

# Rezne keramike

Antonio Nekić<sup>a</sup>, Vedrana Špada<sup>b</sup>

**a** Bacc. ing. mech., Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Tehnički fakultet, Zagrebačka 30, 52.100 Pula, Hrvatska

**b** Doc. dr. sc., dipl. ing. kem. teh., voditeljica Centra za istraživanje METRIS, Istarsko veleučilište – Università Istriana di scienze applicate, Preradovićeva 9D, 52.100 Pula-Pola, Hrvatska (vspada@iv.hr)

## Sažetak

*Cilj ovog preglednog rada je istražiti ulogu tehničke keramike u procesu strojne obrade materijala odvajanjem čestica, s naglaskom na prednosti i izazove upotrebe keramike kao materijala za rezne alate. U radu je dana detaljna podjela tehničke i tradicionalne keramike s primjerima njihove primjene. Također, rad obuhvaća pregled standardnih materijala za proizvodnju reznih alata, različitih tipova alata, te tipova trošenja alata tijekom obrade. Analizirana su svojstva i strukturalna građa tehničke keramike koja se koristi u strojnoj obradi. Rad završava osvrtom na globalno tržište proizvodnje strojnom obradom. Tehnička keramika ima značajne prednosti kao alat za strojnu obradu, zbog svoje tvrdoće i otpornosti na visoke temperature, dok joj je nedostatak krhkost i niska žilavost.*

**Ključne riječi:** tehnička keramika, strojna obrada, rezni alati, rezne keramike

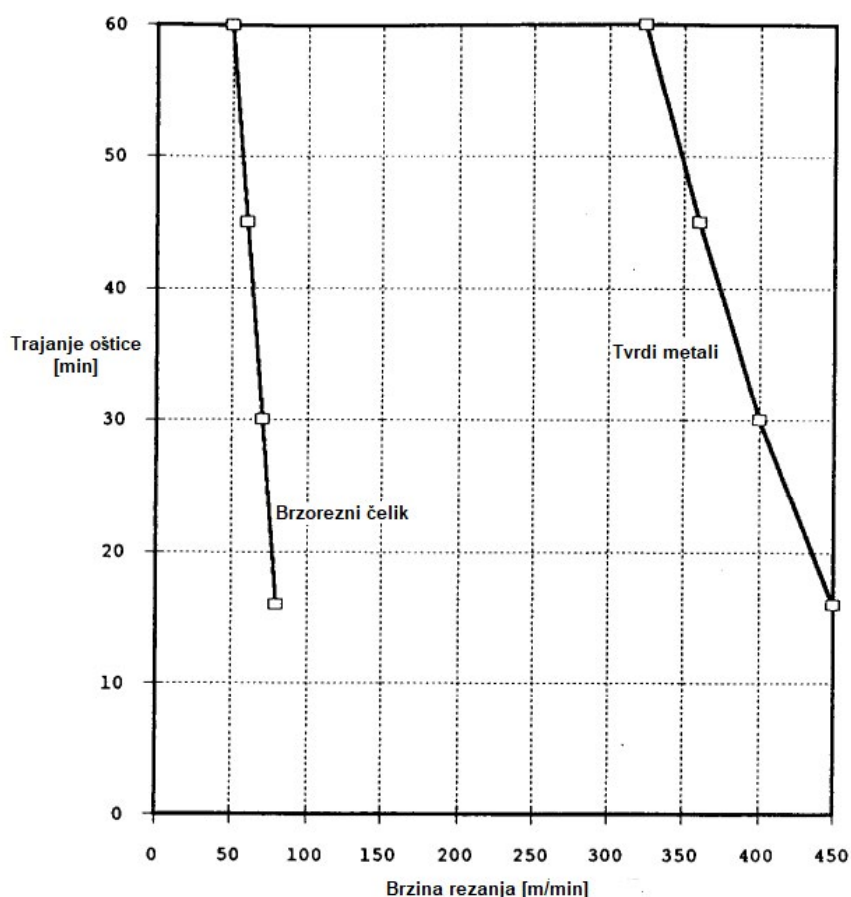
## 1. Uvod

U ovom radu naglasak je stavljen na prednosti i izazove povezane s korištenjem keramike kao materijala za izradu reznih alata. Pregled literature uključuje opis standardnih materijala koji se koriste za proizvodnju različitih tipova reznih alata te različite načine trošenja alata tijekom strojne obrade. U radu se prikazuje podjela keramika na tehničke i tradicionalne keramike, ilustrirajući njihove specifične primjene kroz praktične primjere. Kritički su analizirana svojstva i građa tehničke keramike, koja se koristi u strojnoj obradi odvajanjem čestica, kako bi se pružilo dublje razumijevanje njene izvedbe i ograničenja. Osim toga, rad daje uvid u globalne tržišne trendove i buduće perspektive strojne obrade s reznim alatima izrađenim od tehničke keramike.

### 1.1. Povijesni razvoj alata za strojnu obradu

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 i drveni alati. Napretkom tehnologije te sukladno razvojem strojeva, razvijali su se i alati. S industrijskom revolucijom pojavila se strojna obrada slična onoj danas, a rezni alati i materijali za rezne alate imaju velik značaj u strojnoj obradi. Takvi alati i materijali za rezne alate moraju zadovoljiti što veću produktivnost i efikasnost, uz propisanu preciznost. Početkom 20. stoljeća otkriven je novi materijal, brzorezni alatni čelik (HSS). Pojavom alata od HSS materijala mogle su se postići drastično veće brzine rezanja, nego kod, do tada korištenih visoko ugljičnih čelika (Uhlmann, Shauer i Richard, 2005).

Slika 1. Usporedba trajanja oštrice brzoreznog čelika i tvrdih metala (Ekinović, 2001)



Krajem drugog svjetskog rata otkrivene su nove legure i materijali te su time dodatno povećane brzine rezanja i trajnost alata. Veliki napredak u industriji alata za strojnu obradu postignut je pojavom sinteriranih tvrdih metala i tehničkih keramika čije su brzine rezanja i do 1500 m/min, primjerice silicijevog nitrida (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) (Trent i Wright, 2000). Na slici 1. prikazana je brzina trošenja oštrice kod brzoreznog čelika u odnosu na tvrde metale (Shalaby i Veldhuis, 2010). Prilikom izrade proizvoda, pogotovo u malim poduzećima, gdje je riječ isključivo o maloserijskim proizvodnjama te konstantnoj promjeni zahtjeva i materijala izratka, pouzdan i dugovječan alat je od neizmjerne važnosti (Whitney, 1994).

## 1.2. Alati za strojnu obradu

Alati za strojnu obradu služe za oblikovanje, preoblikovanje i poboljšavanje površina obradaka, kada rezanjem (struganjem) odvajaju materijal od obratka po unaprijed određenoj putanji alata.

Najčešći alati za strojnu obradu su tokarski noževi, svrdla, glodala, razvrstala i sl. (König, Berktold i Koch, 1993). Takvi 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 (Škorić, 2008).

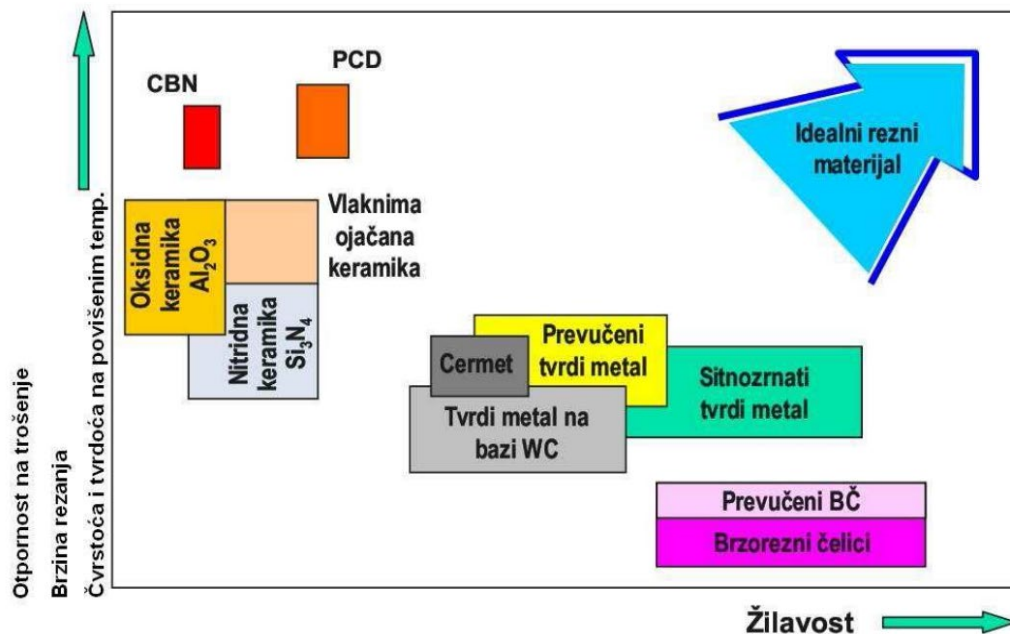
Najčešći materijali koji se upotrebljavaju za izradu alata za strojnu obradu su:

- brzorezni čelici (HSS),
- tvrdi metali (cementni karbidi),
- keramičko-metalni kompoziti (engl. *cermet*),
- oksidne rezne keramike,
- nitridne rezne keramike,
- kubični bor nitrid (CBN),
- polikristalni dijamanti (PCD) (Stephenson i Agapiou, 2016).

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

može vidjeti kako rezne keramike odlikuje visoka čvrstoća i tvrdoća uz nisku žilavost.

**Slika 2. Svojstva materijala alata za obradu odvajanjem čestica (Škorić, 2008)**



Kako bi se izradio alat za strojnu obradu odvajanjem čestica, materijal mora ispunjavati uvjete otpornosti na trošenje te udarnu izdržljivost (Silva, Diniz i Marcondes, 2007). Alatni čelici imaju visoku žilavost, što znači kako se alat neće trajno deformirati pod konstantnim djelovanjem naprezanja, za razliku od reznih keramika koje imaju nižu udarnu izdržljivost, ali mogu istovremeno postići velike brzine i raditi na visokim temperaturama (Ozel i Altan, 2000). Pri odabiru materijala za rezne alate, važan faktor je materijal obratka. Za metalne obratke, mora se paziti na vlačnu čvrstoću koja može povećati trošenje alata (Ekinović, 2001). Preporuke za odabir reznih materijala ovisno o materijalu koji se želi tim alatima obraditi prikazane su u tablici 1.

Brzorezni čelik je jedan od prvih materijala korišten za strojne alate zbog svoje visoke žilavosti,

ali uz mali otpor trošenju i temperaturnu postojanost (Tönshoff, Wulfsberg i Zitt, 1997; Tönshoff, Wulfsberg i Tönshoff, 2001). Poboljšavanje reznih sposobnosti može se postići sinteriranjem i prevlačenjem tankim slojem tvrdog materijala (Ekinović, 2001).

Tvrđi metali su razvijeni kao materijali za strojne alate, zbog nedostataka brzoreznog čelika u pogledu trošenja alata. Oni se sastoje od volfram karbida kao glavne komponente i kobalta kao veživa. Otpornost na trošenje i postojanost pri visokim temperaturama su prednosti ovih materijala (Wang i Rajurkar, 2000). Grupa tvrdih metala se dijeli u tri skupine (P, M, K) koje se razlikuju u omjeru kobalta i karbida te ovisno o tome se mijenjaju i svojstva materijala. Ostali materijali kod alata za strojnu obradu su rezne keramike (Ekinović, 2001).

**Tablica 1. Preporuke za odabir reznih materijala sukladno materijalu obratka (Ekinović, 2001)**

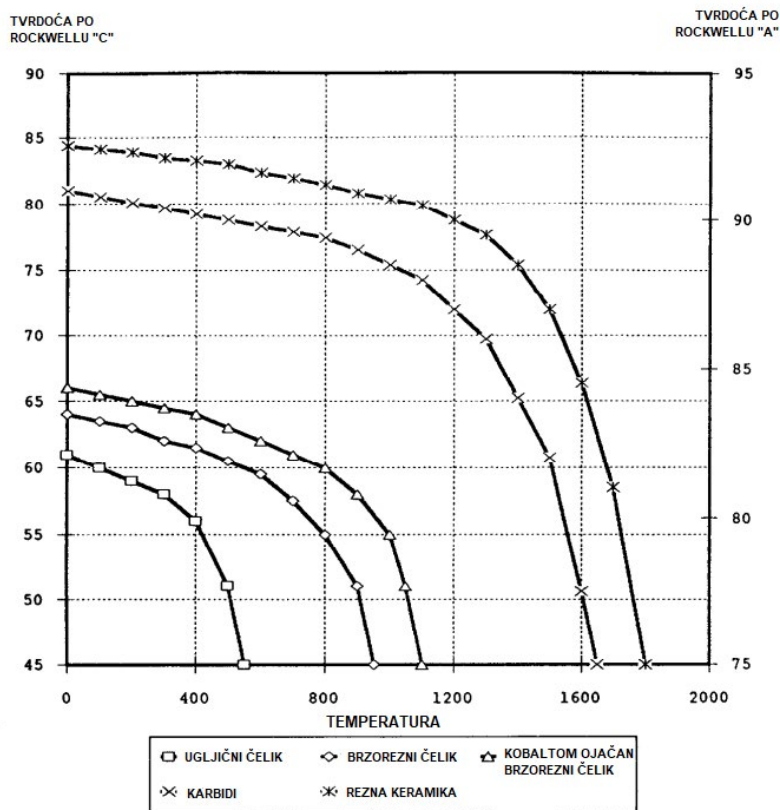
REZNI MATERIJAL	Čelik	Visoko legirani čelik	Sivi lijev	Neželjeni metali	Specijalni materijali	Tvrđi materijali
<b>Brzorezni čelik</b>						
Standardni	+	+	+	+	+	-
Presvučeni	+	+	+	+	+	-
Sinterirani	+	+	-	-	+	-
<b>Tvrđi metal</b>						
Nepresvučeni, P	++	+	-	-	+	-
Nepresvučeni, M	+	++	+	-	-	-
Nepresvučeni, K	-	-	+	+	-	-
Presvučeni, P	++	+	+	-	+	-
Presvučeni, K	-	+	++	-	-	-
Cermet	++	+	+	-	-	-
<b>Rezna keramika</b>						
Oksidna	+	-	++	-	-	+
Miješana	+	-	++	-	-	+
Ojačana vlaknima	+	+	+	-	++	-
Nitridna	-	-	++	-	-	-
CBN	-	-	+	-	-	++
PCD	-	-	-	++	-	-

++ prioritetno korištenje, + moguće korištenje, - ne upotrebljava se

### 1.3. Zastupljenost rezne keramike u proizvodnji strojnih alata

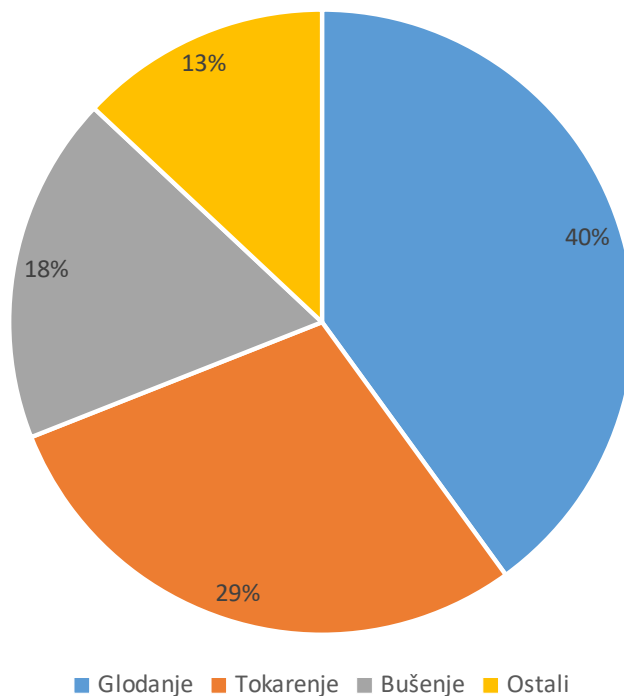
Odabir materijala alata za obradu je važan korak u stvaranju plana za učinkovitu i kvalitetnu proizvodnju. Kako bi se donijela što točnija odluka, potrebno je uzeti u obzir faktore koji se tiču alatnog stroja i materijala obratka, s naglaskom na brzinu i silu rezanja koje utječu na temperaturu obrade (Guo i Warren, 2004). Alati s većom tvrdoćom imaju veću toleranciju na toplinu i postižu veće brzine rezanja (slika 3.), što povećava produktivnost obrade, a rezne keramike tu zauzimaju nezamjenjivo mjesto (Whitney, 1994).

Slika 3. Usporedba materijala strojnih alata u ovisnosti o temperaturi rezanja (Whitney, 1994)



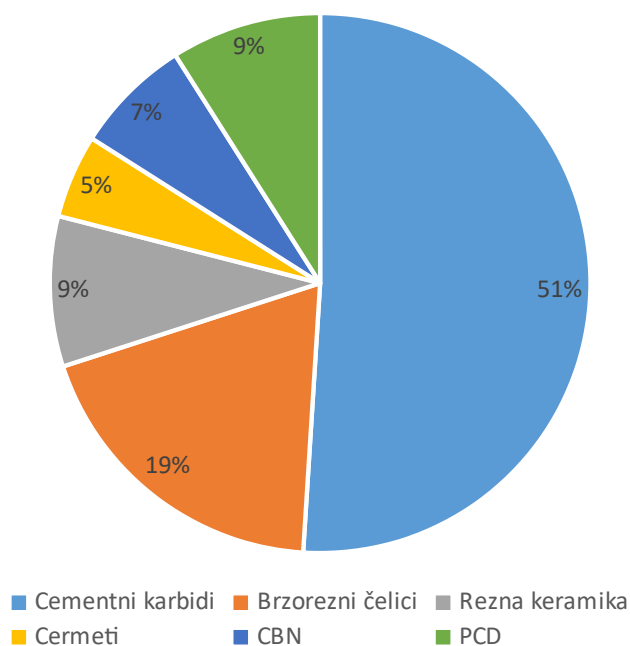
Izbor materijala alata za strojnu obradu ne svodi se samo na analizu za primjenu važnih svojstava, već tu odluku uvijek treba potkrijepiti s ekonomskom analizom. Na ekonomsku analizu utječu faktori obrade i kvaliteta krajnjeg proizvoda. Na cijenu materijala, a time i na cijenu obradnog procesa utječe brzina i broj izmjena alata tijekom obrade. Bržim i količinski manjim izmjenama smanjuje se vrijeme 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. Uzimajući u obzir sve navedene čimbenike za odabir materijala alata za strojnu obradu, svjetsko tržište pokazalo je da je najpopularniji rezni materijal tvrdi metal. Zastupljenost najčešćih tehnologija strojne obrade na svjetskom tržištu prikazana je na slici 4. Može se zaključiti kako su primarni procesi obrade glodanje, tokarenje i bušenje (Ming i Shih, 2002), a alati za te operacije zauzimaju gotovo 87% ukupnog tržišta alata za strojnu obradu (slika 4.) (Rizzo i sur., 2022).

Slika 4. Globalno tržište prema metodama strojne obrade (Rizzo i sur., 2022)



Što se tiče vrste reznog materijala, tvrdi metali zauzimaju polovicu svjetskog 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 5.) (Rizzo i sur., 2022).

**Slika 5. Globalno tržište materijala reznih alata (Rizzo i sur., 2022)**



## 2. Rezne keramike

Keramika je anorganski materijal koji se sastoji od spojeva metala i nemetala. Nakon pečenja na visokim temperaturama, keramika postiže svoja svojstva, uključujući veliku tvrdoću, krhkost, neotpornost na drastične promjene temperature, otpornost na trošenje i koroziju, visoku temperaturnu postojanost i dobru izolaciju topline i struje. Keramika se može podijeliti u dvije skupine: tradicionalnu (poput opeka i porculana) i tehničku (koja se sastoji od čistih kemijskih spojeva poput oksida, karbida i nitrida).

Tehničke keramike su napredni keramički materijali koji se koriste u različitim industrijskim primjenama zbog svojih izuzetnih mehaničkih, toplinskih i kemijskih svojstava. Za razliku od tradicionalne keramike, koja se koristi u građevinskoj industriji i za kućanske predmete, tehničke keramike su dizajnirane kako bi izdržale ekstremne uvjete rada, kao što su visoke temperature, visoki tlakovi i agresivna kemijska okruženja. Tehnička keramika se može koristiti u najrazličitijim primjenama, što je prikazano u tablici 2. (Filetin i Kramer, 2005).

**Tablica 2. Primjena tehničke keramike (Filetin i Kramer, 2005)**

Utjecaji	Svojstva	Primjeri primjene
<b>Toplinski</b>	postojanost pri visokim temperaturama i promjenama temp., izolacijska svojstva	dijelovi gorionika, grijača, metalurgija, ispušni sistemski slojevi, izolatori
<b>Mehanički</b>	čvrstoća pri visokim temp., dugotrajno opterećenje, otpornost umoru, tribološka svojstva	dijelovi tribosistema strojeva, klizni prstenovi, dijelovi motora, turbopunjači, dijelovi plinskih turbina, prevlake
<b>Kemijski</b>	kemijska postojanost, biokompatibilnost, sposobnost adsorpcije	zaštita od korozije, nosači katalizatora, oprema u ekologiji, senzori, implantati, zglobovi, zubi
<b>Električni</b>	električna vodljivost/električna otpornost, piezoelektricitet i termoelektricitet, dielektrična svojstva	elementi grijača, izolatori, magneti, senzori elektroničke komponente, substrati, feroelektrici, kućišta, čvrsti elektroliti, poluvodiči, supervodiči
<b>Optički</b>	providnost i provođenje svjetlosti, fluorescencija, fokusiranje svjetlosti	svjetiljke, prozori za razl. vrste zračenja, zrcala, optička vlakna
<b>Nuklearni</b>	propusnost zračenja, odnosno upijanje zračenja, temp. i kemijska postojanost, postojanost za zračenje	dijelovi gorivih jezgri, apsorberi, spremnici visokoradioaktivnog otpada

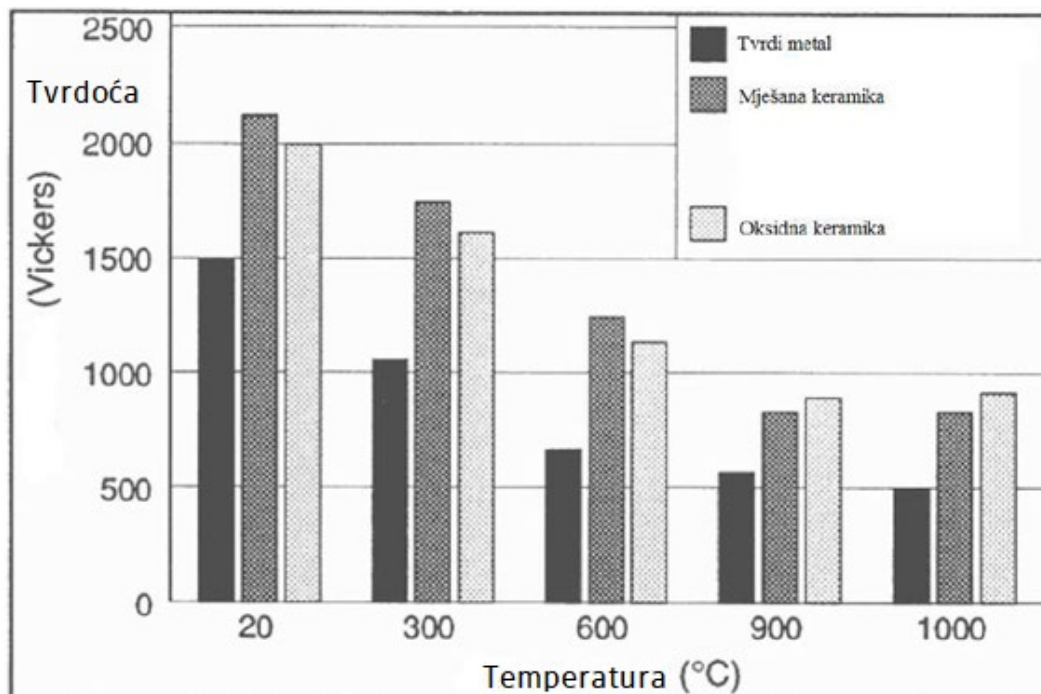
Tehničke keramike igraju ključnu ulogu u modernoj strojnoj obradi. Rezne keramike su specijalizirani materijali koji se koriste za proizvodnju alata za strojnu obradu. Unatoč njihovim izazovima, kao što su krhkost i visoka cijena, njihova izvanredna svojstva čine ih nezamjenjivima u zahtjevnim industrijskim primjenama. Rezne keramike, kao što su  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , sialon i cermeti, omogućavaju bržu i efikasniju obradu, što dovodi do povećane produktivnosti i nižih troškova u dužem roku (M'Saoubi, Outeiro, Chandrasekaran, Dillon i Javahir, 2008). Njihova glavna prednost leži u sposobnosti da izdrže visoke temperature i sile rezanja, što omogućava bržu i učinkovitiju obradu materijala u usporedbi s tradicionalnim alatnim materijalima poput brzoreznih čelika ili tvrdih metala.

## 2.1. Oksidna keramika

Keramički materijali koji se sastoje pretežito od jednofaznih metalnih oksida koriste se u elektrotehnici, elektronici te drugim strukama (Gosh, Mitra i Bhattacharyya, 2008). Aluminijski oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

je poznat po svojoj tvrdoći, otpornosti na trošenje i visokoj temperaturi taljenja. Cirkonijev oksid ( $\text{ZrO}_2$ ) odlikuje izuzetna otpornost na pucanje i visoka žilavost, koristi se u medicini i kao materijal za rezne alate. Najčešće se kao rezna keramika koristi aluminijski oksid, no sama oksidna keramika nije dovoljno otporna u reznjnoj tehnici, stoga se miješa s 30-40% titanovog karbida i/ili titanovog nitrida kako bi se poboljšala njena otpornost. Iako postoje bolji keramički materijali, aluminijski oksid ojačan titan karbidom ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ ) je izvrstan za izradu tokarskih noževa i može postići velike tolerancijske točnosti uz male hrapavosti površina. (Liu, X., Rahman, Liu, K. S. i Gan, 2004; Marinescu, Rowe, Dimitrov i Inasaki, 2004). Ova vrsta keramike prikladna je za uvjete rada do  $800^\circ\text{C}$ , međutim treba paziti na njenu oksidaciju iznad te temperature kako bi se očuvala prvobitna svojstva. Slika 6 prikazuje odnos tvrdoće o temperaturi za tvrde metale, čistu oksidnu keramiku i oksidnu keramiku pomiješanu sa titanovim karbidom i nitridom ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}/\text{TiN}$ ).

**Slika 6. Prikaz tvrdoće u zavisnosti o temperaturi s obzirom na vrstu materijala (Whitney, 1994)**



Svojstva oksidnih keramika se dodatno poboljšavaju i ojačanjem s  $\text{ZrO}_2$  i silicijevim karbidom ( $\text{SiC}$ ) u obliku praha i vlakana.  $\text{ZrO}_2$  omogućava transformacijsko ojačanje, a  $\text{SiC}$  pospješuje žilavost i

otpornost na lom. Ovakvi alati imaju povećanu kemijsku postojanost i otpornost na nastajanje  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$  stakla pri visokim temperaturama i hidrostatskom tlaku. Primjenjuju se za grubu i

završnu obradu i kontinuirano rezanje uz velike brzine bez emulzije te su izvrsni za rezanje sivog i nodularnog lijeva. Mogu podnositi temperature do 800°C i diskontinuirana opterećenja uz ispravnu geometriju oštrice (Whitney, 1994).

## 2.2. Neoksidna keramika

Kao i oksidna keramika, neoksidna keramika se proizvodi isključivo od sintetičkih sirovina. Kod

neoksidne keramike pretežito se radi o karbidima, nitridima i oksini- nitridima. Silicijev nitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) je vrlo snažan materijal s izvrsnim svojstvima u strojarskoj praksi. Ima visoku čvrstoću, žilavost, otpornost na trošenje, malu toplinsku rastezljivost i dobru kemijsku postojanost, što ga čini idealnim materijalom za izradu reznog alata. Otporan je na toplinski šok. U tablici 3. prikazana je usporedba fizikalnih svojstava oksidnih i neoksidnih keramika.

**Tablica 3. Usporedba fizikalnih svojstava oksidnih i neoksidnih keramika (Whitney, 1994)**

Materijal	Youngov modul elastičnosti (Gpa)	Lomna žilavost (Mpa)	Svojna čvrstoća (Mpa) 25° C	Toplinska vodljivost (W/Mk)	Koef. topl. istezanja ( $10^{-6}\text{K}^{-1}$ )
$\text{Al}_2\text{O}_3$	390	2,9	270	32,3	8,2
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_{(w)}$	400	6,0	675	35,2	155,0
$\text{Si}_3\text{N}_4$	300	4,4	775	19,4	2,5
$\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{SiC}_{(w)}$	335	6,4	995	25,2	2,9

Dodavanjem disperzijskih faza prijelaznih metala kao što su TiC i TiN u matricu, svojstva tvrdoće se poboljšavaju. Alati napravljeni od  $\text{Si}_3\text{N}_4$  se najviše koriste za specijalne primjene, međutim, nisu prikladni za obradu željeznih ljevova i čeličnih obradaka zbog abrazivnog trošenja (Yao, Wang i Xu, 2012). Pokazalo se kako su alati od  $\text{Si}_3\text{N}_4$  produktivniji i imaju duži vijek trajanja od alata na bazi aluminijskih oksida (Kayacan i Polat, 2005). Primjenjuju se za visokobrzinske obrade i obrade pri diskontinuiranom rezanju (Pawade i Joshi, 2011), te su prikladni za korištenje na starijim strojevima. (Filetin i Kramer, 2005; Nakao i Sato, 1997).

Sialon je modificirana varijanta  $\text{Si}_3\text{N}_4$  s dodatkom aluminijskih, kisika i drugih elemenata te pruža poboljšana mehanička i toplinska svojstva u odnosu na čisti  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Ovakvu vrstu keramike odlikuju izuzetna svojstva za koju su zaslužni veliki udijeli kovalentnih veza u karbidnim 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 zahtijeva 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 (Whitney, 1994).

## 2.3. Keramike visoke tvrdoće

Čovjek je otkrićem dijamanta shvatio da je riječ o posebnoj materijalu s 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. Sintetski dijamanti proizvode se korištenjem metalne matrice pod visokim temperaturama i tlakovima kako bi se tvorila stabilna faza dijamanta (Popov i Grigoriev, 2017). Kristalni rast se može kontrolirati kako bi se postigli različiti veličine kristala. U početku, dijamanti su se koristili samo kao prah u brusnom kamenu, ali se s razvojem tehnologije počeo koristiti kao alat s definiranom geometrijom oštrice.

Posebnu skupinu keramika za izradu reznih alata čine polikristalni dijamant (PCD) i kubični borov nitrid (CBN), a spadaju u zasebnu kategoriju jer se odlikuju izrazito visokom tvrdoćom koja nadilazi ostale keramike i za pet puta. CBN i PCD su tvrdi materijali koji se koriste u reznim alatima. Za razliku od drugih metala, oni su direktno sinterirani bez vezivnih komponenti, što im daje izotropna svojstva. Karbidi (npr. SiC, borov karbid - B<sub>4</sub>C) koriste se za rezne alate i oblaganja zbog svoje iznimne tvrdoće i otpornosti na habanje. CBN drugi

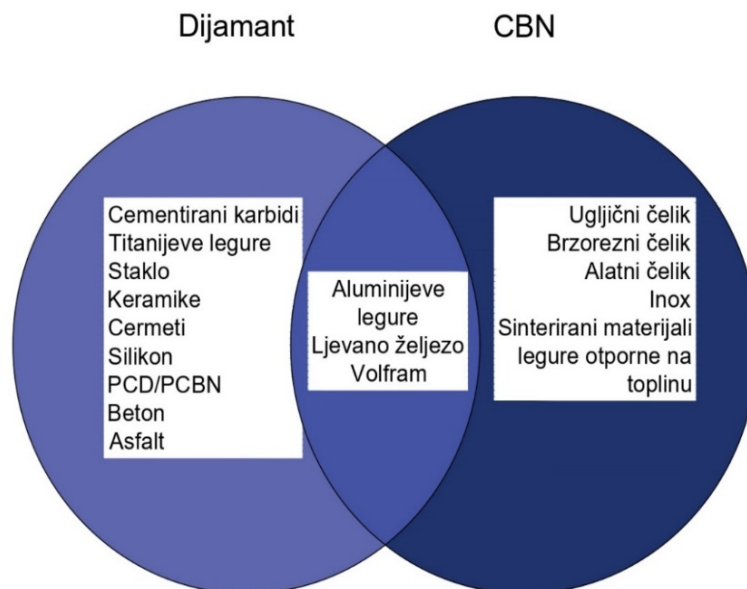


najtvrdi materijal nakon dijamanta, koristi se za obradu vrlo tvrdih materijala. Iako je i PCD vrlo tvrd materijal, ne može se koristiti za obradu feritnih materijala i njihovih legura zbog njegove reakcije sa željezom. Primjena sintetskog dijamanta je raširena u kamenj industriji, a koristi se i za obradu neželjezovitih legura, guma, stakla, polimera, aluminija i cinka. PCD je izvrstan za obradu kompozitnih materijala s metalnom matricom i vlaknima ojačanih polimera zbog svojih izotropnih svojstava i malog koeficijenta trenja (Whitney, 1994). Reznim alatima se obično dodaje tanak sloj sinteriranog dijamanta ili CBN-a na pločicu od tvrdog metala radi bolje učinkovitosti. Kombinacija CBN-a i tvrdog metala nudi višu žilavost i nižu cijenu u odnosu

na PCD i cjelokupne pločice izrađene od CBN-a. Na slici 7. prikazani su materijali pogodni za obradu keramikom visoke tvrdoće.

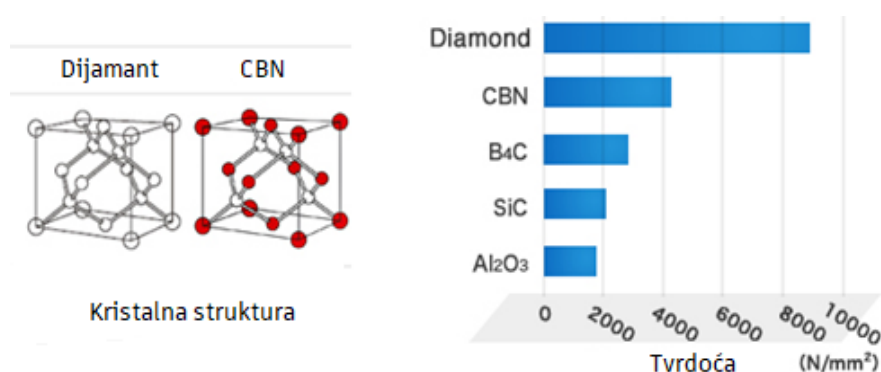
CBN se također koristi kao materijal za izradu reznih strojnih alata, jer ima gotovo iste karakteristike kao dijamant (Whitney, 1994). CBN se može oblikovati za izradu specijalnih alata za tokarenje, a ima i manju oksidaciju od PCD-a, što mu omogućuje obradu svih vrsta materijala, uključujući željezo i legure nikla i kobalta. Nedavno se CBN-u dodaju različita veziva i karbidi radi poboljšanja svojstava (Rumiantsera, Melnichuk i Garashchenko, 2022). Na slici 8. uspoređen je CBN s drugim materijalima.

**Slika 7. Prikaz materijala pogodnih za obradu keramikom visoke tvrdoće Asahidia (bez dat.)**



Izvor: Preuzeto 21. 05. 2022. s <https://www.asahidia.co.jp/eng/support/alphabet/>

**Slika 8. Usporedba CBN-a naspram ostalih materijala Asahidia (bez dat.)**



Izvor: Preuzeto 21. 05. 2022. s <https://www.asahidia.co.jp/eng/support/alphabet/>

U posljednjih dvadesetak godina razvijeni su procesi proizvodnje polikristalnog dijamanta bez matrice. Ovi procesi omogućavaju stvaranje PCD alata s poboljšanom čvrstoćom i otpornosti na habanje, što ih čini izuzetno pogodnim za visoko precizne i dugotrajne aplikacije u obradi tvrdih i abrazivnih materijala (Shafiei, Luo i Walter, 2019).

## 2.4. Cermeti

Cermeti su kompozitni materijali koji kombiniraju keramičke faze s metalnim vezivima. Nude kombinaciju tvrdoće keramike i žilavosti metala, čime se postiže bolja otpornost na habanje i toplinska stabilnost. Cermet je razvijen za daljnje poboljšanje u pogledu trošenja i temperaturne postojanosti, a sastoji se od titanovog karbida ili titanovog nitrida s metalnom fazom nikal-kobalt kao vezivom. U usporedbi s tvrdim metalima i alatnim čelikom, cermet postiže bolju postojanost pri visokim temperaturama i manje trošenje.

## 3. Zaključak

Keramika ima prednosti kao rezni alat zbog tvrdoće i otpornosti prema visokim temperaturama, ali nedostatak joj je niska žilavost i udarna otpornost. Razvijene su nove tehnike za jačanje oštrice, koje povećavaju debljinu ili polumjer nosa alata. Tehničke keramike imaju bolja mehanička svojstva u odnosu na alatne čelike i ostale opisane rezne materijale, ali su skuplje i zahtijevaju prilagođenu proizvodnju. Keramički rezni alati mogu omogućiti visokobrzinsku proizvodnju u uvjetima velikih brzina rezanja i visokih temperatura.

## Literatura

- Asahidia (bez dat.). Preuzeto 21. 05. 2022. s <https://www.asahidia.co.jp/eng/support/alphabet/>
- Ekinović, S. (2001). *Obrada rezanjem*. Zenica.
- Filetin, T., Kramer, I. (2005). *Tehnička keramika*. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Zagreb.
- Ghosh, S., Mitra, R., & Bhattacharyya, B. (2008). *Machining of non-conducting ceramics by electrochemical discharge machining*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(5), 446-458.
- Guo, Y. B., & Warren, A. W. (2004). *An experimental investigation of hard turning of AISI 52100 steel with ceramic tools: tool wear, cutting forces, and surface integrity*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126(1), 33-41.
- Kayacan, M. C., & Polat, N. (2005). *Cutting tool wear mechanism in the machining of titanium alloy*. *Wear*, 259(7-12), 688-693. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.02.095>
- König, W., Berkold, A., & Koch, K. F. (1993). *Turning versus grinding—a comparison of surface integrity aspects and attainable accuracies*. *CIRP Annals*, 42(1), 39-43.
- Liu, X., Rahman, M., Liu, K. S., & Gan, J. G. (2004). *A study of the abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite*. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(1), 492-499.
- M'Saoubi, R., Outeiro, J. C., Chandrasekaran, H., Dillon, O. W., & Jawahir, I. S. (2008). *A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products*. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 1(1-2), 203-236. <https://doi.org/10.1504/IJSM.2008.019293>
- Marinescu, I. D., Rowe, W. B., Dimitrov, B., & Inasaki, I. (2004). *Tribology of abrasive machining processes*. William Andrew.
- Ming, W. Q., & Shih, A. J. (2002). *Finite element modeling of residual stresses in hard turning of bearing steel*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124(1), 55-63.
- Nakao, Y., & Sato, M. (1997). *Cutting temperature and wear behavior of ceramic tools in high-speed machining*. *Wear*, 205(1-2), 105-112. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07432-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07432-8)
- Ozel, T., & Altan, T. (2000). *Process simulation using finite element method—prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high-speed flat end milling*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(5), 713-738.
- Pawade, R. S., & Joshi, S. S. (2011). *Multi-objective optimization of high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi-based utility function*. *Journal of Materials Processing Technology*, 208(1-3), 252-264.
- Popov, V. L., & Grigoriev, S. N. (2017). *Polycrystalline diamond (PCD): From innovative idea to tool development*. *Procedia CIRP*, 63, 320-326.

- Rizzo, A., Goel, S., Grilli, M. L., Iglesias, R., Jaworska, L., Lapkovskis, V., Novak, P., Postolnyi, B. O., & Valerini, D. (2022). *The Critical Raw Materials in Cutting Tools for Machining Applications: A Review*. MDPI.
- Rumiantseva, Y., Melnichuk, I., Garashchenko, V. (2022). *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*, Elsevier.
- Shafiei, M., Luo, X., & Walter, C. (2019). *Development of binderless polycrystalline diamond compact for ultra-precision machining*. *Journal of Manufacturing Processes*, 44, 232-240.
- Shalaby, M., & Veldhuis, S. C. (2010). *Wear mechanisms of several cutting tool materials in hard turning of H13 tool steel*. *Tribology International*, 43(11), 2113-2121.
- Silva, L. R., Diniz, A. E., & Marcondes, F. C. (2007). *Tool wear analysis in the machining of hardened steels*. *Wear*, 263(1-6), 674-683.
- Stephenson, D. A., & Agapiou, J. S. (2016). *Metal cutting theory and practice (3rd ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19496>
- Škorić, S. (2008). *Predavanja iz kolegija Obrada odvajanjem čestica*. Fakultet strojarstva i Brodogradnje. Zagreb.
- Tönshoff, H. K., Wulfsberg, J., & Zitt, U. (1997). *Application of piezoelectric accelerometers in the machine tool*. *CIRP Annals*, 46(1), 39-42.
- Trent, E. M., & Wright, P. K. (2000). *Metal cutting (4th ed.)*. Butterworth-Heinemann.
- Tönshoff, H. K., Wulfsberg, J. P., & Tönshoff, C. H. (2001). *High-speed cutting—fundamentals and limitations*. *CIRP Annals*, 50(1), 5-18.
- Uhlmann, E., Schauer, K., & Richard, H. A. (2005). *Machining of titanium alloys using high-performance cutting*. *Production Engineering*, 1(1), 15-20.
- Wang, J., & Rajurkar, K. P. (2000). *Cryogenic machining of hard-to-cut materials*. *Wear*, 239(2), 168-175.
- Whitney, D.E. (1994). *Ceramic Cutting Tools; Materials, Development and Performance*. Noyes Publications. New Jersey.
- Yao, C., Wang, Z., & Xu, J. (2012). *Wear mechanisms and tool life of PVD-AlTiN coated tools in high-speed dry milling of AISI H13 steel*. *Wear*, 288, 79-87.

## Cutting Ceramics

### Summary

*This review paper aims to explore the role of technical ceramics in the material machining process using particle separation, with an emphasis on the advantages and challenges of using ceramics as cutting tool materials. The paper includes a review of standard materials for the production of cutting tools, different types of tools, and types of tool wear during machining. Additionally, the paper provides a detailed classification of technical and traditional ceramics, with examples of their applications. The properties and structural composition of technical ceramics used in particle separation machining are analyzed. The paper concludes with an overview of the global market for machining production. Technical ceramics have significant advantages in machining due to their hardness and resistance to high temperatures, while their drawbacks include brittleness and low toughness.*

**Keywords:** technical ceramics, machining, cutting tools, cutting ceramics