je materijal obratka. Materijali obratka mogu biti različiti, ali najčešće se obrađuju metalni materijali. Kod metalnih obradaka mora se paziti na vlačnu čvrstoću, koja svojim povećanjem direktno utječe na tvrdoću obratka te samim time otežava obradivost i povećava trošenje alata. [2,3] U tablici 1 prikazane su opće preporuke za odabir reznih materijala s obzirom na materijal obratka.

REZNI MATERIJAL	Čelik	Visoko legirani čelik	Sivi lijev	Neželjeni metali	Specijalni materijali	Tvrđi materijali
Brzorezni čelik						
Standardni	+	+	+	+	+	-
Presvučeni	+	+	+	+	+	-
Sinterirani	+	+	-	-	+	-
Tvrđi metal						
Nepresvučeni,P	++	+	-	-	+	-
Nepresvučeni,M	+	++	+	-	-	-
Nepresvučeni,K	-	-	+	+	-	-
Presvučeni,P	++	+	+	-	+	-
Presvučeni,K	-	+	++	-	-	-
Cermet	++	+	+	-	-	-
Rezna keramika						
Oksidna	+	-	++	-	-	+
Miješana	+	-	++	-	-	+
Ojačana vlaknima	+	+	+	-	++	-
Nitridna	-	-	++	-	-	-
CBN	-	-	+	-	-	++
PCD	-	-	-	++	-	-
++ prioritetno korištenje, + moguće korištenje, - ne upotrebljava se						

Tablica 1. Preporuke za odabir reznih materijala [2]

Kao jedan od prvih materijala korišten za obradu odvajanjem čestica bio je brzorezni čelik, koji je odlikovan iznimnom žilavošću. Brzorezni čelici razlikuju se prema legirnim elementima. Neki od elemenata su volfram, kobalt i molibden koji pospješuju temperaturnu stabilnost i povećavaju žilavost, dok vanadij formira tvrde karbide i povoljno utječe na nastajanje sitne zrnate strukture. Prednost brzoreznog čelika je velika žilavost, koja povećava otpornost rezne oštrice na dinamička opterećenja, dok je veliki nedostatak mala otpornost na trošenje i temperaturna postojanost. Kako bih

se navedeni nedostaci ublažili razvijeni su postupci poboljšavanja reznih sposobnosti, kao što su sinteriranje i oslojavanje (presvlačenje) tankim slojem tvrdog materijala. [1,2] Na slici 4 prikazana je usporedba trajanja oštrice u ovisnosti o brzini rezanja za brzorezni čelik i tvrde metale.



Slika 4. Usporedba trajanja oštrice brzoreznog čelika i tvrdih metala [1]

Zbog nedostataka brzoreznog čelika, u pogledu trošenja alata, kao materijal za obradu odvajanjem čestica razvijeni su tvrđi metali. Sastoje se od volfram karbida (služi kao glavna komponenta strukture) i kobalta (služi kao vezivo). Prednosti tvrdih metala su otpornost na trošenje i postojanost pri visokim temperaturama obrade. Tvrđi metali dijele se u tri skupine (P,M,K) prema ISO standardu, koje se međusobno razlikuju u

omjeru veziva i karbida. Ovisno o omjeru, mijenjaju se svojstva materijala. Grupa sa većim udjelom karbida ima svojstva pogodna za obradu s konstantnim otporom rezanja (bolja otpornost na trošenje i temperaturna postojanost), dok se povećavanjem udjela veziva povećava žilavost, što odgovara procesima obrade sa većim udarnim opterećenjem.[1,2]

U cilju daljnjeg poboljšanja u pogledu trošenja i temperaturne postojanosti, razvijaju se keramičko-metalni kompoziti ili cermet. Cermet se sastoji od titanij karbida (TiC) ili titanij nitrida (TiN), a razlikuje se od keramičkih materijala zato što u svom sastavu ima metalnu fazi nikal-kobalta koja služi kao vezivo. U usporedbi svojstava sa tvrdim metalima i alatnim čelikom (tablica 2), cermet postiže bolju postojanost pri visokim temperaturama i manje trošenje. [1]

	Tvrđi metali	Cermet
Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )	10.8 - 12.4	6.1 - 8.1
Tvrdoća (HV 10/30)	1600	1600
Modul elastičnosti (kN/mm <sup>2</sup> )	540 - 550	500
Savojna čvrstoća (N/mm <sup>2</sup> )	1700 - 2100	1500 - 1700
Tlačna čvrstoća (N/mm <sup>2</sup> )	4400	4200 - 4400
Koef. toplinskog istezanja (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	6.9 - 7.9	7.6 - 7.9
Toplinska vodljivosti (W/mK)	27 - 38	10 - 12

Tablica 2. Usporedba svojstava tvrdih metala i cermeta [1]

Ostali materijali alata za obradu odvajanjem čestica odnose se na keramiku, te su obrađeni u sljedećim poglavljima ovog rada.

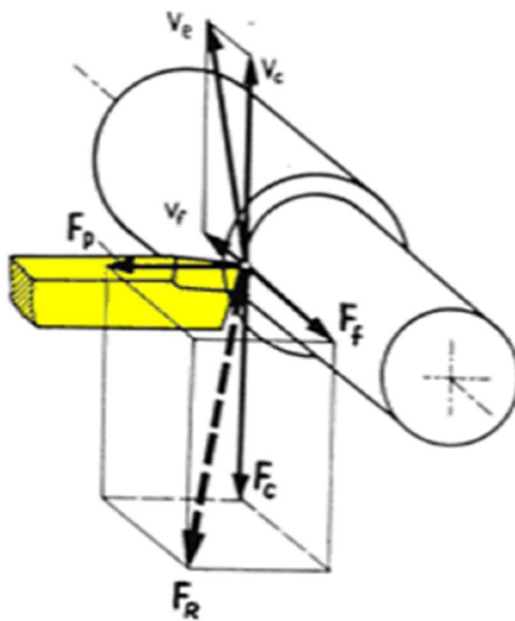
## 2.1 Tokarski nož

Tokarski noževi su alati za tokarenje sa definiranom geometrijom oštrice alata, te samo jednom reznom oštricom u zahvatu.

Ovi alati se dijele s obzirom na:

- vrstu tokarenja (nož za uzdužno ili poprečno tokarenje),
- obrađivanu površinu (nož za unutarnje ili vanjsko tokarenje),
- izradu alata (iz jednog komada, sa zalemljenom pločicom, s izmjenjivom pločicom).

Kod tokarenja, obradak vrši glavno (rotacijsko) gibanje dok alat vrši posmično (uzdužno/poprečno) gibanje. Posmično gibanje može se opisati kao kontinuirano pravocrtno gibanje okomito na pravac brzine glavnog gibanja. [3] Najbitniji faktori kod obrade rezanjem su: glavna brzina rezanja koja se označava sa  $v_c$ , posmična brzina rezanja  $v_f$  i rezultanta brzina rezanja  $v_e$ . Glavna sila rezanja koja se označava sa  $F_c$ , posmična  $F_f$ , natražna sa  $F_p$  i prostorna (rezultanta)  $F_r$  (slika 5). [4]



Slika 5. Sile i brzine rezanja kod tokarenja [4]

Sile i brzine koje alat ostvaruje prilikom rezanja su glavni faktori trošenja i oštećenja alata. O njihovim vrijednostima, te načinu obrade, bitno ovise performanse samog alata i njegova trajnost. Shvaćanjem utjecaja na reznu oštricu, načina obrade i materijala koji će se obrađivati, može se odabrati najpovoljniji materijal za izradu same oštrice. [3]



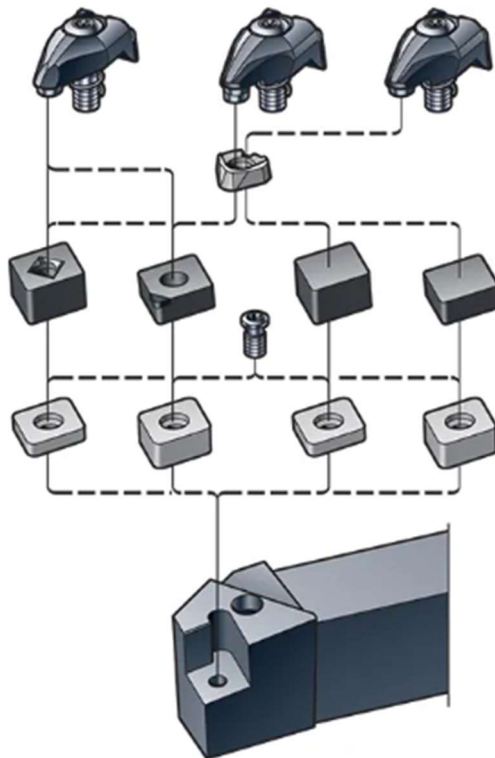
## 2.2 Tokarski nož s izmjenjivom pločicom

Tokarski nož sa izmjenjivom pločicom (slika 6) je izrađen najčešće iz dva dijela; držača alata koji je izrađen od alatnog čelika te izmjenjive pločice koja čini rezni alat. Izmjenjive rezne pločice se ne mogu popravljati i brusiti kako bi se popravila rezna geometrija alata, već se moraju promijeniti. Pločice mogu biti izrađene od sinteriranih tvrdih metala, samo presvučene u metalne košuljice ili napravljene od raznih keramika. [4]



Slika 6. Tokarski nož sa izmjenjivom reznom pločicom [5]

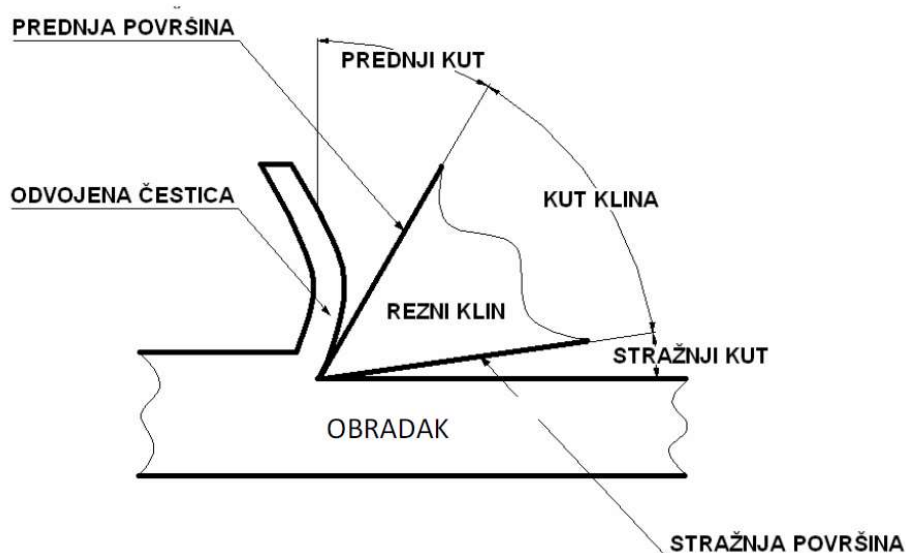
Za maksimiziranje učinka, same rezne pločice izrađuju se u obliku mnogokuta gdje svaki kut predstavlja jednu reznju oštricu. Izmjenjiva pločica s nekoliko reznih oštrica ima mogućnost produljenja svog radnog vijeka na način da se istrošena strana jednostavno zakrene na drugu poziciju. Prednost ovakvih noževa u odnosu na alate iz jednog dijela ili sa zalemljenom pločicom je mogućnost zamjene oštrice (slika 7) dok je alat u stroju (alat se ne mora se ponovno nulirati i stezati poprečna podrška), stoga je dugoročno gledano alat jeftiniji te ima znatno veću iskoristivost. [4]



Slika 7. Prikaz zamjene rezne pločice [5]

### 2.3 Trošenje alata

Kada je riječ o odvajanju čestica i rezanju materijala, neovisno o tipu obrade i alata koji se koriste, svaki alat ima neku vrstu geometrije reznog klina. Rezni klin definiran je sa tri kuta. To su kut klina, stražnji kut i prednji kut. Najutjecajniji je kut klina, makar i ostala dva moraju uvijek postojati, jer se njihovom promjenom također znatno utječe na ponašanje rezne oštrice. Uz kuteve, jako bitan i neizostavan dio je zaobljenje vrha oštrice, koji se često zbog jednostavnijeg prikaza i shvaćanja zanemaruje, ali u stvarnosti postoji, te alat ne može izvršavati svoj zadatak bez njega. [6] Na slici 8 su prikazani navedeni kutevi, te je definiran odnos alata i obratka.



Slika 8. Prikaz kuteva rezne oštrice [6]

Mehanizmi trošenja alata su procesi koji se pojavljuju za vrijeme obrade, na mjestu kontakata alata i obratka. Njihov konačni rezultat je onesposobljavanje alata u izvršavanju funkcije i izbacivanje samog alata iz proizvodnog procesa. Cilj je stvoriti alate koji mogu podnijeti mnogo trošenja prije nego postanu neupotrebljivi, odnosno postići totalnu otpornost na trošenje. [1]

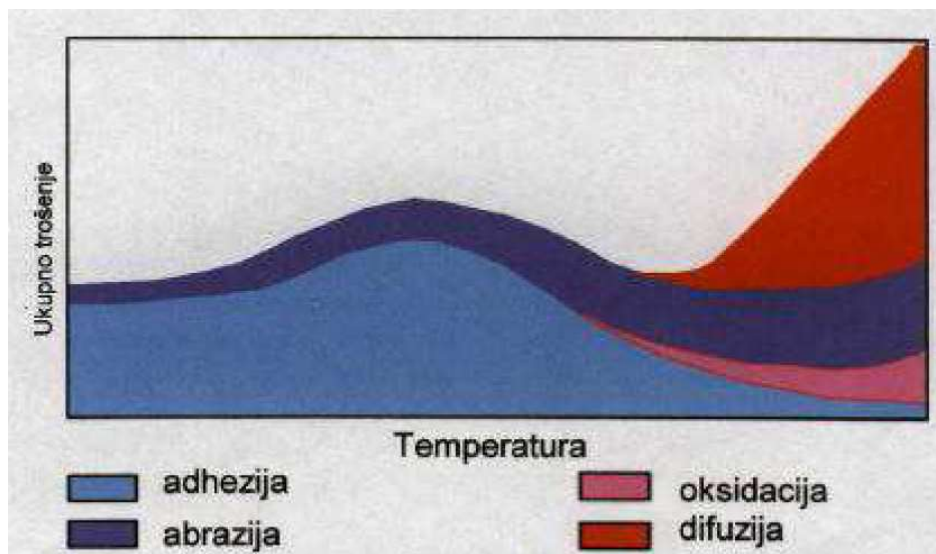
Procesi trošenja mogu se podijeliti u dvije skupine:

- procesi koji su posljedica mehaničkog djelovanja,
- procesi koji su posljedica kemijskih i fizikalnih djelovanja između alata, obratka i okoline. [6]

Glavni mehanizmi trošenja koji se pojavljuju kao rezultat navedenih procesa pri obradi rezanjem, na mjestu interakcije između alata i obratka su:

- abrazivsko trošenje,
- difuzijsko trošenje,
- oksidacijsko trošenje,
- adhezijsko trošenje. [6]

Zastupljenost pojedinog trošenja ovisi o svojstvima obratka, svojstvima alata te parametrima i uvjetima obrade. Općenito gledajući udio pojedinih mehanizama trošenja, najviše ovisi o temperaturi koja se razvija u području kontakta alata i obratka (slika 9).



Slika 9. Prikaz zastupljenosti pojedinog trošenja alata ovisno o temperaturi [6]

Abrazijsko i adhezijsko trošenje javljaju se i pri malim brzinama rezanja te ih je nemoguće izbjeći. Na višim temperaturama i većim brzinama rezanja pojavljuju se dva dodatna trošenja, a to su oksidacija i difuzija. Može se zaključiti kako materijal za izradu alata mora biti otporan na navedena trošenja te je prilikom obrade poželjno imati što manje temperature, međutim pri većim brzinama rezanja pojavljuju se i neke prednosti. Ukupna sila rezanja se smanjuje, samim time značajno raste produktivnost. Zbog toga se u nekim situacijama nastoji biti u području visokih temperatura te su potrebni materijali koji, za razliku od čelika i njegovih legura, mogu izdržati takve uvijete rada.[6]

### 3. Keramika

Keramike (grč. *Keramikos*, posuđe, pečen od gline) su nemetalni i anorganski materijali sastavljeni iz kemijskih spojeva metala i nemetala, povezanih ionskim i/ili kovalentnim vezama. Zbog razlika u vezivanju atoma, svojstva keramika međusobno se jako razlikuju. Ovakvi materijali oblikuju se pri sobnoj temperaturi iz sirove mase, te nakon pečenja na visokim temperaturama, postižu svoja tipična svojstva. Općenito keramiku odlikuju izrazito velika tvrdoća, krhkost, neotpornost na drastične promjene temperature, neelastičnost, otpornost na trošenje i koroziju, visoka temperaturna postojanost te dobar je izolator topline i struje. Keramika je kao materijal poznata

čovjeku od davnina. U početku se koristila isključivo za izolaciju objekata, ali otkrićem pečenja namjena se drastično mijenja, te se počinje znatno više koristiti. Keramike se mogu podijeliti u dvije velike skupine:

- tradicionalne keramike: glina, kvarc (kremen, silicijev dioksid -  $\text{SiO}_2$ ) i feldšpat (glinenac). Primjeri tradicionalne keramike su opeke i pločice u građevinarstvu, porculan, te stakla,
- tehničke keramike (nove, napredne) sastoje se od čistih kemijskih spojeva, kao što su oksidi (npr.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – korund,  $\text{ZrO}_2$ ), karbidi (npr.  $\text{SiC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ) i nitridi (npr.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{BN}$ ). [1,7]

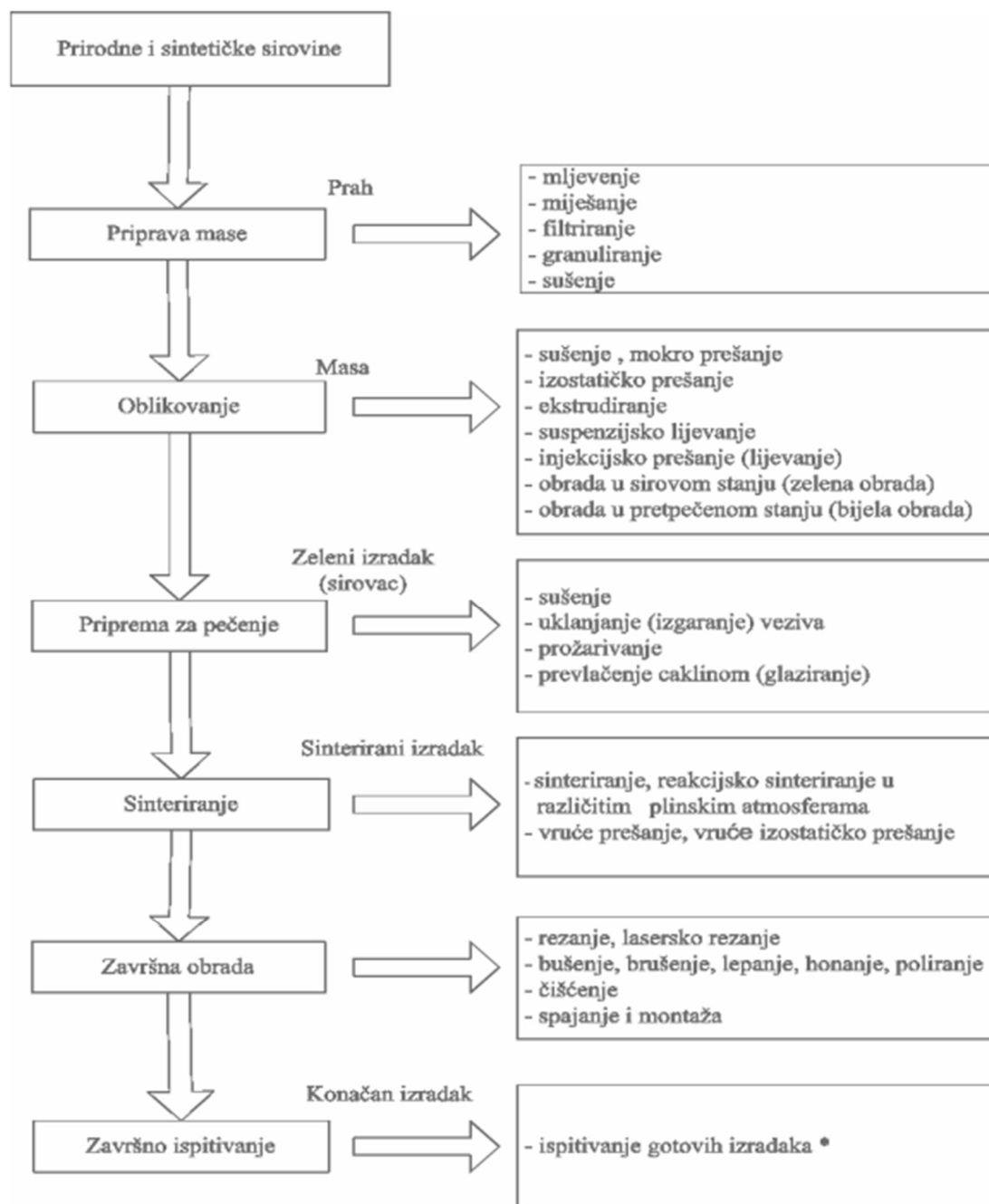
Primjena tehničke keramike kao materijala prikazana je u tablici 3.

UTJECAJI	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	kemijska postojanost, biokompatibilnost, sposobnost adsorpcije	zaštita od korozije, nosači katalizatora, oprema u ekologiji, senzori, implantatizglobovi, zubi
ELEKTRIČNI	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 postojanost, postojanost na zračenje	dijelovi gorivih jezgri, apsorberi, spremnici visokoradioaktivnog otpada

Tablica 3. Primjena tehničke keramike [7]

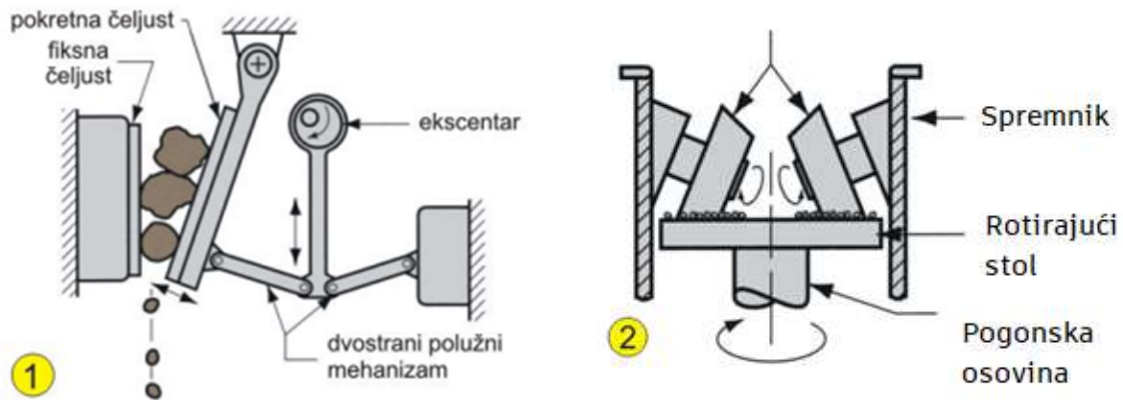
### 3.1 Proces proizvodnje i oblikovanja tehničkih keramika

Tehnička keramika proizvodi se od čistih prirodnih minerala ili kemijskom sintezom elemenata kisika, dušika, ugljika, bora i silicija s metalima. U procesu proizvodnje prah, oblikovanje i proces sinteriranja određuju mikrostrukturu keramičkih materijala, a time i njihova svojstva. [7] Tijek proizvodnje tehničke keramike prikazan je na slici 10.



Slika 10. Tijek proizvodnje tehničke keramike [8]

Kao što je prikazano na slici 10, prvi korak u proizvodnji keramike je priprava smjese za oblikovanje i daljnju obradu. Potrebno je dobro usitniti keramički prah, koji se u većini slučajeva dobiva procesom drobljenja, kao što je prikazano na slici 11. [9]



Slika 11. Prikaz postupaka usitnjavanja sirovine za pripremu keramičkog praha [8]

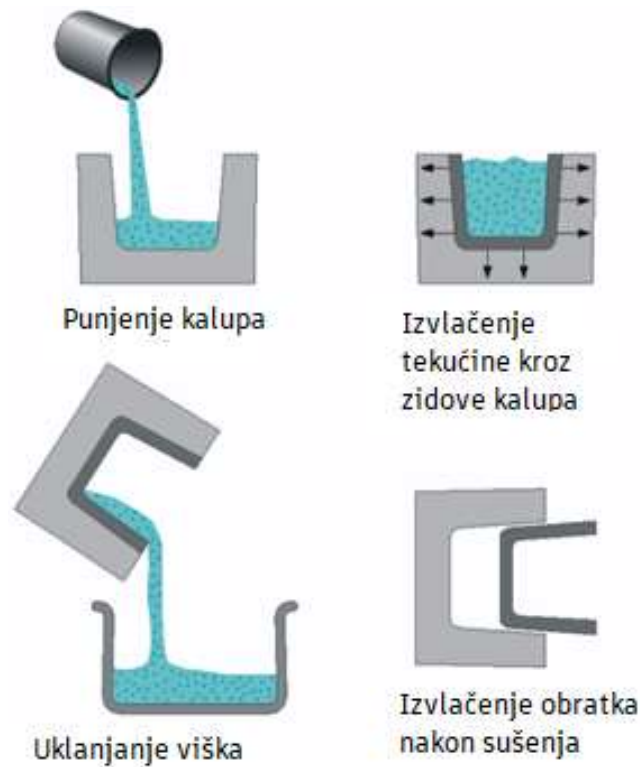
Kako bih krajnji proizvod bio što kvalitetniji, te postigao zadana fizikalna svojstva, u prah se dodaju različiti aditivi koji tvore smjesu za oblikovanje keramike. Neki od aditiva su:

- očvršćivači,
- veziva,
- aditivi za sprječavanje rasta agregatnog zrna,
- sredstva za tečenje,
- disperzanti (odmašćivači).

Nakon što se sirovina preradila, te su joj dodani potrebni aditivi, dobivena smjesa spremna je za oblikovanje. Metode pogodne za oblikovanje proizvoda od keramike su:

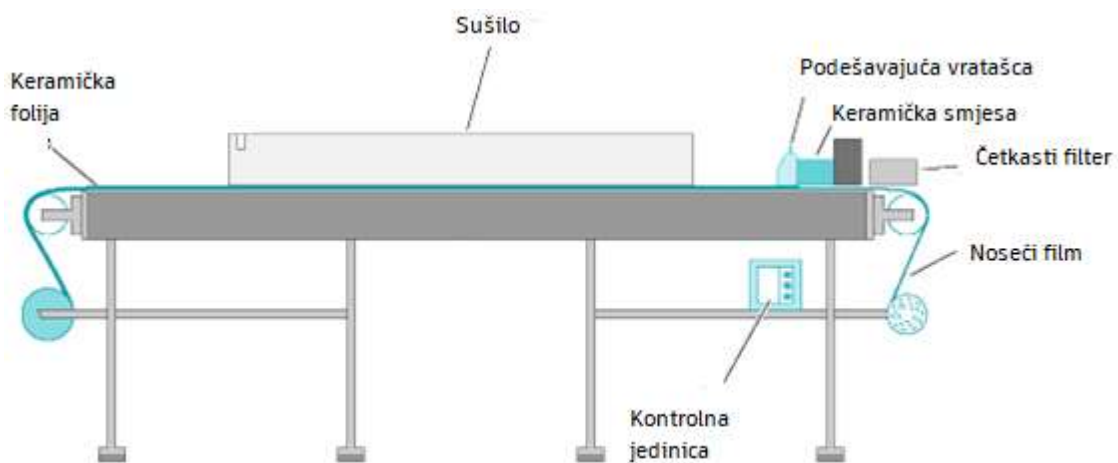
- lijevanje,
- injekcijsko prešanje,
- ekstrudiranje i rotacijsko oblikovanje.

U postupku lijevanja koriste se dvije metode, lijevanje u formu (slika 12) i lijevanje traka. Za postupak lijevanja u formu koristi se porozni kalup od gipsa koji upija vodu iz smjese te formira kruti sloj gline na svojim stjenkama. Razlikuju se lijevanje punih i šupljih komada. [9]



Slika 12. Prikaz postupka lijevanja u formu [8]

Proces lijevanja u traci koristi se kada je kao krajnji proizvod potrebno dobiti tanke folije od keramike. Smjesa se izliva na pokretnu traku od plastike te se pomoću oštrice stanjuje na potrebnu debljinu (slika 13). [9]



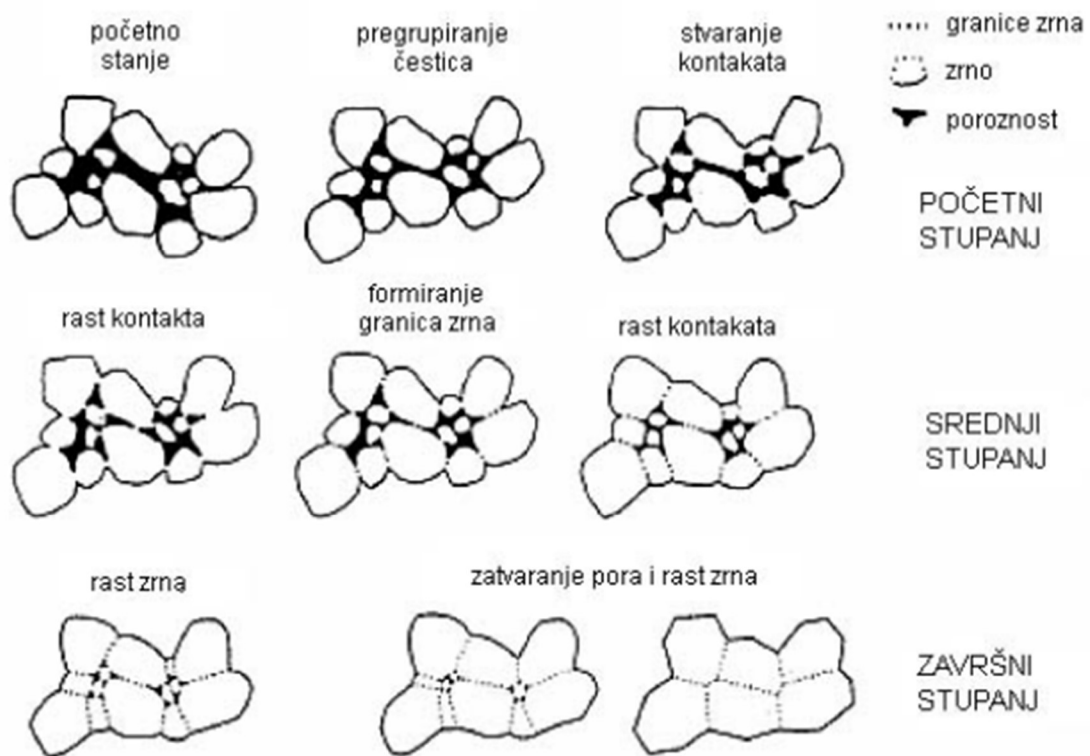
Slika 13. Prikaz lijevanja na traku [8]

U postupku injekcijskog prešanja termoplastična masa, napunjena sa keramičkom smjesom, injektira se u kalupe za složene oblike obrataka. Termoplastična masa se



kroz proces spaljuje, te se kao rezultat dobiva keramički obradak. Kod procesa rotacijskog oblikovanja smjesa se ekstrudira na kalup koje se vrti te se pomoću alata oblikuje željeni obradak. [9]

Bitan proces u proizvodnji keramika je sinteriranje. Sinteriranje je proces u kojem osušeni dijelovi, tako zvana „zelena keramika“, prolazi kroz proces postupnog zagrijavanja. Zagrijavanje dovodi do procesa kemijske difuzije atoma, koji dovodi do promjene kemijskih svojstava oksida u spoju. Ovaj proces uključuje postupno uklanjanje poroznosti, što je popraćeno zgrušavanjem komponente. Rezultat sinteriranja je znatno povećana žilavost i krutost. [9] Na slici 14 prikazan je proces sinteriranja.



Slika 14. Prikaz procesa sinteriranja [9]

Ovaj proces provodi se na visokim temperaturama (tablica 4). Postignute temperature su ispod temperatura tališta tako da je materijal u krutom stanju, te je potpomognuta difuzija atoma. [9]

Keramika	Temperatura sinteriranja, [°C]
Kvareni porculan	oko 1300
Steatit	oko 1350
Kordijerit	1350 – 1400
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1600 – 1800
RSIC	2300 – 2500
SSIC	oko 1900
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	oko 1700

Tablica 4. Temperature sinteriranja keramičkih materijala [1]

Sinteriranje se provodi u plinskoj ili električnoj peći uz postepeno grijanje i hlađenje, te u odgovarajućim atmosferskim uvjetima. Ovaj proces dijeli se na sinteriranje:

- jednokomponentnih sustava,
- višekomponentnih sustava,
- suho sinteriranje,
- mokro sinteriranje.

Nakon procesa sinteriranja izvodi se završna obrada. Postupci korišteni u završnoj obradi su:

- brušenje,
- lepanje,
- poliranje,
- honanje.

Kako bi se postigle željene tolerancije i površinske obrade, za završnu obradu koriste se dijamantni alati. [9]

### 3.2 Oksidna keramika

Materijali koji se sastoje pretežito iz jednokomponentnih i jednofaznih metalnih oksida (>90%) su: čisti aluminijski oksid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) poznat kao sinterirani korund, aluminijski oksid ojačan cirkonijskim oksidom (ZTA), aluminijski oksid ojačan titan karbidom, te vlaknima

ojačana oksidna keramika ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + 15\% \text{ZrO}_2 + 20\% \text{SiC}$ ). U tablici 5 prikazane su fizikalne osobine oksidne keramike naspram tvrdih metala. [1]

Rezni materijal:	Oksidna keramika $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$	Mješana keramika $\text{Al}_2\text{O}_3$ + TiC/TiN	Tvrđi metal (P20)	Cermet (TiC + ZrC)
Tvrdoća (HV)	2000	2200	1500	1600
Modul elastičnosti ( $\text{kN/mm}^2$ )	390	400	550	500
Savojna čvrstoća ( $\text{kN/mm}^2$ )	350	600	2100	1700
Lomna žilavost ( $\text{mN/mm}^2$ )	4,5	5,4	12	12,5
Koef. topl. istezanja ( $\text{K}^{-1}$ )	$7,5 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-6}$	$6,9 \times 10^{-6}$	$7,9 \times 10^{-6}$
Toplinska vodljivost ( $\text{W/mK}$ )	30	35	38	10

Tablica 5. Usporedan prikaz fizikalnih svojstava oksidne keramike i tvrdih metala [1]

Oksidna keramika većinu svoje primjene pronašla je u elektrotehnici i elektronici, ali se primjenjuje i u drugim strukama. Najčešće upotrebljavana keramika iz ove skupine je aluminij oksidna keramika.

### 3.2.1 Aluminijeva oksidna keramika $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC/TiN}$

Materijali koji se temelje na aluminijevim oksidima imaju široku primjenu zbog svojih jako dobrih svojstava koja ovise o mnogobrojnim strukturama koje može poprimiti  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Sama oksidna keramika nema dovoljno dobra svojstva koja su relevantna u reznoj tehnici kao miješana i vlaknima (whiskerima) ojačana keramika, s toga joj se pridodaje 30-40% titan karbida (TiC) i/ili titannitrida (TiN).

Miješanje aluminijevog oksida sa titanijevim spojevima je omogućeno vrućim prešanjem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i TiC. Ovakav postupak je 20-25% skuplji u odnosu na čelike sa karbidnim premazima titanijevim slojem koji imaju znatno manju otpornost zbog ekstremno tankog površinskog sloja premaza (0,0045 mm) koji se prilikom obrade materijala tvrdoće od preko 40 RC, brzo istroši. [1]

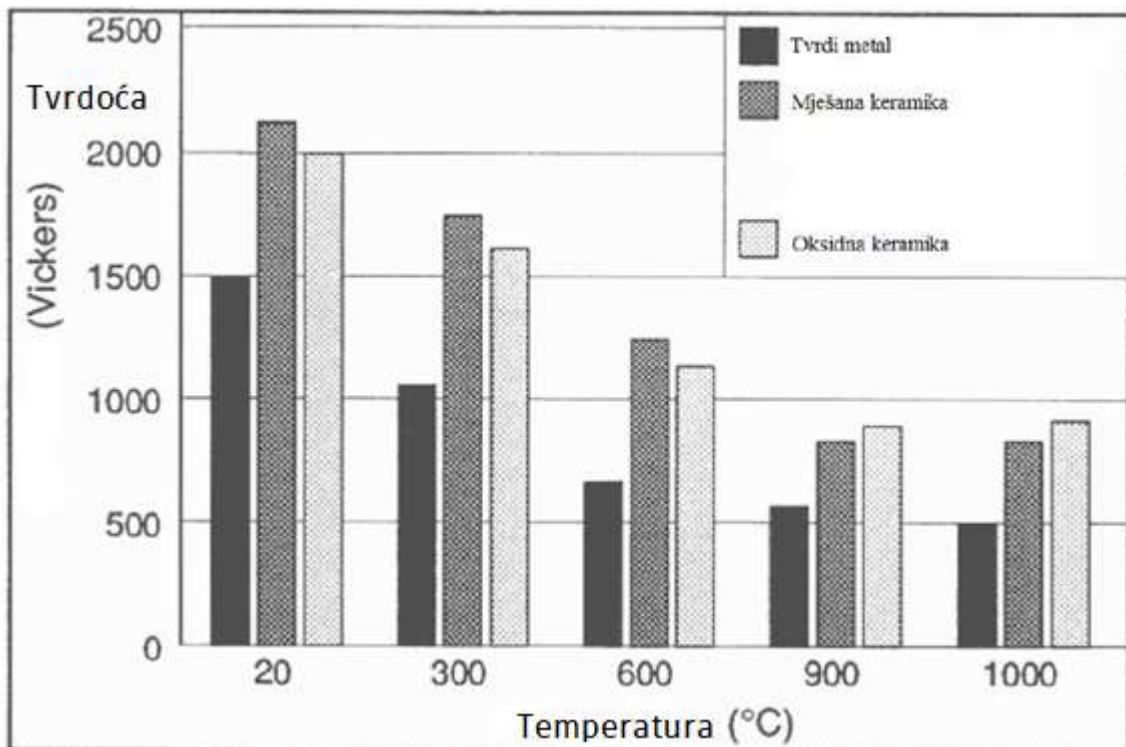
Iako su neki keramički materijali znatno bolji u specifičnim primjerima,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$  je izvrstan u većini slučajeva. Najviše se primjenjuje za izradu tokarskih noževa gdje može postići velike tolerancijske točnosti do  $6,4 \mu\text{m}$ , kao i male hrapavosti površina razreda kvalitete  $\text{N4}/\text{Ra}=0,2 \mu\text{m}$ . Ovakvi alati pogodni su za suho rezanje kao i za rezanje sa emulzijama na bazi vode. [9] Na slici 15 prikazana je mikrostruktura  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



Slika 15. Prikaz strukture  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [9]

Ovakva vrsta keramike prigodna je za uvijete rada u temperaturama do  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , preko te temperature struktura Ti/C i Ti/N počinju oksidirati i time narušuju prvobitna svojstva na što treba pripaziti prilikom odabira režima obrade (dubina rezanja, posmak, brzina rezanja). [9]

Slika 16 prikazuje tvrdoće u zavisnosti o temperaturi za tvrde metale, čistu oksidnu keramiku i oksidnu keramiku pomiješanu sa titanijevim karbidom ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC/TiN}$ ).



Slika 16. Prikaz tvrdoće u zavisnosti o temperaturi s obzirom na vrstu materijala [1]

Oksidne keramike na bazi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  imaju veliku primjenu te se njihova svojstva dodatno poboljšavaju dvostrukim ojačanjima od  $\text{ZrO}_2$  i  $\text{SiC}$ . Cirkonij  $\text{ZrO}_2$  omogućava transformacijsko ojačanje, a  $\text{SiC}$  u obliku whiskera pospješava žilavost i otpornost na lom. Također, ovako ojačani aluminijski oksidi imaju povećanu kemijsku postojanost i otpornost od nastajanja  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  (stakla) pri visokim temperaturama i hidrostatskom tlaku, koji nastaje uslijed obrade materijala i time oslabljuje alat, te smanjuje učinkovitost. [1]

Primjena alata izrađenih od  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :

- za grubu i završnu obradu,
- kontinuirano rezanje uz velike brzine rezanja bez emulzije (podnosi emulzije na bazi vode),
- najprimjenjeniji je za rezanje sivog lijeva (SL) i nodularnog lijeva (NL),
- podnosi temperature do  $800\text{ }^\circ\text{C}$ ,
- može podnositi diskontinuirana opterećenja ukoliko je razmak jako mali, te ako je vrh oštrice tvrd, odnosno ima ispravnu geometriju (krug ili ojačani kvadrat).

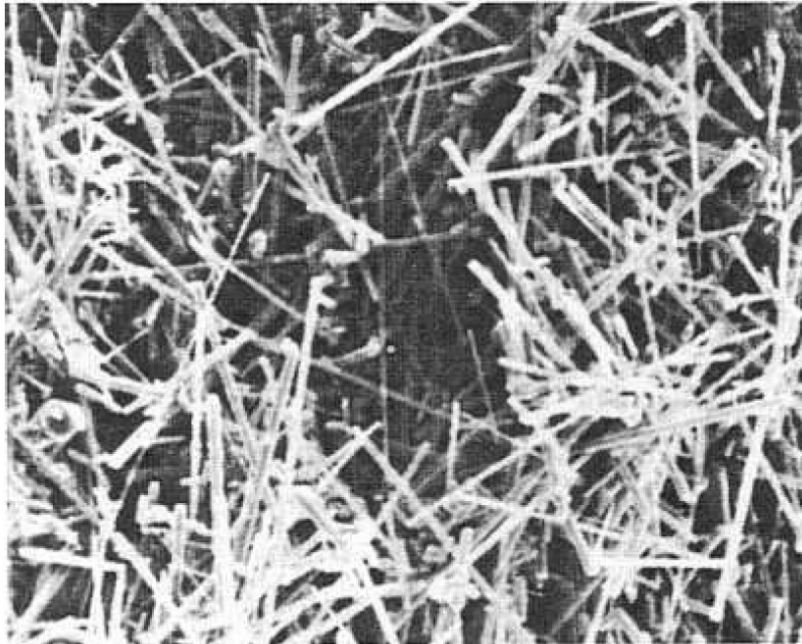
### 3.2.2 *Vlaknima ojačana oksidna keramika*

Aluminijski oksid se dugo koristio kod obrada velikim brzinama rezanja zbog svoje izuzetne temperaturne postojanosti i tvrdoće, međutim ima jako veliki problem što je neotporan na udare i velike je krhkosti. Zbog toga se širom svijeta krenulo u istraživanja kako unaprijediti materijal da postane žilaviji odnosno otporniji na udare. Rješenja su se pokazala u dva oblika :

- povećanje žilavosti transformacijom cirkonija,
- vlaknima (whiskerima) ojačan  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Rezni alati s povećanom žilavosti transformacijom cirkonija su u širokoj primjeni već dugi niz godina, međutim tehnologija ojačavanja sa monokristalima silicijeva karbida ( $\text{SiC}$ ) je novije otkriće sa kojim se započelo 90-ih godina prošlog stoljeća. Ovakvi kompoziti sadrže otprilike 45% udjela whiskera ovisno o sadržaju matrice. Vlakna (whiskeri) su uglavnom izrađeni iz  $\beta$  (kubični  $\text{SiC}$ ) faze ili mješavine  $\beta$  i  $\alpha$  faze silicijevog karbida (slika 17). U prosijeku vlakna su promjera od  $0,05\text{-}1\text{ }\mu\text{m}$  i duljine  $5\text{-}125\text{ }\mu\text{m}$ . Ovakav sastav  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{+SiC}$  pokazao se je u istraživanjima da ima dvostruko veću

žilavost od sastava bez korištenja vlakana. Međutim vlakna sprječavaju zgušnjavanje prilikom sinteriranja zbog čega se mora primjenjivati vruće prešanje sa udjelom vlakana u kompozitu od 10-15%. [1]



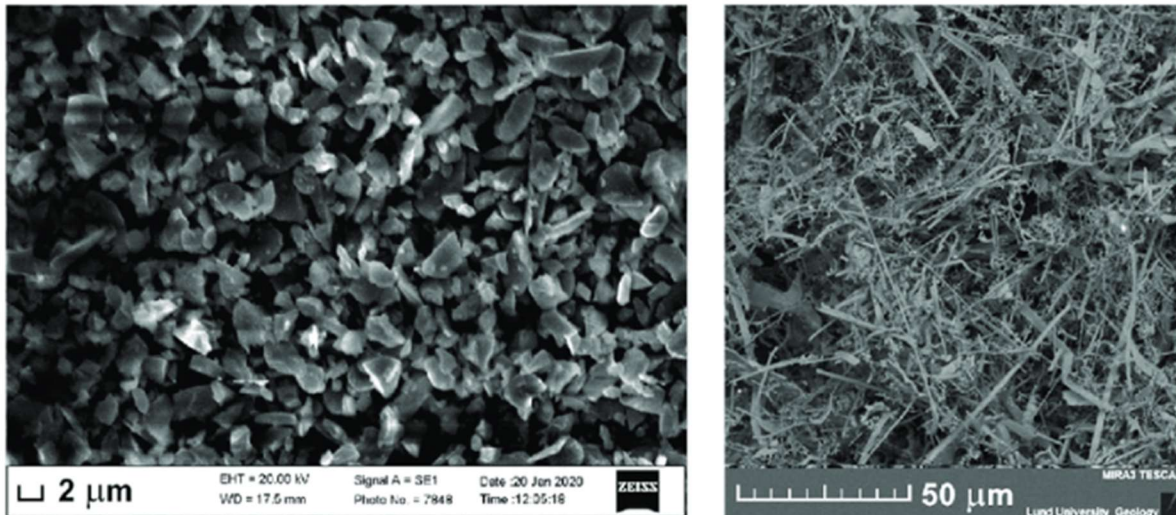
Slika 17. Prikaz vlakana za ojačavanje žilavosti u strukturi [1]

Vlakna omogućuju anizotropna svojstva materijala zbog svoje orijentacije unutar kompozita. Zahvaljujući značajno poboljšanim svojstvima te postojanosti pri povišenim temperaturama, alati izrađeni od  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiC}$  imaju primjenu pri obradi superlegura. Omogućuje se velika produktivnost zahvaljujući brzinama rezanja 760 m/min za super legure, što je veliko poboljšanje u odnosu na keramičko-metalne kompozite (Cermet) od titanij-karbida (TiC) i nikla (Ni) čija je maksimalna brzina rezanja 60 m/min.

Kod kompozitnih materijala dolazi do otklona pukotina zbog vlakana unutar matrice. Ovisno o nagibu i rotaciji pukotina između vlakana, dolazi do znatnog očvršćivanja materijala. Uz to različiti koeficijenti širenja materijala unutar kompozita SiC ( $4,7 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) koji je skoro dvostruko manji od  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $8,6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), stvaraju krug napetosti unutar materijala, matrica je pod vlačnim, a whiskeri pod tlačnim opterećenjem. Zbog navedenih napetosti unutar kompozita dolazi do znatnog povećanja čvrstoće. [1]

Na slici 18 prikazane su mikrostrukture aluminijevog oksida ojačane s prahom, te sa vlaknima za ojačavanje žilavosti.





Slika 18. Prikaz mikrostrukture Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ojačane s prahom (lijevo) i sa vlaknima (desno) [9]

Ovisno o namjeni alata potrebno je odabrati ispravan oblik rezne pločice zajedno sa odgovarajućom geometrijom karakterističnih kuteva te radijus zaobljenja oštrice. Zbog kompozitne strukture, ovakvi alati su izrazito skloni nastanku kratera. Uz krater izraženo je trošenje stražnje površine, te odkrhnuće oštrice. [7]

Izbjegavanje odnosno smanjivanje mogućnosti za nastanak kratera na reznoj oštrici moguće je na nekoliko načina:

- ispravnim ulaskom u zahvat (zakositi nož prilikom ulaska u zahvat),
- variranje dubine rezanja kako bi smo izbjegli konstantno opterećivanje istog dijela oštrice,
- izbjegavati situacije u kojima dijamentni i kvadratni oblik pločica tendiraju nastanku kratera sa dvije strane.

Najčešći oblik ovakvih reznih pločica jest okrugli. Osim izrazite čvrstoće ovakvog geometrijskog oblika, omogućuje se velika sloboda promjene ulaznih kuteva u zahvat.

Primjena alata Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+SiC vlaknima:

- primjenjuje kod obrade superlegura na bazi nikla,
- visoka temperaturna postojanost,
- postoji mogućnost zadržavanja visoke temperature ispred oštrice kako bi se smanjila čvrstoća obratka, te time smanjile sile rezanja i samo trošenje alata,
- mogući veliki posmaci. [1]

### 3.2.3 Cirkonijev oksid $ZrO_2 - Al_2O_3$

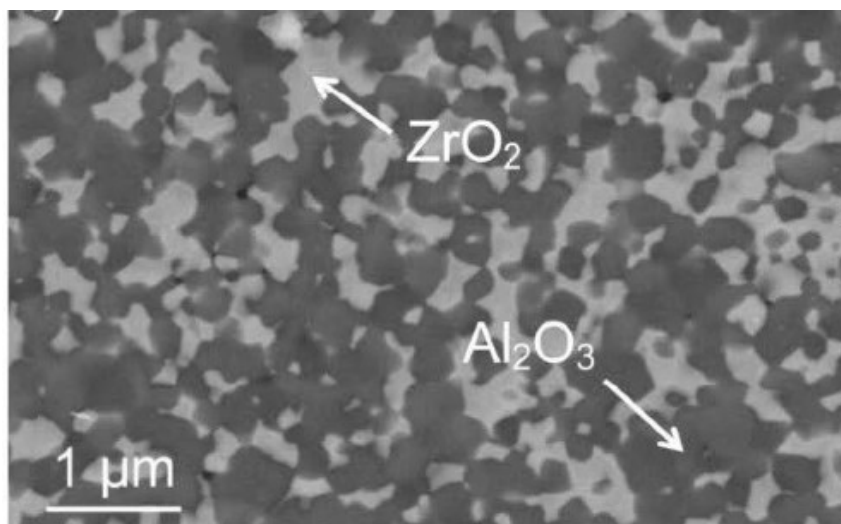
Cirkonijev oksid  $ZrO_2 - Al_2O_3$  pripada skupini finih keramika (inženjerske, napredne keramike), ovakva keramika je našla svoju primjenu u tehničkim strukama zahvaljujući svojim brojnim alotropskim modifikacijama, jednostavnom proizvodnjom iz praha pomoću sinteriranja. Kemijski, toplinski i fizikalno postojana prilikom upotrebe.

Cirkonijev oksid također se poboljšava raznim dodacima kako bi mu se poboljšala određena svojstva i kako bi mu se primjena proširila, najčešće se dodaju magnezijev oksid  $MgO$ , kalcijev oksid  $CaO$ , itrijev oksid  $Y_2O_3$ , cerijev oksid  $CeO_2$  i ostali zemljini oksidi povezani u obliku mischmetal-a.

$ZrO_2$  posjeduje tri poznate kristalne faze: monoklinska (m), tetragonalna (t), te kubična (c). Na sobnoj temperaturi je u monoklinskom obliku, zagrijavanjem na  $1000^\circ C$  prelazi u tetragonalni, a kubična se javlja pri  $2370^\circ C$ .

TZP, ZTA, TTZ su keramike na bazi cirkonija koje se koriste u svrhu obrade materijala odvajanjem čestica. Ovisno o njihovoj unutarnjoj strukturi kristala i međusobnim vezama imaju različita svojstva i različite primjene. Od ovakvih materijala se izrađuju izmjenjive pločice za alate, ali se mogu naći i u obliku zrnaca na brusevima. [1]

Slika 19 prikazuje mikrostrukturu aluminijevog oksida ojačanog cirkonijevim oksidom.



Slika 19. Prikaz mikrostrukture aluminijevog oksida ojačanog cirkonijevim oksidom [9]

### 3.3 Neoksidna keramika

Kao i oksidna keramika, neoksidna keramika se proizvodi isključivo od sintetičkih sirovina. Kod neoksidne keramike pretežito se radi o karbidima, nitridima i



oksinitridima. Ovakvu vrstu keramike odlikuju izuzetna svojstva za koju su zaslužni veliki udijeli kovalentnih veza u karbinim i nitridnim kristalnim strukturama, dok u oksidnim kristalnim strukturama prevladavaju ionske veze. Za ovu vrstu keramike sintetički prah mora biti izuzetno fino mljeven. Proces izgaranja zahtjeva atmosferu bez kisika, vakuum ili inertni plin u hermetički zatvorenim komorama, te izuzetno visoke temperature, preko 2000 °C, što utječe i na samu cijenu postupka proizvodnje koji je skuplji od proizvodnje oksidne keramike. [1]

U tablici 6 prikazana je usporedba fizikalnih svojstava oksidnih i neoksidnih keramika.

Materijal	Youngov modul elastičnosti (Gpa)	Lomna žilavost (Mpa)	Savojna čvrstoća (MPa) 25°C	Toplinska vodljivost (W/mK)	Koef. topl. istezanja (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	390	2,9	270	32,3	8,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + SiC <sub>(w)</sub>	400	6,0	675	35,2	155
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	300	4,4	775	19,4	2,5
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + SiC <sub>(w)</sub>	335	6,4	995	25,2	2,9

Tablica 6. Usporedba fizikalnih svojstava oksidnih i neoksidnih keramika[1]

### 3.3.1 Silicijev nitrid Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> jednofazni je spoj sastavljen od kovalentnih veza, te se pojavljuje u dvije heksagonalne faze α i stabilnija β. Svaka je od tih struktura izvedena iz osnovnog Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> tetraedra pridruženog u trodimenzionalnu mrežu sa zajedničkim bridovima, gdje su dušikovi atomi zajednički trima tetraedrima. Moguće je generirati jednu fazu iz druge rotacijom dvije bazične ravnine za 180°. β Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> faza dobiva se solucijskom percipitacijskom reakcijom α Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> i rastaljenim staklom.[1]

Silicijev nitrid ima dobru kombinaciju svojstva koja ga čini izrazito dobrim materijalom u strojarskoj praksi. Zbog jakih kovalentnih veza, obilježavaju ga ekstremno velika čvrstoća pri visokim temperaturama (do čak 1850 °C), velika žilavost, otpornost na trošenje, mala toplinska rastezljivost i dobra kemijska postojanost što ga čini izvrsnim materijalom za izradu reznog alata. [7]

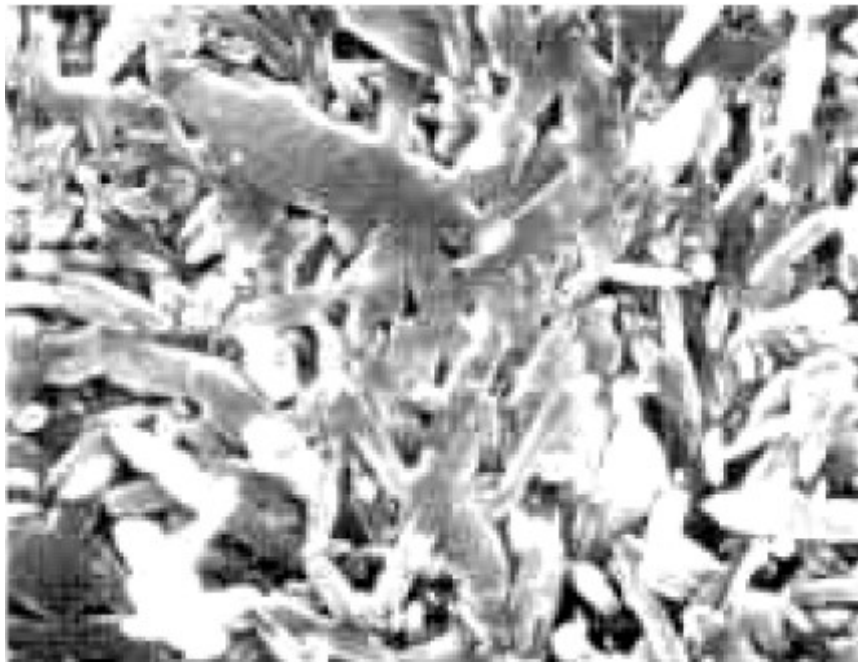
Međutim kao posljedica jakih kovalentnih veza spoj ima jako malu difuziju te se mora primjenjivati više aditiva, stoga je proces proizvodnje je dosta složen. Najveći udio

nečistoće u prahu pri proizvodnji koji se uglavnom sastoji od  $\alpha$  faze  $\text{Si}_3\text{N}_4$  jest silicijev oksid  $\text{SiO}_2$  koji se pojavljuje na površini čestica praha.

HPSN ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) proizvodi se vrućim izostatičkim prešanjem, pri temperaturama od  $1600^\circ\text{C}$  i tlakovima od oko 200 MPa. Dodaci u smjesi reagiraju sa  $\text{SiO}_2$  tvoreći tekuće staklo koje omogućuje reorganizaciju molekula  $\text{Si}_3\text{O}_4$ . U staklu se molekule  $\alpha$   $\text{Si}_3\text{O}_4$  faze razlažu i percipitiraju kao  $\beta$   $\text{Si}_3\text{O}_4$  preko rekonstruktivne fazne transformacije.

Velika čvrstoća se postiže uklanjanjem zaostalih poroznosti zbog velikih tlakova. Veći tlakovi omogućuju korištenje manjih udjela aditiva što poboljšava svojstva pri povišenim temperaturama, ali je ograničena geometrija aksijalnog prešanog HPSN, te veliki troškovi proizvodnje.

Svojstva  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ovise o veličini i raspodijeljenosti  $\beta$  -  $\text{Si}_3\text{N}_4$  faze pretpostavljajući da se je izvršila kompletna preobrazba  $\alpha$ -faze u  $\beta$ -fazu. Poželjno je se što više  $\alpha$ -faze pretvori u  $\beta$ -fazu. Raspodjela veličine zrna  $\text{Si}_3\text{N}_4$  direktno utječe na mehanička svojstva materijala preko faktora intenziteta kritičnog naprezanja. Slika 20 prikazuje strukturu  $\beta$  -  $\text{Si}_3\text{N}_4$  faze. [1]

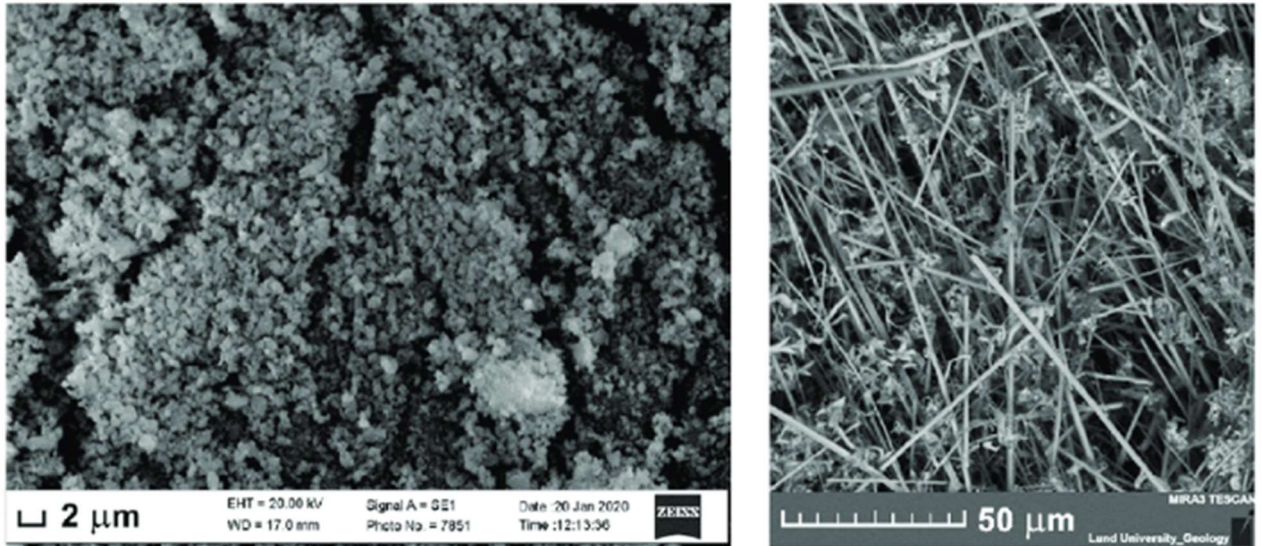


Slika 20. Prikaz strukture  $\beta$  faze  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [9]

Dodavanje disperzijskih faza prijelaznih metala poput titan karbida ili nitrida ( $\text{TiC}$ ,  $\text{TiN}$ ) u matricu, poboljšavaju se svojstva tvrdoće, te se svojstva ponašaju otprilike po pravilu smjese. Alati napravljeni od  $\text{Si}_3\text{N}_4$  koriste se najviše za specijalne primjene gdje ostali alati nisu adekvatni za režime rada ili uopće ne mogu obrađivati neke materijale.

Međutim, nepoboljšani  $\text{Si}_3\text{N}_4$  nije prikladan za obrađivanje željeznih ljevova i čeličnih obradaka zbog izuzetnog abrazivnog trošenja. [1]

Na slici 21 prikazane su mikrostrukture  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ojačane s prahom i vlaknima.



Slika 21. Prikaz mikrostrukture  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ojačane sa prahom (lijevo) i sa vlaknima (desno) [9]

Pokazalo se kako su alati izrađeni od silicijeva nitrida u određenim postupcima (npr. obrađivanje diskova kočnica) 30% produktivniji od onih alata izrađenih od aluminijevih oksida, te kako imaju deseterostruko duži vijek trajanja alata. Pri visokobrzim završnim i polufinim obradama nadilaze sposobnosti alata na bazi aluminijeva oksida i tvrdih metala presvučenih aluminijevim oksidom. [1]

Na slici 22 prikazana je izmjenjiva pločica izrađena od silicijevog nitrida.



Slika 22. Izmjenjiva pločica izrađena na bazi silicijevog nitrida [5]

Primjena alata na bazi  $\text{Si}_3\text{N}_4$ :

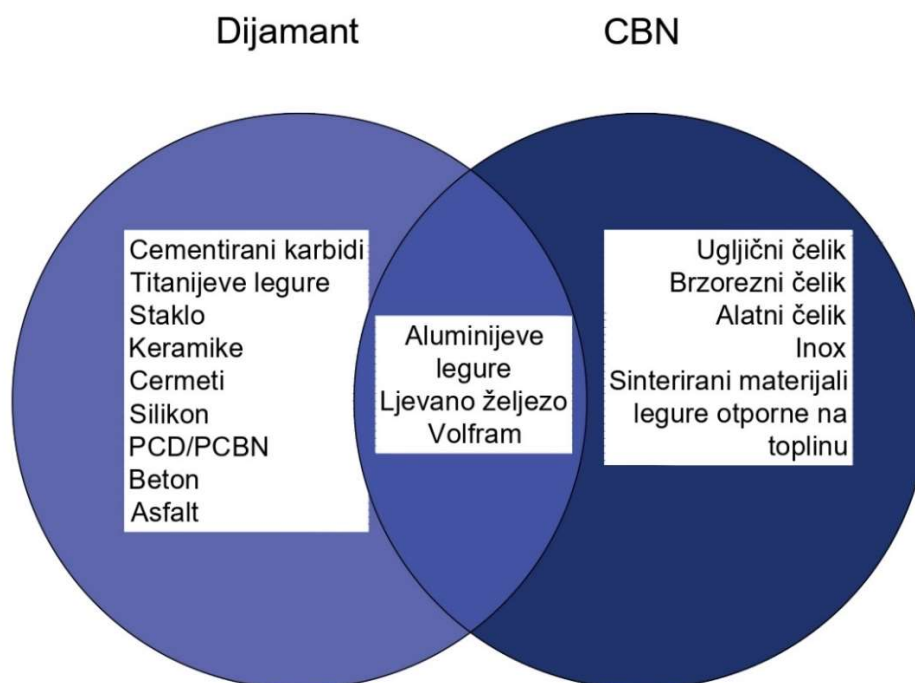
- za viskobrzinske završne i polugrube obrade,
- visoka temperaturna postojanost do 1850 °C,
- mogućnost obrade i pri diskontinuiranim rezanjem (otpornost na udare),
- pogodni (produktivni) za korištenje i na starijim strojevima (alatni strojevi),
- nepoboljšani  $\text{Si}_3\text{N}_4$  nepogodan za obrađivanje željeznih ljevova pogotovo viskolegiranih čelika zbog kemijskog djelovanja. [1]

### 3.4 Keramike visoke tvrdoće

Posebnu skupinu keramika za izradu reznih alata čine polikristalni dijamant (PCD) i kubični bor nitrid (CBN), spadaju u zasebnu kategoriju iz razloga što se odlikuju izrazito visokom tvrdoćom koja nadilazi ostale keramike i za pet puta.

Čovjek je otkrićem dijamanta shvatio da je riječ o posebnom materijalu sa izrazito velikom tvrdoćom, te ga je pokušao koristiti kao alat za oblikovanje. U početku je bilo jako teško doći do dijamanta, te nije našao preveliku primjenu. 20-ih godina prošloga stoljeća, prvi puta je dijamanti prah ubačen sinteriranjem u metalnu matricu. [1]

Na slici 23 prikazani su materijali pogodni za obradu keramikom visoke tvrdoće.



Slika 23. Prikaz materijala pogodnih za obradu keramikom visoke tvrdoće [10]

### 3.4.1 Polikristalni dijamant (PCD)

Pokušaj kompanije General Electric-sa (GE) 1955.godine da napravi umjetan dijamant je bio djelomično uspješan. Dobiveni dijamant se dobio sinteriranjem, a dobiveni rezultat bio je slabo kristaliziran dijamantni prah koji nije bio dobre kvalitete za izradu nakita. Dodatnim ispitivanjima zaključilo se da bi takav dijamantni prah mogao imati strojarsku primjenu. Sličnim postupkom 1957.godine General Electric je omogućio komercijalnu pristupačnost polikristalnog dijamantnog praha za industrijsku primjenu poliranja i brušenja. Otkriveno je da primjenom ekstremnih temperature i tlaka, moguće je ugljik transformirati u gušći dijamant. Umjetni (sintetski) dijamant, proizvodi se uporabom katalitičke otopine pri visokim temperaturama i tlakovima pri čemu dijamant tvori stabilnu fazu. Rast kristala moguće je kontrolirati pa se mogu postići kristali veličine od nekoliko mikrometara do više milimetara. Sinteza dijamanta proizvodi monokristalne dijelove dijamanta koji se vrućim prešanjem prerađuju u polikristalne rezne dijelove. U početku nije bilo moguće proizvesti dovoljno velike kristale da bi se dijamant mogao koristiti u svrhu alata definirane geometrije oštrice, već se koristio zajedno sa bor nitridom (BN) isključivo kao prah u brusnom kamenu. Daljnjim razvojem tehnologije dijamantni prah se počeo ubacivati u metalne matrice, te se je počeo koristiti kao alat sa definiranom geometrijom oštrice i proširio svoju primjenu. [1] Na slici 24 prikazan je alat s reznom oštricom izrađenom od PCD-a.



Slika 24. Prikaz alata s reznom oštricom izrađenom od PCD-a [5]

Unatoč tome što je PCD najtvrdi poznati materijal ne može se primjenjivati pri obradi bilo kojeg materijala. Zbog svoje sklonosti u reakciji sa željezom ne može obrađivati feritne materijale i sve njihove legure. Najrašireniju primjenu je našao u kameno

prerađivačkoj industriji za rezanje velikih kamenih blokova pogotovo granita i mramora. Primjenjuje se za obradu ne željeznih legura, tvrdih i mekih guma, stakla i polimera, te je izvrstan za obradu aluminija (Al) i cinka (Zn) zbog svoje inertnosti.

Nema visoku temperaturnu postojanost kao ostale keramike (do 650 °C), te se koristi za obrade kompozitnih materijala sa metalnom matricom i vlaknima ojačani polimerima. Daje odličnu kvalitetu i točnost rezanja, ponajviše zbog malog koeficijenta trenja koji se javlja prilikom rezanja. U tablici 7 prikazana je usporedba koeficijenata trenja PCD-a i ostalih materijala. Obzirom da je direktno sinteriran bez dodataka posjeduje izotropna svojstva. Veliku primjenu ima u procesima izvlačenja žica, te za obradu drva i drvnih kompozita. PCD ima velike brzine rezanja za aluminijeve legure (čak i do 4600 m/min). [1]

Materijal	Koeficijent trenja
dijamant PCD	0,05
teflon	0,05
volfram karbid	0,2
aluminijev oksid Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2
željezo	1,0
podmazani metal	0,1

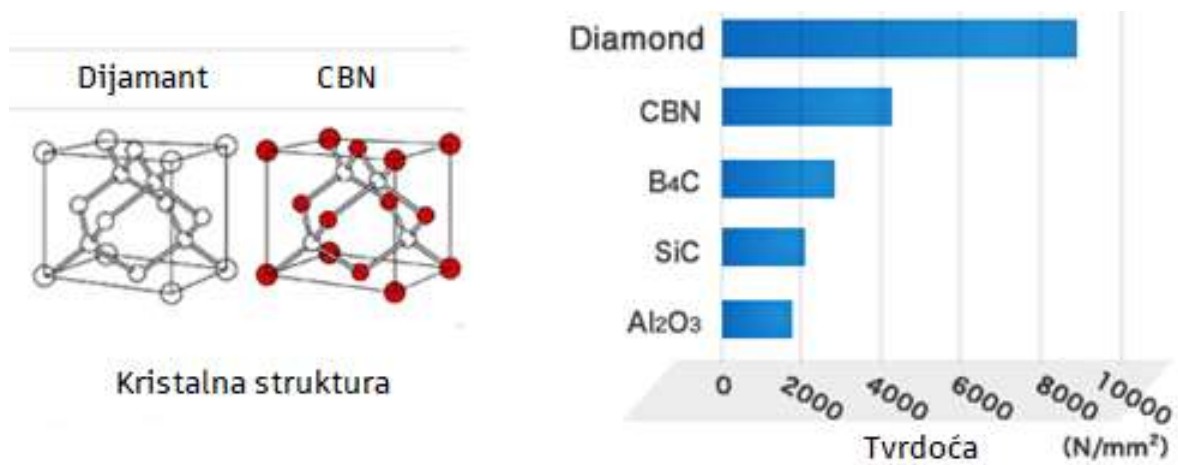
Tablica 7. Usporedba koeficijenata trenja PCD-a i ostalih materijala [9]

### 3.4.2 Kubični bor nitrid (CBN)

Usporedno s otkrićem sinteze dijamanta, znanstvenici su otkrili da bor (B) i dušik (N) također mogu tvoriti plošno centriranu kubičnu rešetku poput dijamanta. Spoj borovog nitrida poznat je od 1920-ih godina, no također kao mekan materijal, s heksagonalnom strukturom rešetke kao i grafit. Nakon mnogo provedenih eksperimenata, sintezom CBN-a, dobiven je vrlo tvrdi spoj kubične strukture i gustoće približne kao i dijamant. Otkriveno je da CBN gotovo savršen konkurent dijamantu u smislu materijala izrade



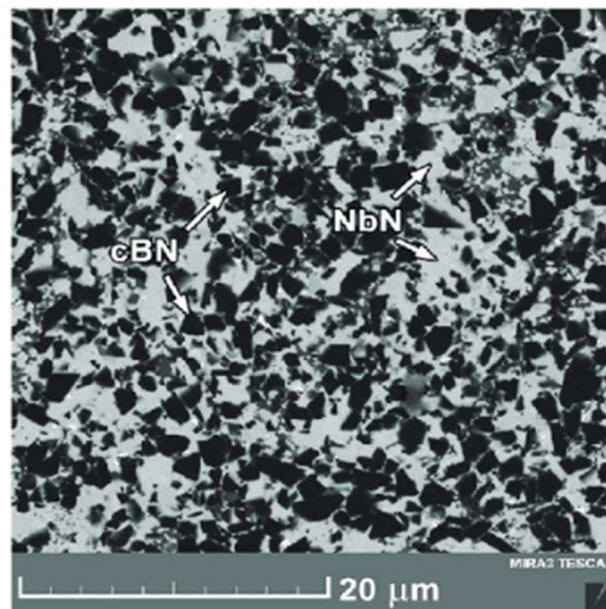
alata za obrade odvajanjem. [1] Na slici 25 prikazana je kristalna struktura CBN-a i njegova usporedba sa ostalim materijalima



Slika 25. Usporedba CBN-a naspram ostalih materijala [10]

Za razliku od mnogih tvrdih metala, cermeta i keramike, zrnca CBN-a i PCD-a su direktno sinterirana bez dodavanja vezivne komponente zbog čega imaju izotropna svojstva. Zbog toga što su površine većine reznih alata uglavnom dvodimenzionalne sinterirani dijamant ili sinterirani CBN uglavnom se upotrebljavaju kao tanki slojevi (0,2 – 1 mm debljine) na pločicama od tvrdog metala. [1]

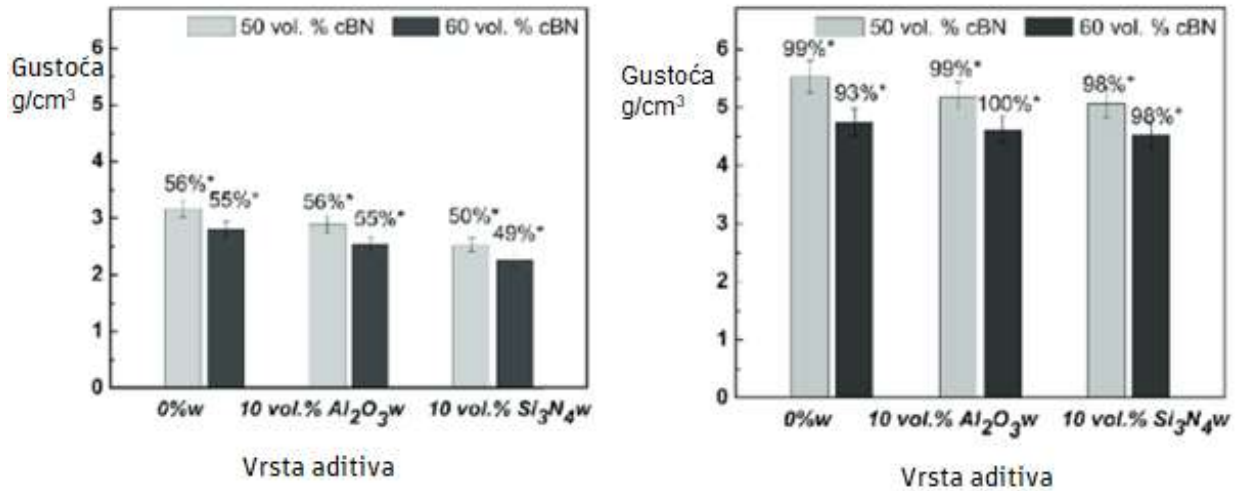
Na slici 26 prikazana je mikrostruktura materijala s 50 % volumnog udjela CBN-a.



Slika 26. Prikaz mikrostrukture materijala sa 50% volumena CBN-a [11]

Kombinacija CBN-a i tvrdog metala posjeduje nekoliko prednosti. Karakterizira je viša žilavost, te niža cijena u odnosu na pločice cjelokupno izrađene od PCD-a ili CBN-a.

U novije se vrijeme CBN-u se dodaju različita veziva uz dodatak različitih karbida s ciljem poboljšanja svojstava (slika 27). [11]



Slika 27. Usporedba rasta gustoće materijala sa različitim udjelima CBN-a, prije i poslije sinteriranja [11]

CBN je zbog svojih izvrsnih mehaničkih svojstava (čak i pri temperaturama većim od 1000 °C) prikladan za izradu specijalnih alata, te ga je moguće oblikovati kako bi se dobili pogodni oblici alata za obradu tokarenjem. Ima značajno manju oksidaciju u odnosu na PCD, te se CBN-om mogu obrađivati svi materijali, uključujući željezo i legure nikla i kobalta. [1] Na slici 28 prikazana je izmjenjiva pločica CBN-a.

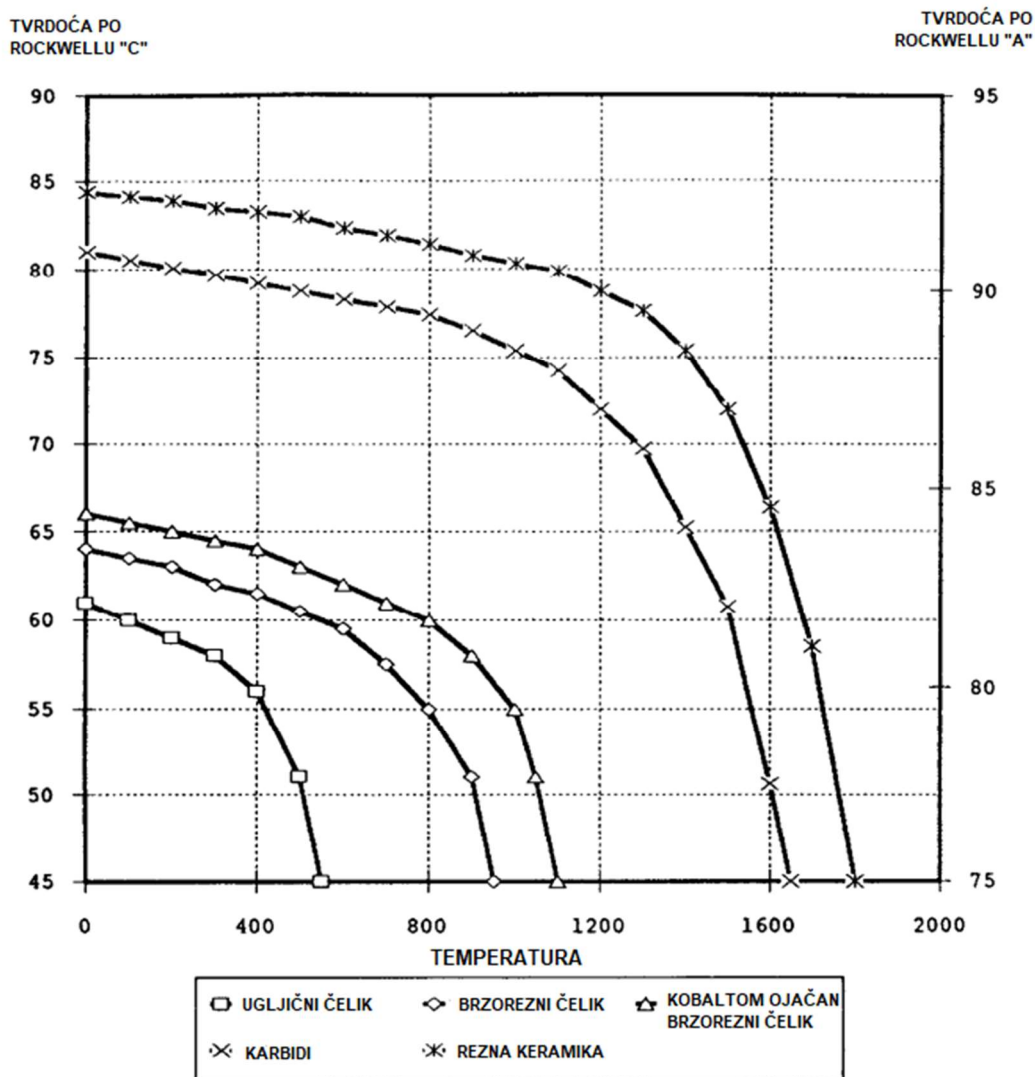


Slika 28. Izmjenjiva pločica CBN-a. [5]



#### 4. Zastupljenost rezne keramike u proizvodnji strojnom obradom

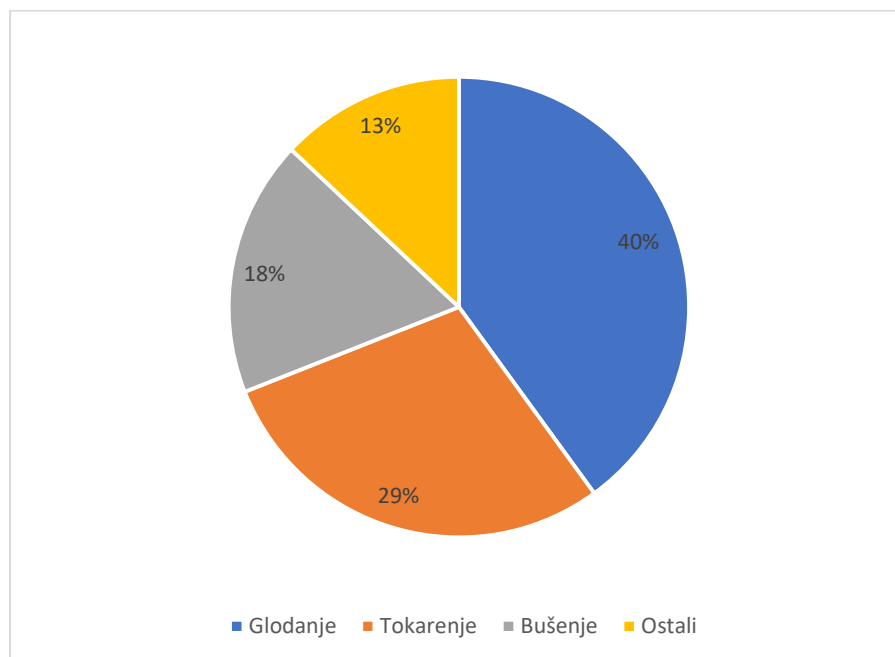
Prvi korak u stvaranju učinkovitog plana obrade, te uspješne i kvalitetne proizvodnje je odabir materijala alata za obradu odvajanjem čestica. Faktor koji najviše utječe na taj odabir je materijal samog obratka i metoda obrade toga komada. Kako bih se ta odluka donijela što točnije, moraju se u obzir uzeti čimbenici koji se tiču alatnog stroja (brzina rezanja, snaga, režim rada) i materijala obratka. Sila i brzina rezanja, kao dominantni čimbenici ovog odabira, jer uvelike utječu na temperaturu koja se postiže prilikom obrade. Generalno može se reći da alati s većom tvrdoćom postižu veće brzine rezanja (slika 29), sukladno tome imaju veću toleranciju na toplinu, što rezultira većom produktivnošću same obrade. [1]



Slika 29. Usporedba materijala alata za obradu odvajanjem čestica u ovisnosti o temperaturi rezanja [1]

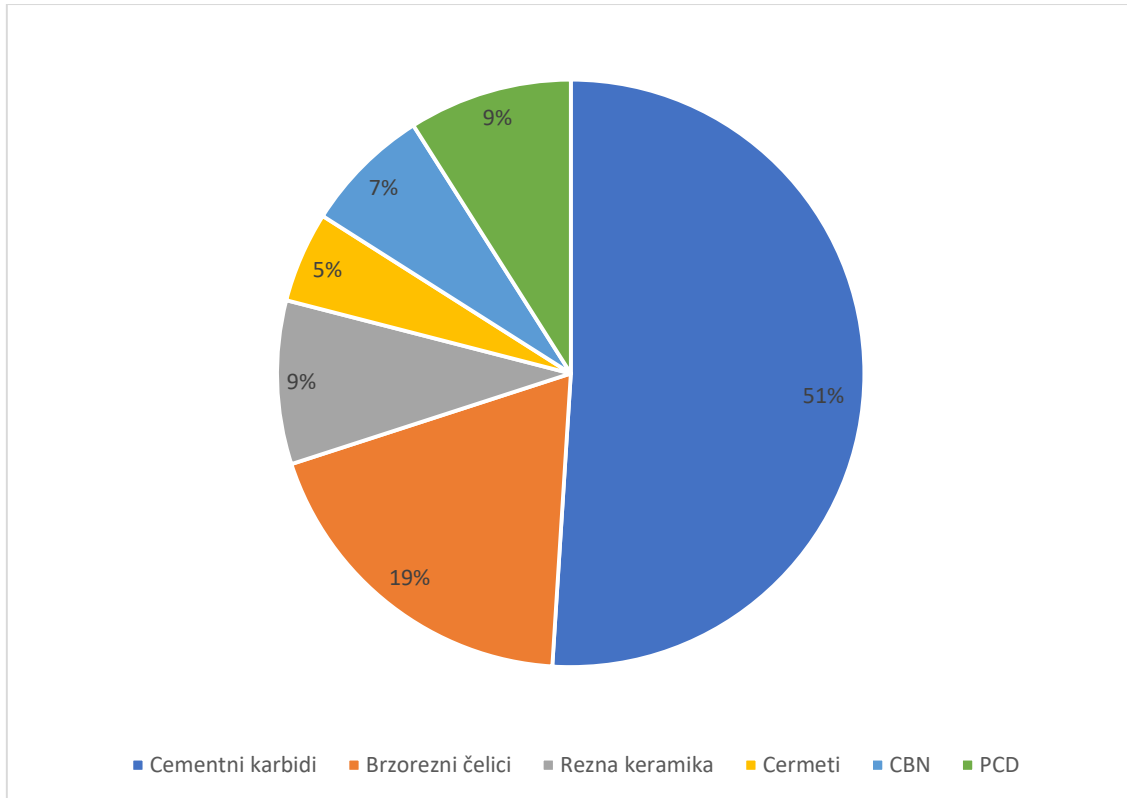
Izbor materijala alata za obradu odvajanjem čestica ne svodi se samo na fizikalne čimbenike, već tu odluku uvijek treba potkrijepiti sa ekonomskom analizom. Na ekonomsku analizu utječu faktori obrade i kvaliteta krajnjeg proizvoda. Na cijenu materijala, a time i na cijenu obradnog procesa utječe brzina i broj izmjena alata tokom obrade. Bržim i količinski manjim izmjenama smanjuje se vrijeme koje u kojem obradni centar ne radi, te samim time se podiže produktivnost obradnog procesa. Sukladno tome, siguran izbor materijala alata bio bi onaj koji zadovoljava ovakve uvjete obrade. [1]

Uzimajući u obzir sve navedene čimbenike za odabir materijala alata za obradu odvajanjem čestica, svjetsko tržište pokazalo je da je najpopularniji materijal tvrdi metal. Alat za obradu odvajanjem čestica od tvrdog metala proizvodi se miješanjem volfram karbida sa kobaltom (vezivo koje drže cementni karbid zajedno), s mnoštvom varijacija u veličini zrna karbida i omjerom karbida i veziva. Preferirane mješavine razvijene su tijekom vremena kako bi se postigla učinkovitost s različitim dubinama i širinama rezanja, kao i materijalima obratka. Distribucija reznih alata na globalnom tržištu prema metodi strojne obrade i materijalom alata prikazana je na slici 28. Može se vidjeti da su primarni procesi obrade glodanje, tokarenje i bušenje, a alati za te operacije zauzimaju gotovo 87% ukupnog tržišta alata za obradu odvajanjem čestica. (slika 30) [12]



Slika 30. Globalno tržište alata za obradu odvajanjem čestica prikazano kroz metodu obrade [12]

Što se tiče vrste reznog materijala, tvrdi metali zauzimaju polovicu tržišta, nakon čega slijedi brzorezni čelik. Keramika, cermeti i materijali visoke tvrdoće, kao što su polikristalni dijamant (PCD) i polikristalni kubični bor nitrid (PCBN) bilježe preostali udio na tržištu materijala alata (slika 31). [12]



Slika 31. Globalno tržište alata za obradu odvajanjem čestica prikazano kroz materijal alata [12]

Prednosti keramike u odnosu na alatni čelik i cementirani karbid svojstvene su kao rezultat sastava i kristalne rešetke. Keramika je tvrda, inertna i zadržava svojstva na visokim temperaturama. Glavni nedostatak povezan s upotrebom rezne keramike kao materijala za alate u proizvodnji strojnom obradom je loša žilavost. Rezultat su okrhnuća oštrice i lomljenje alata. Kao rješenje problema, razvilo se nekoliko tehnika za jačanje oštrice, koji uzrokuju postepeno trošenje, a ne pucanje ili lomljenje. To uključuje povećanje debljine ili polumjera nosa alata koji mogu rezultirati poboljšanom izvedbom. Kada se tendencija prijeloma zbog krhkosti smanji, keramika ima potencijal za opću primjenu za obradu čelika i istiskivanje većeg dijela umetaka od tvrdog metala sa tržišta.

## 5. Zaključak

Zahtjevi suvremene proizvodnje iziskuju što bržu proizvodnju, uz najmanje moguće troškove, te veliku točnost izrade. Veća produktivnost je omogućena visokobrzinskom proizvodnjom, međutim velike brzine rezanja uvelike utječu na radne uvijete, te se ostvaruju daleko više temperature pri obradi. Životni vijek alata se značajno smanjuje. Ovakve uvijete obični alati izrađeni na bazi metalnih legura ne mogu izdržati. Pojava tehničke keramike uvelike je pridonijela novoj vrsti visokobrzinske proizvodnje.

Tehničke keramike imaju daleko bolja mehanička svojstva od kojih se najviše ističe temperaturna postojanost i tvrdoća, međutim zbog dugotrajnog i zahtjevnog procesa izrade takvih alata njihova cijena je i 10-ak puta veća od standardnih alata. Zbog toga, kako bi se postigla njihova isplativost u eksploataciji, mehanička svojstva moraju biti daleko iznad standardnih alata, te se alati od tehničkih keramika moraju koristiti uz prilagođenu i planiranu proizvodnju kako bih cjelokupni proces bio isplativ.

## Popis Literature

- [1] E. Dow Whitney: Ceramic Cutting Tools; Materials, Development and Performance, Noyes Publications, New Jersey, 1994.
- [2] S.Ekinović: Obrada rezanjem, Zenica, 2001.
- [3] S. Škorić: Predavanja iz kolegija Obrada odvajanjem čestica, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.
- [4] Z. Jurković: Predavanja iz kolegija Proizvodni strojevi, alati i naprave, Tehnički fakultet, Rijeka, 2018.
- [5] [www.sandvik-coromant.com](http://www.sandvik-coromant.com)(pristupljeno 13.travanj 2022.)
- [6] T. Udiljak: Predavanja iz kolegija Postupci obrade odvajanjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [7] T. Filetin i I. Kramer: Tehnička keramika, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
- [8] M. Dundjer: Izrada proizvoda od keramika,  
<https://www.ffri.hr/~mdundjer/Strojarska%20tehnologija%20II/03%20Izrada%20proizvoda%20od%20keramika.doc> (pristupljeno 21.travanj 2022.)
- [9] Breivary Technical Ceramics:  
[http://www.nonmet.mat.ethz.ch/education/courses/Materialwissenschaft\\_2/brevier.pdf](http://www.nonmet.mat.ethz.ch/education/courses/Materialwissenschaft_2/brevier.pdf)(pristupljeno 21.travanj 2022.)
- [10] <https://www.asahidia.co.jp/eng/support/alphabet/> (pristupljeno 21.svibanj 2022.)
- [11] Yu Rumiantseva, Iu Melnichuk, V. Garashchenko: Influence of cBN content, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> additives and their morphology on microstructure, properties, and wear of PCBN with NbN binder  
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0272884220316205?token=29EB1A71E7AF72382F9D4A816CA8657E14D9594AFADC8DCD92C8AE9A1BCF5CC8EB16D5ADF0C61E082380DA96ED17346C&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220628235813>(pristupljeno 21.svibanj 2022.)
- [12] A. Rizzo, S. Goel, M. L. Grilli, R. Iglesias, L. Jaworska, V. Lapkovskis, P. Novak, B. O. Postolnyi i D. Valerini: The Critical Raw Materials in Cutting Tools for Machining Applications: A Review, <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/6/1377/html> (pristupljeno 15.lipanj 2022.)

## Popis slika

Slika 1. Razvoj reznih alata [2] .....	1
Slika 2. Svojstva materijala alata za obradu odvajanjem čestica [3].....	2
Slika 3. Prosječne vrijednosti žilavosti i tvrdoće osnovnih materijala alata za obradu odvajanjem čestica [2] .....	3
Slika 4. Usporedba trajanja oštrice brzoreznog čelika i tvrdih metala [1].....	5
Slika 5. Sile i brzine rezanja kod tokarenja [4] .....	7
Slika 6. Tokarski nož sa izmjenjivom reznom pločicom [5] .....	8
Slika 7. Prikaz zamjene rezne pločice [5] .....	9
Slika 8. Prikaz kuteva rezne oštrice [6].....	10
Slika 9. Prikaz zastupljenosti pojedinog trošenja alata ovisno o temperaturi [6].....	11
Slika 10. Tijek proizvodnje tehničke keramike [8] .....	13
Slika 11. Prikaz postupaka usitnjavanja sirovine za pripravu keramičkog praha [8] .	14
Slika 12. Prikaz postupka lijevanja u formu [8] .....	15
Slika 13. Prikaz lijevanja na traku [8] .....	15
Slika 14. Prikaz procesa sinteriranja [9].....	16
Slika 15. Prikaz strukture $Al_2O_3$ [9].....	19
Slika 16. Prikaz tvrdoće u zavisnosti o temperaturi s obzirom na vrstu materijala [1] 19	
Slika 17. Prikaz vlakana za ojačavanje žilavosti u strukturi [1] .....	21
Slika 18. Prikaz mikrostrukture $Al_2O_3$ ojačane s prahom (lijevo) i sa vlaknima (desno) [9] .....	22
Slika 19. Prikaz mikrostrukture aluminijevog oksida ojačanog cirkonijevim oksidom [9] .....	23
Slika 20. Prikaz strukture $\beta$ faze $Si_3N_4$ [9].....	25
Slika 21. Prikaz mikrostrukture $Si_3N_4$ ojačane sa prahom (lijevo) i sa vlaknima (desno) [9] .....	26
Slika 22. Izmjenjiva pločica izrađena na bazi silicijevog nitrida [5].....	26
Slika 23. Prikaz materijala pogodnih za obradu keramikom visoke tvrdoće [10].....	27
Slika 24. Prikaz alata s reznom oštricom izrađenom od PCD-a [5].....	28
Slika 25. Usporedba CBN-a naspram ostalih materijala [10].....	30
Slika 26. Prikaz mikrostrukture materijala sa 50% volumena CBN-a [11].....	30

Slika 27. Usporedba rasta gustoće materijala sa različitim udjelima CBN-a, prije i poslije sinteriranja [11].....	31
Slika 28. Izmjenjiva pločica CBN-a. [5] .....	31
Slika 29. Usporedba materijala alata za obradu odvajanjem čestica u ovisnosti o temperaturi rezanja [1].....	32
Slika 30. Globalno tržište alata za obradu odvajanjem čestica prikazano kroz metodu obrade [12] .....	33
Slika 31. Globalno tržište alata za obradu odvajanjem čestica prikazano kroz materijal alata [12].....	34

## Popis Tablica

Tablica 1. Preporuke za odabir reznih materijala [2].....	4
Tablica 2. Usporedba svojstava tvrdih metala i cermeta [1].....	6
Tablica 3. Primjena tehničke keramike [7] .....	12
Tablica 4. Temperature sinteriranja keramičkih materijala [1].....	17
Tablica 5. Usporedan prikaz fizikalnih svojstava oksidne keramike i tvrdih metala [1] .....	18
Tablica 6. Usporedba fizikalnih svojstava oksidnih i neoksidnih keramika[1].....	24
Tablica 7. Usporedba koeficijenata trenja PCD-a i ostalih materijala [9] .....	29