Tehnička keramika, primjena i svojstva

Ergotić, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:137:719264

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli

Odjel za tehničke studije

Ana Ergotić

TEHNIČKA KERAMIKA, PRIMJENA I SVOJSTVA

Završni rad

Pula, srpanj 2021. godine

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

Tehnički fakultet u Puli

Odjel za tehničke studije

Ana Ergotić

TEHNIČKA KERAMIKA, PRIMJENA I SVOJSTVA

Završni rad

JMBAG: 0303079454, redoviti student

Studijski smjer: Preddiplomski stručni studij proizvodno strojarstvo

Predmet: Materijali I.

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarstvo

Znanstvena grana: Proizvodno strojarstvo

Mentor: prof. dr. sc. Loreta Pomenić

Komentor: doc.dr.sc. Vedrana Špada

Pula, srpanj 2021. godine

Tehnički fakultet u Puli

Materijali I

(Predmet)

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

TEHNIČKI FAKULTET U PULI

ZADATAK TEME ZAVRŠNOGA RADA

Pristupniku/ci **Ana Ergotić** **MBS:** 0303079454

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

Tehnička keramika, primjena i svojstva

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

Redovni, proizvodno strojarstvo

Datum: 12.01.2021

Potpis nastavnika Prof. dr. sc. Loreta Pomenić

Potpis nastavnika dr. sc. Vedrana Špada

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisana Ana Ergotić, kandidat za prvostupnika strojarstva ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mojega 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, 1.7. 2021 godine

IZJAVA

o korištenju autorskog djela

Ja, Ana Ergotić dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom “Tehnička keramika, primjene i svojstva“ 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.

U Puli, srpanj.2021 godine

Potpis

_____

Sažetak

U ovom završnom radu prikazana je povijest keramike od otkrića pa sve do dana današnjeg, te kako je napredovala keramika od početka. Navedena je osnovna podjela keramike, zatim podjela tehničke keramike, njezina građa i svojstva. U radu su također opisane prednosti i nedostaci tehničke keramike, kao i njezina primjena.

Keramika se dijeli na tradicionalnu i tehničku. Najvažnija sirovina tradicionalne keramike je glina iz koje se proizvode opeke, pločice, sanitarne keramike i posuđe. Tehnička keramika poznata kao i inženjerska keramika, anorganski je materijal koji spada u skupinu materijala s izvrsnim mehaničkim, električnim i toplinskim svojstvima .

Tehnička keramika se odlikuje velikom tvrdoćom, visokom čvrstoćom, niskom gustoćom, izvrsnom otpornošću na trošenje, otpornošću na visoke temperature, te je dobar električni izolator.

Ključne riječi: tehnička keramika, tradicionalna keramika

Summary

In this final paper, the history of ceramics from its discovery to the present day is showed, and how ceramics has progressed from the beginning. The basic division of ceramics is given, then the division of technical ceramics, its structure and properties. The paper also describes the advantages and disadvantages of technical ceramics, as well as its application.

Ceramics is divided into traditional and technical. The most important raw material of traditional ceramics is clay, from which bricks, tiles, sanitary ceramics and utensils are produced. Technical ceramics, known as engineering ceramics, is an inorganic material that belongs to the group with the excellence mechanical, electrical and thermal properties.

Technical ceramics are characterized by high hardness, high compressive strength, low density, excellent wear resistance, resistance to high temperature, and is a good electrical insulator.

Keywords: technical ceramics, traditional ceramics

Sadržaj

1.Uvod 1
2. Povijest keramike 2
3. Podjela keramike 8
4.Tehnička keramika 11
4.1. Građa tehničke keramike 15
4.1.1. Silikati 15
4.1.2. Oksidi 17
4.1.3. Neoksidni materijali 17
5. Svojstva tehničke keramike 20
5.1. Optimizacija strukture 23
5.2. Fazna transformacija 24
5.3. Prednosti tehničke keramike 26
5.4. Nedostaci tehničke keramike 27
6. Primjena tehničke keramike 29
6.1. Primjena tehničke keramike u strojarstvu 30
6.2. Primjena tehničke keramike u elektrotehnici i elektronici 35
6.3. Primjena tehničke keramike u medicini 37
7. Proizvodnja gotovih proizvoda iz tehničke keramike 39
8. Zaključak 41
Literatura 42

1.Uvod

Tehnički materijali služe za izradu tehničkih proizvoda. Svaki materijal ima svoja određena svojstva, odnosno karakteristike. Poznavanje tih karakteristika omogućuje odrediti najbolji optimalni materijal koji će biti potreban u daljnjoj proizvodnji, te njegovo ponašanje prilikom korištenja. Današnji se materijali više ne mogu uspoređivati s onima koji su bili na tržištu prije deset ili dvadeset godina. Razvoj materijala povezan je s razvojem čovjeka, a keramički materijali su prisutni od davnina. Najjednostavniji primjer je kuhinjsko posuđe i sanitarna keramika. Tehnička keramika se počela sve više primjenjivati u medicinske svrhe sve do raznih dijelova koji služe za tehničke sklopove i druge funkcionalne dijelove.

Znatno se povećao interes za keramiku jer predmeti izrađeni od keramike dobro zadržavaju prvobitna svojstva u raznim uvjetima kao i u dugotrajnoj uporabi. Jedna je od glavnih vrsta materijala, zajedno s metalima, polimerima i kompozitima. U ovom će radu konkretno biti opisana tehnička keramika, razvoj keramike kroz povijest, važnost keramike, njezina svojstva i primjena.

2. Povijest keramike

Keramika spada među najstarije materijale koji sežu tisućama godina unatrag. To su proizvodi izrađeni od gline ili slične tvari, oblikovani u tekućem, plastičnom, poluplastičnom, suhom ili praškastom stanju, a zatim sušeni i pečeni na dovoljno visokoj temperaturi kako bi se dobila potrebna mehanička svojstva. Danas se među keramičke proizvode svrstava niz proizvoda koji nisu izrađeni od gline ili drugih silikata, ali im je tehnologija izradbe i preradbe slična keramičkoj tehnologiji koja obuhvaća prešanje, izvlačenje, tokarenje, lijevanje, sušenje i pečenje. Keramički su proizvodi, prema tome, produkti faznih promjena nemetalnih materijala na visokim temperaturama. Ključna proizvodnja je rođena kada su ljudi otkrili da se glina može pronaći u izobilju i pretvoriti u predmete miješanjem prvo s vodom, a potom pečenjem. Najstariji poznati keramički eksponat izrađen je još od 28. tisućljeća prije Krista, a riječ je o kipu žene nazvane Venera iz Dolni Vestonice (Slika 1), iz prapovijesnog naselja u Češkoj [6]. Na tom su području također otkrivene stotine figura od gline koje predstavljaju životinje iz ledenog doba. Prvi primjeri keramike pojavili su se u istočnoj Aziji nekoliko tisuća godina kasnije. U Kini su pronađeni odlomci lonaca stari od 18.000-17.000 prije nove ere [6].

Slika 1: Venera iz Dolni Vestonice

Izvor: https://kristinike.wordpress.com/2015/01/30/too-fat-to-be-beautiful/venus-of-dolni-vestonice/ 28.03.2021

Korištenje keramike dramatično se povećalo tijekom neolitika, uspostavljanjem naseljenih zajednica koje su bile posvećene poljoprivredi i poljodjelstvu. Počevši otprilike 9.000 godina prije Krista, keramika na bazi gline postala je jako popularna u smislu korištenja kao spremnici za vodu i hranu, umjetnički predmeti, opeke i pločice. Rani proizvodi su samo sušeni na suncu ili su pečeni na niskim temperaturama. Početkom brončanog doba u Mezopotamiji se proizvodila glazirana keramika. Jedno od prvih dostignuća u proizvodnji keramike bio je izum kotača, 3.500 godina prije nove ere, a uvođenje lončarskog kola je isto tako omogućilo upotrebu tehnike oblikovanja gline (Slika 2) za proizvodnju keramičkih predmeta s radijalnom simetrijom [5].

Slika 2: Oblikovanje mokre gline na lončarskom kolu

Izvor: https://usolyesib.ru/hr/internet/goncharnoe-remeslo-dlya-nachinayushchih-goncharnoe-delo-dlya/, 30.04.2021.

U međuvremenu je keramika uznapredovala u proizvodnji umjetničkih djela. Lonac Bronocice (Slika 3) koji je otkriven u blizini rijeke Nide u Poljskoj, je u principu

keramička vaza na kojoj je urezan jedan od najranijih poznatih prikaza vozila na kotačima.

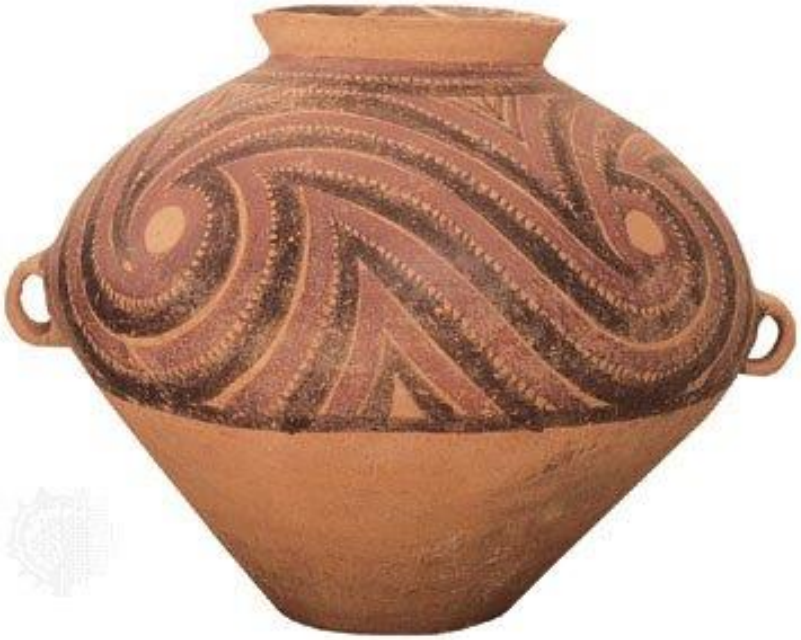
Slika 3: Lonac Bronocice

Izvor: https://lamus-dworski.tumblr.com/post/91266207539/waza-z-bronocic-the-so-called-bronocice-pot-is 10.04.2021.

Keramika je bila jednobojna ili ukrašena slikanjem jednostavnih linearnih ili geometrijskih motiva (Slika 4). Dekoracije su također uključivale upotrebu oksidirajuće i reducirajuće atmosfere tijekom pečenja kako bi se postigli posebni efekti. Tijekom šesnaestog stoljeća pne. zemljani je pribor ostao glavna klasa keramičkih proizvoda proizvedenih u Europi i na Bliskom Istoku. U Kini su nastale prve peći koje dostižu temperaturu i do 1350 °C, a oko 600. godine su razvili porculan (materijal s manje od 1% poroznosti) od kaolinske gline[1] [6].

[1] Kaolinska glina: vrsta gline, bjelkasta zemljana masa, mješavina minerala kaolinita s nešto kremena, lagane sljude i ostataka neotrcanih glina. Sastavni je dio većine tla, a nastaje trošenjem glina pod utjecajem termalnih voda i oborina. [14]

Slika 4: Ukrašena urna od keramike



Izvor: https://www.britannica.com/art/Chinese-pottery 28.03.2021

Do petnaestog stoljeća su najranije visoke peći razvijene u Europi, sposobne za postizanje do 1500 °C. U početku su izrađivane od prirodnih materijala i korištene za taljenje željeza. Razvojem sintetičkih materijala tzv. vatrostalnih materijala s boljom otpornošću na visoke temperature, rođena je industrijska revolucija. Vatrostalni materijali su stvorili potrebne uvjete za taljenje metala i stakla, kao i proizvodnja koksa, cementa, kemikalija i keramike.

Od tada je keramička industrija prošla kroz veliku transformaciju. Tradicionalna keramika i staklo su sveprisutni, a tijekom godina su razvijeni i novi proizvodi koji iskorištavaju jedinstvena svojstva ovih materijala. Oko 1850. godine predstavljeni su prvi porculanski električni izolatori, započevši eru tehničke keramike.

Nakon Drugog svjetskog rata, keramika i staklo su pridonijeli rastu mnogih tehnološki naprednih područja, uključujući elektroniku, medicinu, energetiku, automobilsku industriju, zrakoplovstvo i istraživanje svemira. Posljednjih godina obrada keramike dobila je novu snagu nanotehnologijom, što proizvođačima omogućuje uvođenje materijala i proizvoda poput prozirne keramike, nodularne keramike, hiperelastičnih kostiju i mikroskopskih kondenzatora. Tim istraživača s Northwestern Universityja koristio je tip bioaktivne keramike nazvan hidroksiapatit, odnosno materijal koji se obično koristi u pokušajima regeneracije kostiju, uz

dodatak polimera pod nazivom polikaprolakton. Zatim je koristio tehniku 3D ispisa pri sobnoj temperaturi koja se oslanja na jedinstvenu kombinaciju tri otapala [6,22]. Sažetak najvažnijih prekretnica u povijesti keramike nalazi se u tablici 1.

Tablica 1: Najvažnije prekretnice u povijesti keramike

Godine	Razvoj
28.000 pr.Kr.	Keramičke figurice se koriste u svečane svrhe
18.000 pr.Kr.	Pojavljuje se kineska keramika.
18.000-14.000 pr.Kr.	Keramičko posuđe se širi u istočnoj Aziji.
9.000 pr.Kr.	Keramički proizvodi poput vaza, cigle i pločica postaju popularni na Bliskom Istoku i u Europi.
3500 pr.Kr.	Izumljen je kotač koji će se kasnije primijeniti u oblikovanju keramike.
3000 pr.Kr	Glazirana keramika se proizvodi u Mezopotamiji.
700 pr.Kr	Keramičko posuđe postaje umjetničko djelo u Grčkoj.
620. godine	Kinezi predstavljaju porculan.
1800. godine	Izumljeni su porculanski električni izolatori.
1950. godine	Razvijeni su keramički kondenzatori na bazi barijevog titanata
1960. godine	Izumljena prva prozirna keramika na bazi itria.
1970. godine	Komercijalizirane su statične keramičke podloge visokih performansi za katalitički pretvarač i filtri za čestice za dizel motore.
1980. godine	Razvijeni su keramički visokotemperaturni supravodiči.
1990. godine	Višeslojni keramički krugovi su komercijalizirani. Za zubne proteze se uvodi keramika koja se slabo stapa.
Krajem 1990. godine	Razvijen je postupak robotiziranja za 3D ispis keramike.
2000. godine	Stvarajući kompozite na bazi ZrB_2/HfB_2 koji su otporni na temperature do 2.200 °C, NASA pokazuje interes za razvoj keramike ultra za visoke temperature za proizvodnju hipersoničnih zrakoplova i svemirskih vozila za višekratnu uporabu.

2010. godine	Različiti postupci se razvijaju za 3D ispis tehničke keramike. 2017. godine prva hiperelastična kost 3D ispisom.

Izvor: https://ceramics.org/about/what-are-engineered-ceramics-and-glass/brief-history-of-ceramics-and-glass 11.03.2021

Keramika se koristi i u svakodnevnom životu za zidne i podne pločice te, kuhinjske ploče. Služi kao kuhinjsko posuđe za kuhanje (Slika 5), spremanje ili posluživanje hrane, za šalice itd. Keramika visokih performansi i kompozitni materijali na bazi keramike se koriste za dijelove sportskih rekvizita za izradu laganih i izdržljivih konstrukcija.

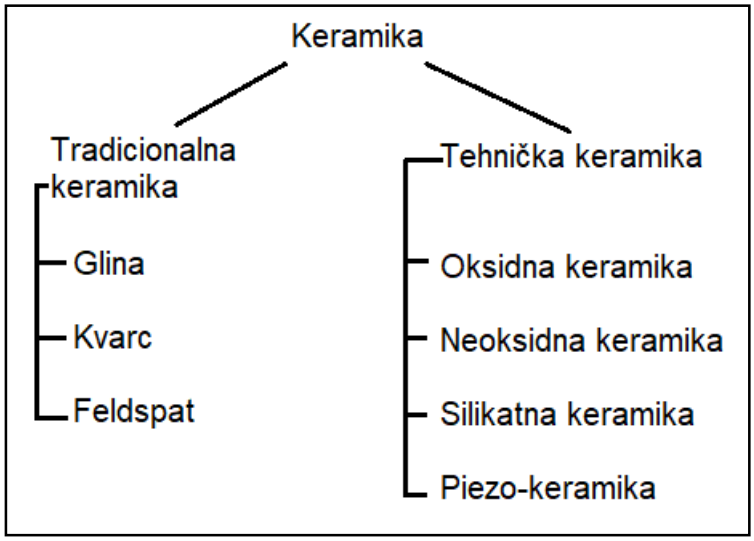
Slika 5: Keramičko posuđe

Izvor: https://ceramics.org/about/what-are-engineered-ceramics-and-glass/ceramics-and-glass-in-everyday-life (20.5.2021.)

3. Podjela keramike

Riječ keramika dolazi od grčke riječi: keramikos što znači pečeni proizvod od gline. Keramika prema definiciji uključuje koncepte koji su se razvijali tijekom povijesti zbog raznolikosti primjena i korištenih sirovina. Keramika se može podijeliti u dvije skupine: tradicionalna keramika i tehnička (napredna) keramika (Slika 6). Početni materijali za proizvodnju keramike su prašci. Oni se dovode u oblik, a komponente se sinteriraju, što je temperaturni postupak ispod točke taljenja. Ova tehnika se primjenjuje zbog visokih točaka taljenja keramičkih materijala koji čine lijevanje nemogućim ili neekonomičnim. Materijali se dijele na dvije najvažnije skupine, a to su prirodni i sintetički materijali. Prirodne se sirovine vade iz zemlje te se moraju dalje obrađivati, odnosno eksploatiraju se komadi stijene i obrađuju se u prah. Od tih se materijala proizvode predproizvodi oblikovanjem ili prešanjem.

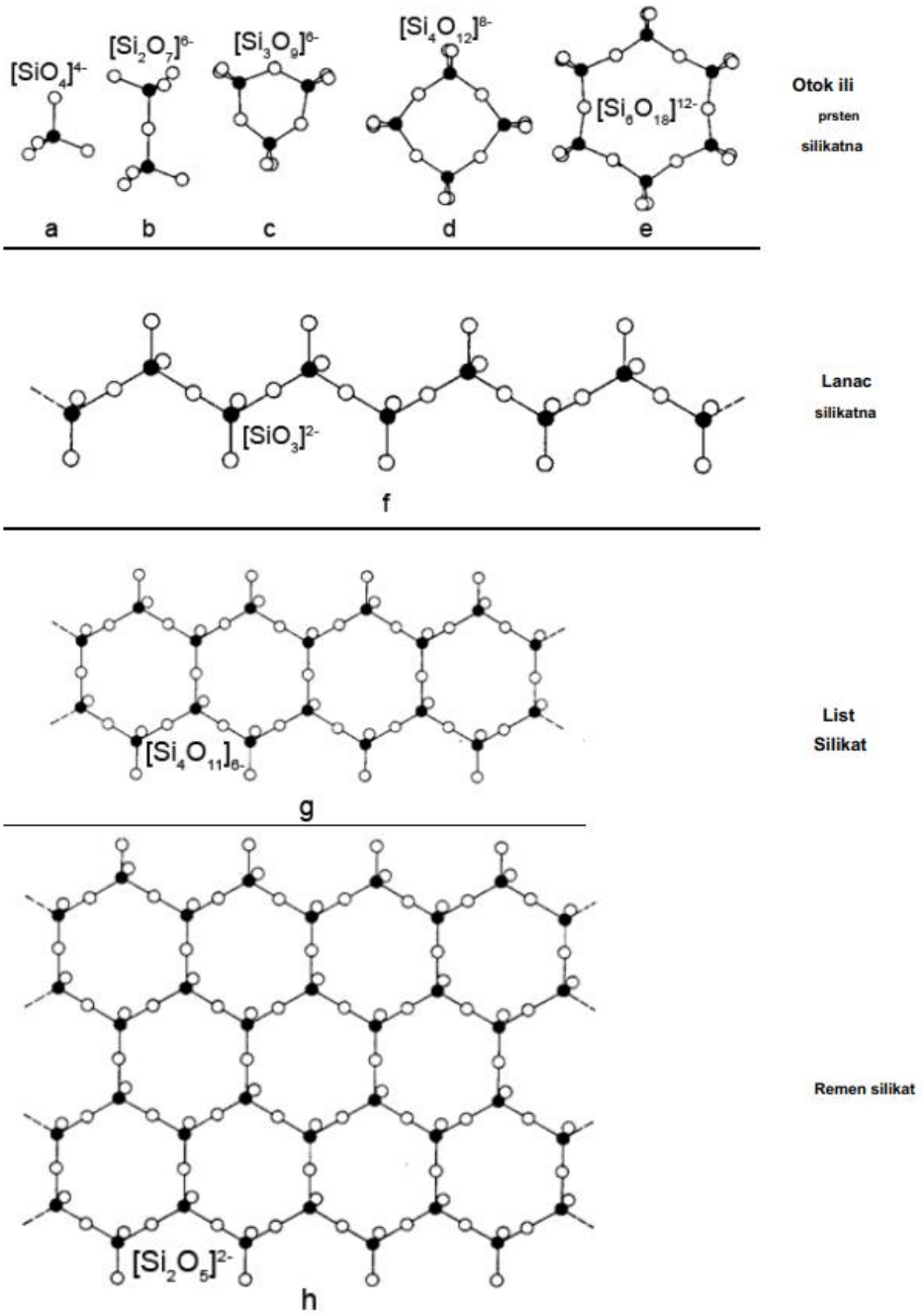
Slika 6: Osnovna podjela keramike



Tradicionalna keramika se sastoji od tri osnovne komponente: gline, silicijevog dioksida (kvarc) i feldspata. Najvažnija sirovina za tradicionalnu keramiku je glina, iz koje se proizvode opeke, pločice, sanitarna keramika i posuđe. Glina je prirodni proizvod čiji sastav varira. Kaolin i glina se sastoje od SiO_4 tetraedara. Silicij koji je slobodno četverovalentan u $[SiO_4]^{4-}$ tetraedru je okružen sa četiri iona kisika (Slika 7). Osam negativnih naboja pokazuje četiri kisikova iona, što znači da $[SiO_4]^{4-}$ tetraedar ima u svemu četiri valencije koje su negativno nabijene. Za neutralizaciju naboja mora se povezati s drugim tetraedrom ili zaštititi te naboje kationima [1]. Na

slici 7 je prikazano kako se $[SiO_4]^{4-}$ tetraedri mogu međusobno povezati i na taj način stvoriti otočne, prstenaste ili lančane silikate. Ako su dva $[SiO_4]^{4-}$ tetraedra kombinirani pod kutom, to znači da s kisikovim ionom ova struktura sadrži dva silicijeva iona i sedam iona kisika [1].

Slika 7: Povezanost SiO_4 tetraedara

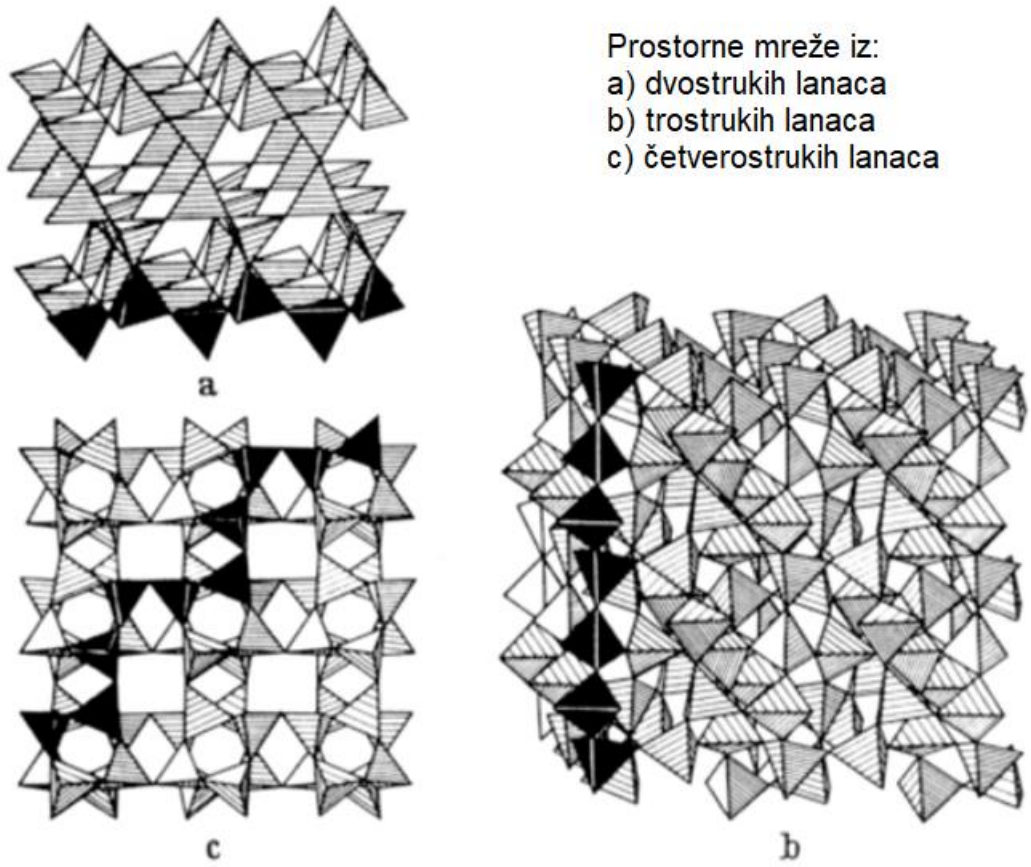


Izvor: J.G. Heinrich i C.M. Gomes, *Introduction to Ceramics Processing,* 2014, Germany

Stoga ovaj tetraedar bez dvije valencije ima naboj 6-. kad se stvori prsten, nastaje kemijska formula $[Si_3O_9]^{6-}$ sa šest negativnih naboja. Lančani silikati imaju formulu $[SiO_3]^{2-}$. Ako su negativni naboji zasićeni kationima, nastaju minerali koji se nalaze u prirodi.

U tetrasilikatima SiO_4 tetraedri su međusobno povezani na trodimenzionalni način (Slika 8). Kada su dvovalentni, trovalentni ili četverovalentni lanci povezani s uglovima tetraedra, tada se javljaju odgovarajuće mreže. Ako se u SiO_4 silicijevi ioni tetraedra zamjenjuju s ionima aluminija, električna neutralnost se ponovo uspostavlja ugrađivanjem alkalijskih ili zemnoalkalijskih iona na međuprostorne slojeve što je rezultat feldspata [1].

Slika 8: Prikaz SiO_4 tetraedarskih vrsta



Izvor: J.G. Heinrich i C.M. Gomes, *Introduction to Ceramics Processing,* 2014, Germany

4.Tehnička keramika

Tehnička keramika poznata kao visokokvalitetna ili inženjerska keramika, anorganski je keramički materijal čija je kombinacija fizikalnih i toplinskih svojstava čini pravim izborom za primjenu u kojima drugi materijali ne uspiju (Slika 9). Jedna je od glavnih vrsta materijala, zajedno s metalima, polimerima i kompozitima. Keramika također uključuje staklo, caklinu, staklokeramiku i anorganske cemetne materijale, odnosno cement, gips i vapno.

Slika 9: Tehnička keramika

Izvor: https://images.app.goo.gl/sAWKCd5rvXnrVrk17 28.03.2021

Postoji nekoliko različitih vrsta keramike, no tehnička keramika također poznata kao inženjerska keramika ili napredna keramika spada u skupinu s najboljim mehaničkim, električnim i toplinskim svojstvima s najboljim učinkom. Napredna keramika bitna je u tehnologiji, jer omogućuje mnoge primjene u zrakoplovnoj, obrambenoj, energetskoj i industrijskoj proizvodnji. Gledajući s kemijskog stajališta, tehnička keramika se može podijeliti na:

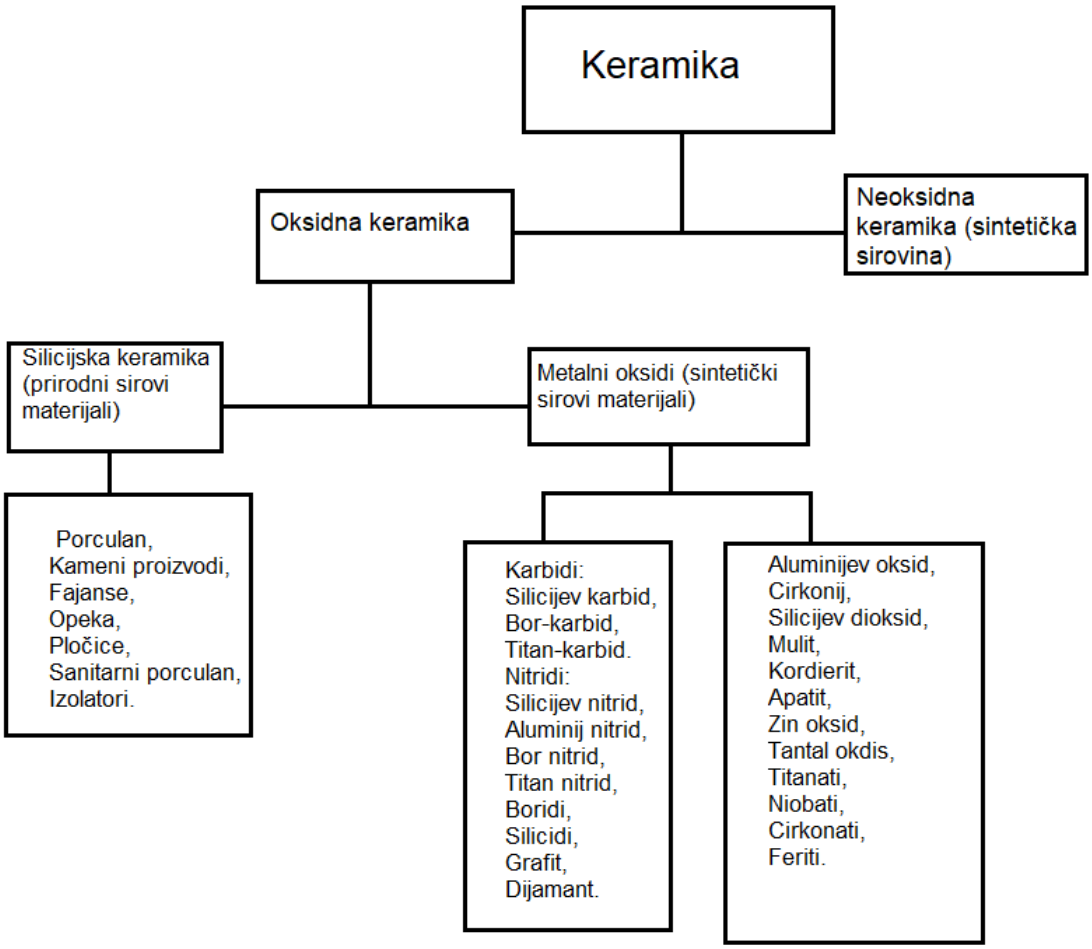
a) oksidne keramike,
b) neoksidne keramike,
c) silikatne keramike,
d) Piezo-keramika.

Oksidna keramika može biti izrađena od prirodnih i sintetičkih sirovina (Slika 10), sadrži materijale koji se uglavnom sastoje od metalnih oksida poput aluminijevog

oksida ili cirkonijevog oksida. Ovi materijali imaju malo ili nimalo staklene faze. Silicij, fosfor i bor obično su potrebni u velikim količinama, jer su oksidi koji tvore staklo. Uvođenje oksidnih vlakana u keramičku smjesu može pomoći da konačna komponenta izdrži oksidaciju, što može pružiti dodatnu čvrstoću i ojačanje. Mogu se i oblikovati različitim postupcima, sva oksidna vlakna se prvo formiraju, obično kemijskim postupkom, a zatim zagriju kako bi se keramika dovršila.

Neoksidna keramika također može biti izrađena od sintetičkih sirovina (Slika 10) koje se razvrstavaju u karbide, nitride, boride i silicide. Silicijev nitrid i silicijev karbid, dva su često korištena keramička neoksidna vlakna koja pružaju visoku otpornost na toplinu. Ne razgrađuju se sve dok temperature ne prelaze 2400 °C [1].

Slika 10: Podjela oksidne i neoksidne keramike



Izvor: J.G. Heinrich i C.M. Gomes, *Introduction to Ceramics Processing,* 2014, Germany

Silikatna keramika najstarija je vrsta keramičkih materijala za tehničku primjenu, te predstavlja najveći udio fine keramike. Glavne komponente ovih materijala su glina i kaolin, feldspat i talk kao izvori silikata. Uz to se takve komponente kao glinica i cirkon koriste za postizanje posebnih svojstava kao što je veća čvrstoća. Tijekom sinteriranja veliki udio >20% staklene faze uz kristalnu tvori se materijal s silicijevim dioksidom kao glavnom komponentom faze. Silikati se često dijele na keramiku od gline i finu keramiku, također se razlikuju porozni i gusti materijali (Slika 11). Pod silikatnu keramiku spadaju porculan, steatit, kordierit i mulit.

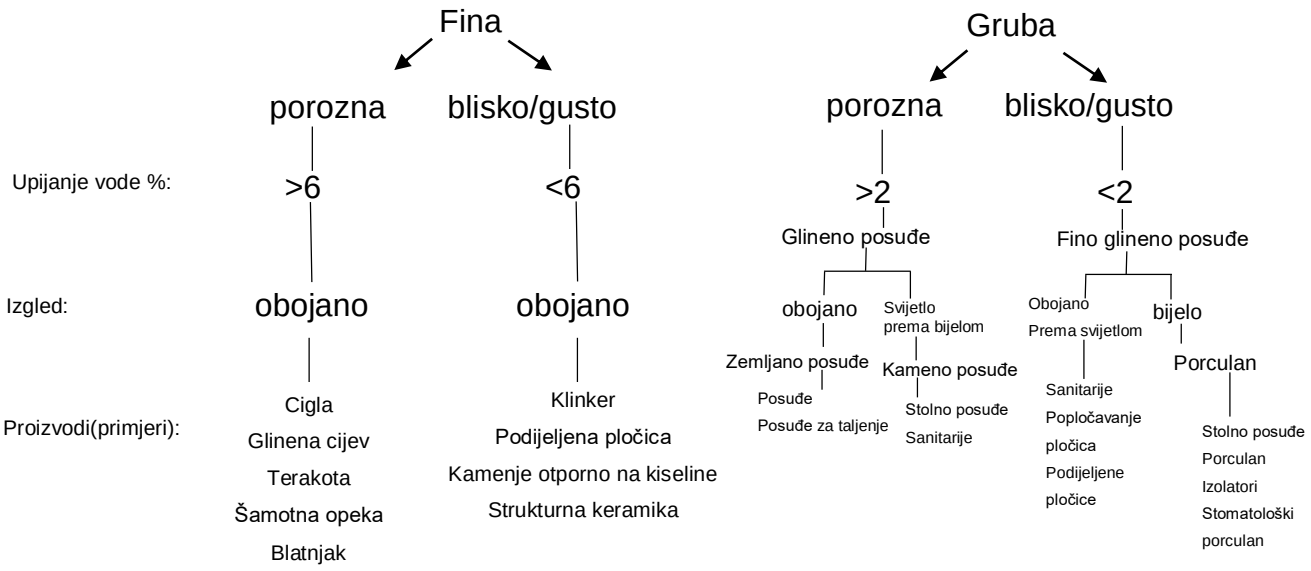
Kako se potrošnja energije povećala, tako su rasle i potrebe elektronske tehnologije, te su se svojstva porculana kontinuirano razvijala i usavršavala. Tako je došlo do porculanskog aluminijevog oksida. Razlika između kvarcnog porculana i porculanskog aluminijevog oksida je u zamjenjivoj sirovini, odnosno ekonomičnijem kvarcu s relativno skupim aluminijevim oksidom. Zbog tog razloga kao i zbog nižih proizvodnih troškova, tradicionalni kvarcni porculan predstavlja ekonomsku alternativu za primjenu umjerenog opterećenja. Steatit je keramički materijal koji se temelji na prirodnim sirovinama i sastoji se uglavnom od prirodnog magnezijevog silikata uz dodatak gline feldspat ili barijev karbonat. Steatit se obično sinterira do velike gustoće [1].

Kordijeritni materijali i drugi na temelju njega su magnezijevi alumosilikati, proizvedeni sinteriranjem steatita ili talka s dodatkom gline, kaolina, šamota, korunda i mulita.

Mulitna keramika ima mikrostrukturu čije se mineralne faze sastoje od mulita, korunda i stakla.

Piezo-keramika također poznata kao i funkcionalna keramika, predstavlja skupinu materijala koji se koriste za pretvaranja mehaničkih parametara u električne parametre ili obrnuto, za pretvaranja električnih signala u mehaničko kretanje ili vibracije. U senzorima omogućuju pretvaranje sila, tlakova i ubrzanja u električne signale, a u zvučnim i ultrazvučnim pretvaračima i aktuatorima pretvaraju električne napone u vibracije ili deformacije [1,2].

Slika 11: Podjela keramičkih materijala

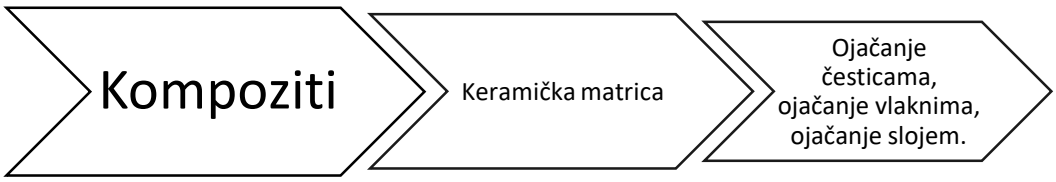


Izvor: J.G. Heinrich i C.M. Gomes, *Introduction to Ceramics Processing,* 2014, Germany

Porculan je izrađen od prirodnih sirovina kaolina, feldspata i kvarca u omjeru 50:25:25. Obično se sintetira na temperaturi od 900°C do 1400 °C u pećima grijanim na plin.

Kompozitni materijali s različitim matricama i komponentama za ojačanje razvijeni su kako bi se kombinirale neke određene prednosti (Slika 12).

Slika 12: Kompozitni materijali s keramičkom matricom



Izvor: J.G. Heinrich i C.M. Gomes, *Introduction to Ceramics Processing,* 2014, Germany

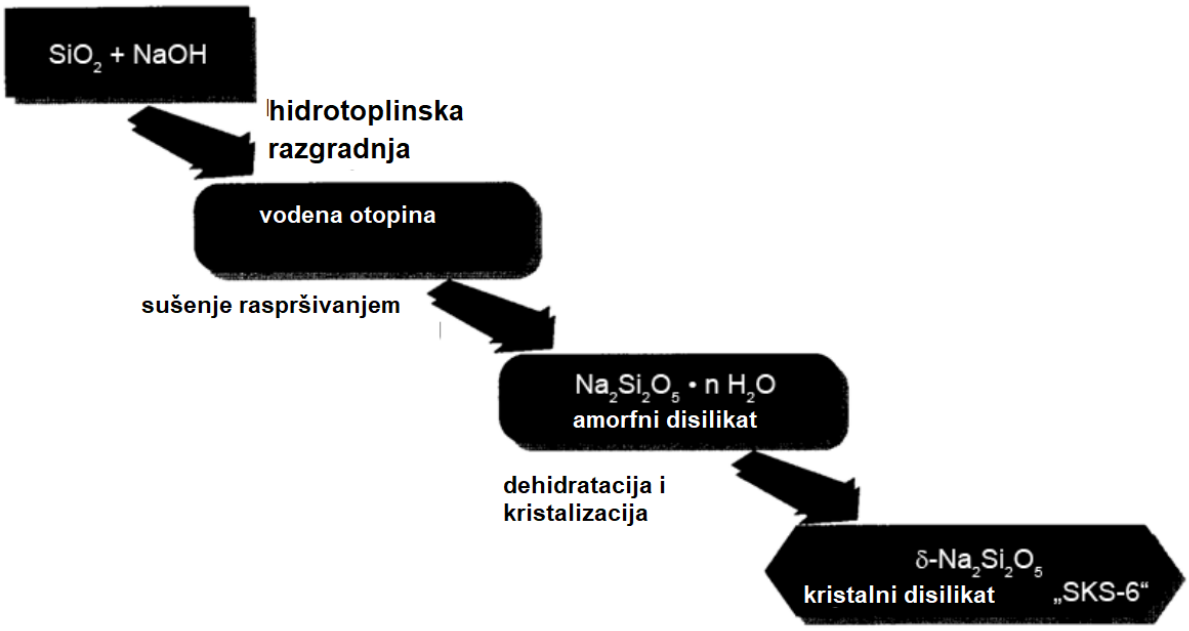
Kompozitni vlakno- keramički materijali odlikuju se kvazi-duktilnim svojstvima. Zbog visokih proizvodnih troškova kompozitno vlakno-keramički materijali su pronašli primjenu samo u posebnim slučajevima poput kočionih diskova visokih performansi za motore motorkotača koji su namijenjeni moto utrkama.

4.1. Građa tehničke keramike

4.1.1. Silikati

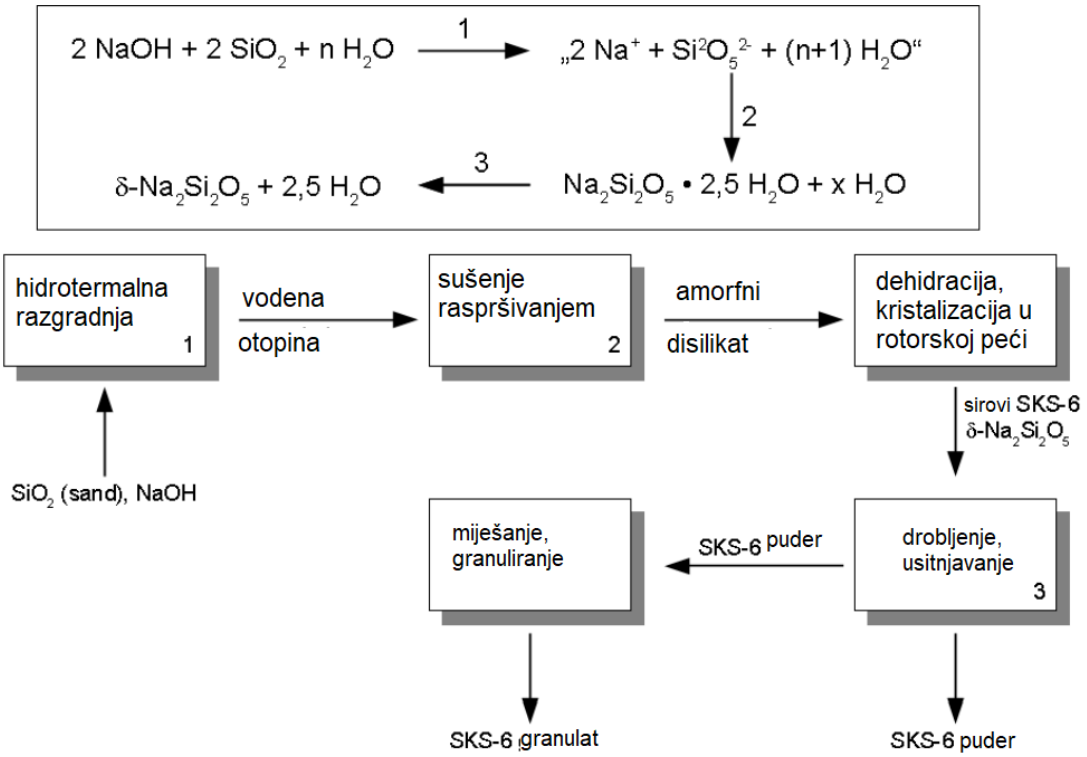
Za proizvodnju sintetičkih silikata SiO_2 hidrotoplinski je otopljen kaustičnom sodom, odnosno natrijevim hidroksidom (Slika 13 i Slika 14).

Slika 13: Proizvodnja sintetičkih, amorfnih i kristalnih natrijevih disilikata



Izvor: J.G. Heinrich i C.M. Gomes, *Introduction to Ceramics Processing,* 2014, Germany

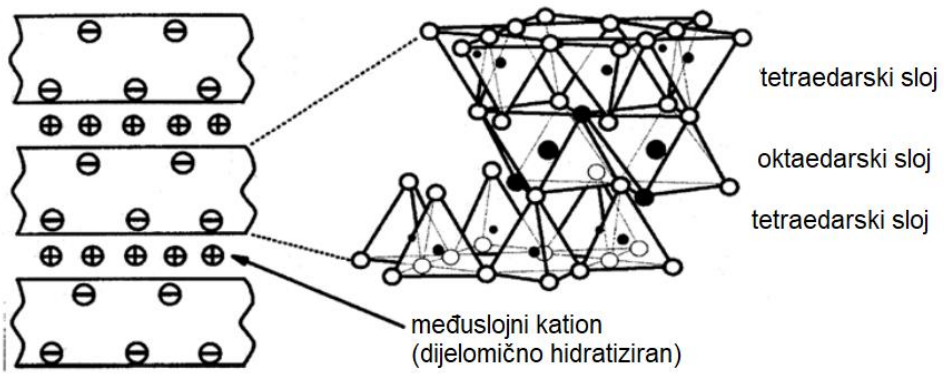
Slika 14: Proizvodnja SKS-6 i SKS-6-Co granulata



Izvor: J.G. Heinrich i C.M. Gomes, *Introduction to Ceramics Processing,* 2014, Germany

To dovodi do vodene otopine vodenog stakla koja se osuši raspršivanjem. Rezultat je amorfni disilikat koji se nakon daljnjeg odvodnjavanja transformira u kristalni disilikat. Kristalne strukture sastoje se od slojeva tetraedra i oktaedra s vodom u međuslojevima, baš kao i silikati prirodnog sloja (Slika 15).

Slika 15: Struktura amorfnog i kristalnog sintetičkog natrijevog disilikata

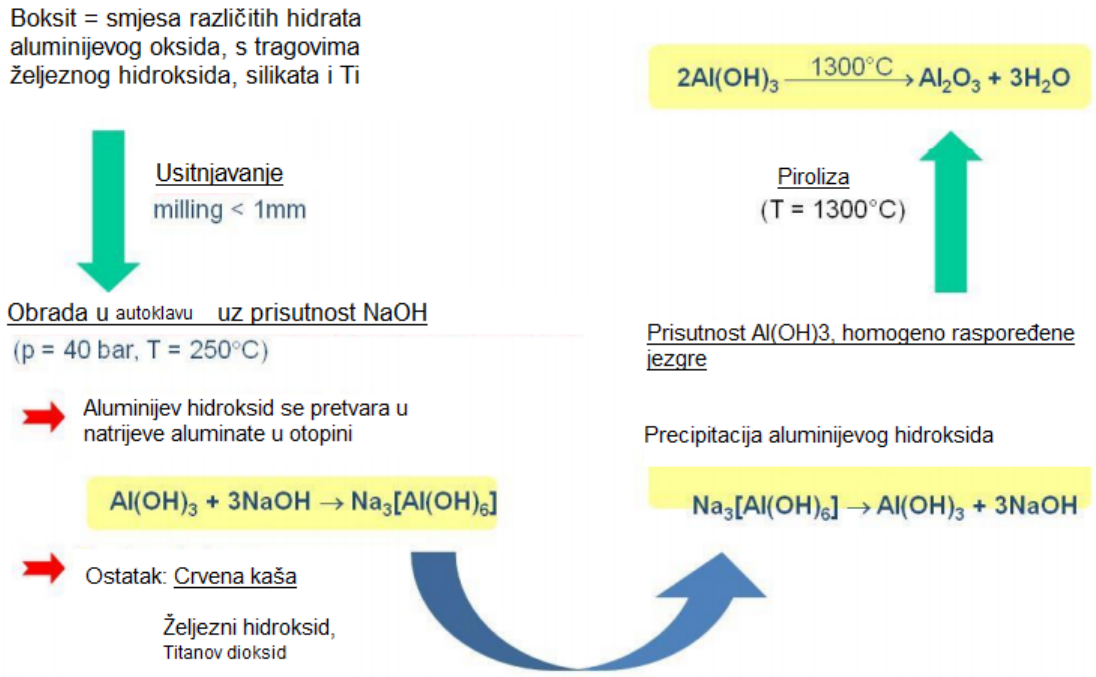


Izvor: J.G. Heinrich i C.M. Gomes, *Introduction to Ceramics Processing,* 2014, Germany

4.1.2. Oksidi

Keramički oksidni materijali odlikuju se ionskom vezom i stoga ne pokazuju električnu vodljivost. To objašnjava visoki specifični električni otpor. Slika 16 prikazuje aluminijev oksid kako nastaje iz prirodnih sirovina . Boksit kao prirodna sirovina je osnovni materijal za proizvodnju aluminijevog oksida. Boksit je smjesa različitih aluminijskih hidroksida, onečišćenih hidroksidima željeza, silikatima i titanijevim oksidima. Prvo se sirovine samelju do veličine zrna, tako da bude manje od 1 mm. Zatim se obrađuju natrijevim hidroksidom pod tlakom od 40 bara i pod temperaturom oko 250 °C, tako nastaje otopina natrijevog aluminata otapajuće hidratne glinice kao aluminat. Željezni oksid, titanijev okdis i SiO_2 ostaju nerastvoreni [1].

Slika 16: Proizvodnja Al_2O_3 prema Bayerovom postupku



Izvor: J.G. Heinrich i C.M. Gomes, *Introduction to Ceramics Processing,* 2014, Germany

4.1.3. Neoksidni materijali

Neoksidni keramički materijali sadrže siliciji, dušik, ugljik, bor i aluminij, ovi elementi su svi relativno smješteni u periodnom sustavu udesno, a to znači da je njihova elektronska ekonfiguracija u vanjskoj orbitali već relativno dovršena. Zato različiti elementi daju jedni drugima elektrone za kovalentne veze bez elektronske vodljivosti,

što je karakteristično za keramičke materijale. Dalje lijevo u periodnom sustavu mogu se naći elementi poput titanija, hafnija ili cirkonija koji tvore karbide s ugljikom ili nitride s dušikom, no zbog prisutnosti metalnih veza i njihove električne vodljivosti se ne smatraju keramikom.

Sirovine potrebne za proizvodnju tehničkih keramičkih materijala se ne nalaze u prirodi, nego se izrađuju sintetički. U tablici 2 su prikazani karbidi kao primjer za tijek sinteze. Karbidi se mogu dobiti od elemenata karbotoplinskom redukcijom ili kemijskim taloženjem. S obzirom na elemente, silicij reagira na odgovarajućim temperaturama s ugljikom i nastaje silicijev karbid (SiC). Češće nastaje SiC karbotoplinskom redukcijom u kojoj kvarcni prah (pijesak) reagira s ugljikom u SiC i CO_2. SiC se tada može proizvoditi u velikim serijama [1,[2].

Tablica 2: Proizvodnja karbida

Postupak	Reakcija
Sinteze iz komponenata: a) Taljenjem b) Sinteriranjem. Ugljičenje plinovima koji sadrže ugljik Reakcije iz plinovite faze Pretvorba u talinu metala Kemijska izolacija karbida i elektrolize rastaljenih soli polikristalnog karbida	 Me(H) + C -> MeC + (H_2) MeO + C -> MeC + (CO_2) Me + C_xH_y -> MeC + (H_2) Me + CO ->MeC + (CO_2) Me-halogenid+ C_xH_{y+} H_2 -> MeC + (vodik) +C_mH_n+ (H_2) Me- karbonil +H_2-> MeC+ (CO, CO_2, H_2, H_2O) (Fe)+Me+C -> MeC+(Fe) (Ni)+Me_1+Me_2+C->(Me_1, Me_2)C+Ni MeO + alkalikarbonat + alkalijski borat + alkali-fluorid -> MeC (smjesa Alkali-bor-flour) + (O_2)

Izvor: J.G. Heinrich i C.M. Gomes, *Introduction to Ceramics Processing,* 2014, Germany

Proizvodnja nitrida se može izvršiti na sličan način (Tablica 3), karbotoplinskom redukcijom i iz plinske faze. Elementima poput silicija koji reagira s dušikom na Si_3N_4. Karbotoplinskom redukcijom: kvarcni prah reagira s amonijakom u Si_3N_4 i H_2. Iz plinske faze: silicijev tetraklorid reagira s NH_3 u silicijev nitrid i solnu kiselinu. Isto vrijedi za boride i silicide.

Tablica 3: Proizvodnja nitrida

Postupak	Reakcija
Nitriranje metalnih oksida u prisutnosti ugljika	$MeO+N_2(NH_3)+C->MeN+(CO+H_2O+H_2)$
Nitriranje metala i hidrida	$Me+N_2(NH_3)->MeN+(H_2)$
Konverzija metalnih klorida i metalnih oksiklorida s NH_3	$MeH+N_2(NH_3)->MeN+(H_2)$ $MeCl_4+NH_3->MeN+(HCl)$
Razgradnja amonijevih spojeva	$MeOCl_3+NH_3->MeN+(HCl+H_2O+H_2)$ $NH_4MeO_3+NH_3->MeN+(H_2O+H_2)$
Pretvorba oksida s kalcijevim nitridom	$MeO+Ca_3N_2->MeN+(CaO)$
Reakcije iz plinovite faze	Me-halogenid$+N_2+H_2->MeN+(H)$

Izvor: J.G. Heinrich i C.M. Gomes, *Introduction to Ceramics Processing,* 2014, Germany

5. Svojstva tehničke keramike

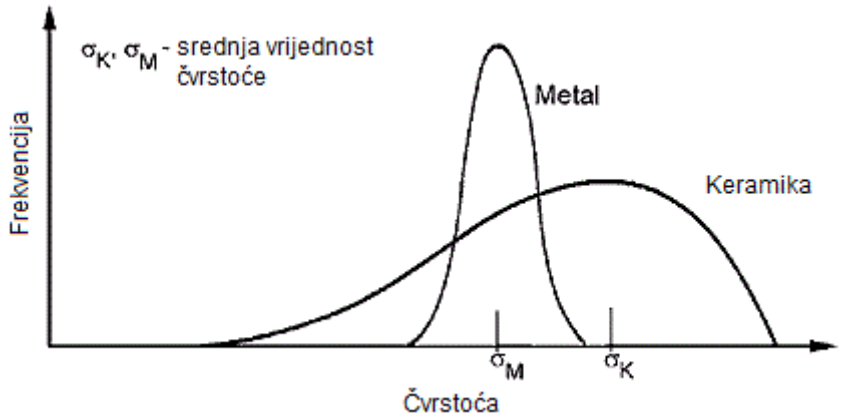
Tehnička keramika se često koristi kao zamjena za metale i polimere zbog svoje otpornosti na visoke temperature, velike tvrdoće i električna svojstva (Tablica 4) .

Gustoća tehničke keramike je između 20 i 70% gustoće čelika. Ovo predstavlja mogućnost smanjenja težine, što je prednost za pokretne dijelove u konstrukciji stroja. S druge strane, relativno male gustoće koje proizlaze iz ujednačene poroznosti mogu utjecati na sposobnost podnošenja toplinskog udara. Keramika ima sposobnost povećati životni vijek proizvoda, povećati učinkovitost, smanjiti ukupne troškove održavanja i poboljšanja performansi proizvoda. Najvažnije opće svojstvo keramike je da je vatrostalna, one su grub materijal koji će prilično dugo izdržati u najobičnijim i izvanrednim situacijama [1].

Tehnički keramički materijali u pravilu nemaju otvorenu poroznost i zbog toga za plin nisu propusni.

Čvrstoća keramičkih materijala raspoređena je ovisno o sastavu materijala, veličini zrna početnog materijala i dodacima, uvjetima proizvodnje i proizvodnom procesu. Prema modelu najslabije karike, raspodjela kvara i ono što se naziva kritičnim nedostatkom odlučuju o pouzdanosti keramičkog dijela. Iz tog razloga raspršenje rezultata između proizvodnih serija može biti veće nego unutar jedne serije (Slika 17) [2].

Slika 17: Raspodjela čvrstoće unutar serija



Izvor : Fahner, *Breviary Tehnical Ceramics*, 2004

Tablica 4 Usporedba svojstava keramike, metala i polimera

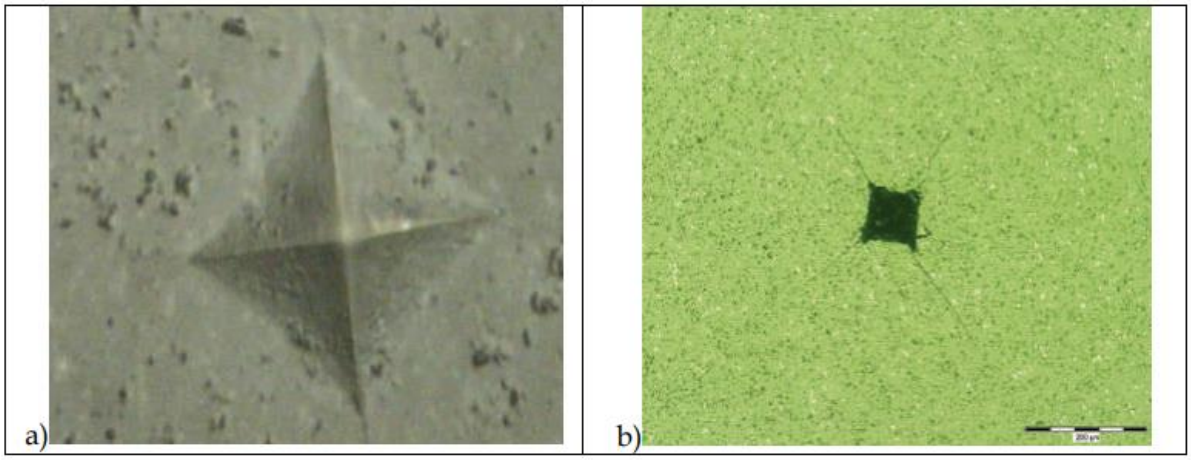
	Keramika	Metali	Polimeri	Vatrostalni
Gustoća	Niska do visoka	Niska do visoko	Niska	Niska do srednja
Tvrdoća	Visoko	Srednja	Niska	Srednja
Žilavost	Niska	Visoko	Srednji	Niska
Otpornost na trošenje	Visoko	Srednja	Niska	Srednja
Vlačna čvrstoća	Niska do srednja	Visoko	Niska	Niska
Kompresivna čvrstoća	Visoko	Srednje do visoko	Niska do srednja	Srednja
Youngov modul	Srednje do visoko	Nisko do visoko	Niska	Srednja
Dimenzijska stabilnost	Visoko	Niska do srednja	Niska	-
Toplinsko trošenje	Niska do srednja	Srednje do visoko	Visoko	Niska
Toplinska vodljivost	Srednja	Srednje do visoko	Niska	Srednja
Termalni šok	Niska	Srednje do visoko	Visoko	Niska do srednja
Električni otpor	Visoko	Niska	Visoko	-
Kemijska otpornost	Visoko	Niska do srednja	Srednja	-
Otpornost na oksidaciju	Srednje do visoko	Niska	Niska	-
Obradivost	Srednja	Niska	Srednja	-

Izvor: https://precision-ceramics.com/about-technical-ceramics/ 18.04.2021.

Osnovne karakteristike tehničke keramike su dobra tlačna čvrstoća, a lomna žilavost, vlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, podliježu parametru statističke raspodjele čvrstoće, parametrima krivulja rasta statičnog ili dinamičkog umora i elastične konstante. Ove parametre je teško procijeniti jer postoji niz empirijskih

odnosa za karakterizaciju keramičkih materijala. Uglavnom se utvrđuje lomna žilavost uporabom tehnike udubljenja, koja se koristi za mjerenje tvrdoće, ali pronalazi svoju primjenu u procjeni karakteristika keramičkih materijala. Na slici (Slika 18) je prikazano mjerenje pukotina uz pomoć ove metode, korišten je Vickersov utiskivač. Vidi se duljina pukotina započetih na uglovima otisaka udubljenja kada je premašena kritična vrijednost sile opterećenja, što uključuje pokretanje pukotina i njihov naknadni razvoj (b) [3].

Slika 18: Vickersov otisak s opterećenjem od 10 N



Izvor : Sikalidis, *Advances in Ceramics – characterization, raw materials, processing, properties, degradation and healing,* 2011, Rijeka, Hrvatska

Krhkost je glavni problem keramike pa tako i tehničke, a izražava se kao stvaranje krhkog prijeloma, statičkog umora i pogoršanja svojstava kod keramičkih materijala, jer je u njima potisnut razvoj plastične deformacije u uobičajenim uvjetima.
Uzroci krhkosti dijele se na temeljne i sekundarne. Osnovni uzroci proizlaze iz vrste međuatomske veze, ali također i od tipa kristalne rešetke. Temeljni uzroci su uzrokovani malom pokretljivošću dislokacija i lošom upravljivošću. Niska pokretljivost dislokacija povezana je s visokom razinom otpora klizanju rešetke u materijalima s ionskom i kovalentnom vezom. Loša upravljivost povezana je s neispunjavanjem zahtjeva pet neovisnih kliznih sustava u monokristalima takozvani von Misesovi kriteriji [3]. Temeljni uzroci lomljivosti keramike kao rezultat ionskih i kovalentnih veza sadrže i manje savršenu vezu rešetki duž granica zrna nego metalna veza pa se očituju manjom kohezijskom čvrstoćom na granici zrna. Temperatura prijelaza krhkosti postoji u keramičkim materijalima, dakle nisu u stanju

plastično se deformirati. Ispod ove temperature materijali trpe krhke lomove. Krhkost je uzrokovana činjenicom da se plastična zona ne stvara ispred iniciranih pukotina, a pukotina se širi cijepanjem duž granica zrna ili preko zrna. Temeljni uzroci ne dovode do apsolutnog suzbijanja makroskopske plastične deformacije ispod temperature prijelaza, npr. BeO, AIN, Al_2O_3 u polikristalnom stanju. Ove keramike su sposobne, da pri superponiranim višestrukim tlakovima čak i na sobnoj temperaturi imaju do 10% plastične deformacije. Time se postiže lakše oblikovanje keramike tijekom opterećenja velikim hidrostatičkim tlakom. Granica čvrstoće dovoljna je za kretanje dislokacija i aktiviranje dodatnih ravnina klizanja uz ostvarivanje posmičnog naprezanja [3].

Sekundarni uzroci uključuju heterogenost strukture i svojstava, značajno slabljenje granula zrna uslijed nesavršenog sinteriranja i prisutnost pora, pukotina i staklenog tijela duž granica zrna. Karakteristični nedostaci keramike uključuju pukotine i druge nedostatke nastale nepravilnim tehnološkim postupkom pri oblikovanju, sušenju ili sinteriranju. Razina međusobnog kontakta kristalnih zrna ili njihovog kontakta sa staklastim tijelom ili vezivanja faza je od velike važnosti. Pore značajno utječu na čvrstoću keramike smanjujući nosivi dio, kao i činjenica da djeluju kao koncentratori naprezanja. Sekundarni uzroci krhkosti uobičajeni su izvori zakazivanja tijekom uporabe tradicionalnih keramika već pri malim naprezanjima. Ovi sekundarni uzroci se javljaju pri visokim temperaturama, kada omekšavaju javlja se staklena faza i dolazi do laganog proklizavanja duž granica zrna, što ne može biti kompenzirano plastičnom deformacijom zrna. Dovodi do pojave pukotina i njihovog krhkog međukristalnog širenja iznad prijelazne temperature.

Ako keramika sadrži velik dio staklene faze, pukotina se uglavnom širi kroz fazu na granicama zrna [3].

5.1. Optimizacija strukture

Povećanje žilavosti se sastoji u smanjenju poroznosti, uklanjanju ili smanjivanju volumena staklaste faze na granicama zrna. To smanjivanje zahtijeva vrlo čisti početni prah i savršenstvo cjelokupne proizvodnje keramike u postupcima sinteriranja i predsinteriranja. Ukoliko keramika sadrži veliki dio staklene faze, tada se pukotina širi uglavnom kroz tu fazu, a druge faze imaju vrlo malo utjecaja na to širenje [3].

Keramika s povećanom lomnom žilavošću bi trebala sadržavati vrlo mali dio staklastog dijela. Drugi je uvjet homogeni sitnozrni materijal veličine zrna od desetine mikrometara do jedinica mikrometara. Javljaju se pore sfernog oblika koje u staklenoj fazi na primjer mogu imati čak i povoljan utjecaj, jer ometaju prednju stranu pukotine. Oblik zrna i njihov način jačanja je od velike važnosti. S iglastim zrnima ima do četiri puta veću lomnu žilavost, nego u slučaju jednoličnih jednakoosnih zrna. Oblik zrna i njihov način jačanja je od velike važnosti. Na primjer Si_3N4 s iglastim zrnima ima čak 4 puta veću lomnu žilavost nego kod jednolikih jednakoosnih zrna. Povećanje čvrstoće se može postići učinkom disperzivnih čestica. Korištenjem ovih čestica čvrsta zrna raspršene faze uzrokuju odstupanje pukotine od njezinog izravnog toka, što rezultira proširenjem područja loma. Čestice zbog preuzimanja većeg dijela tereta smanjuju naprezanje matrice, što u konačnici dovodi do smanjenja faktora naprezanja na prednjoj strani pukotine [3].

5.2. Fazna transformacija

Fazna transformacija se temelji na induciranoj faznoj transformaciji raspršenih čestica u matrici keramičkog materijala. Koristi se u mjestu ispred pukotine, gdje se provodi martenzitna faza transformacije koja doprinosi apsorpciji energije. Da bi se obavila ovakva transformacija materijal mora imati veći volumen modifikacije na niskoj temperaturi nego što ga ima u strukturi modifikacije na visokoj temperaturi. Ovaj postupak dovodi do stvaranja faze s većim volumenom, gdje bi se fazna transformacija trebala izvršiti martenzitnim mehanizmom. Proces opuštanja se odvija vrlo polako [3].

Cirkonijev dioksid ZrO_2 koji spada među najpovoljniju tehničku keramiku, kristalizira u tri modifikacije:

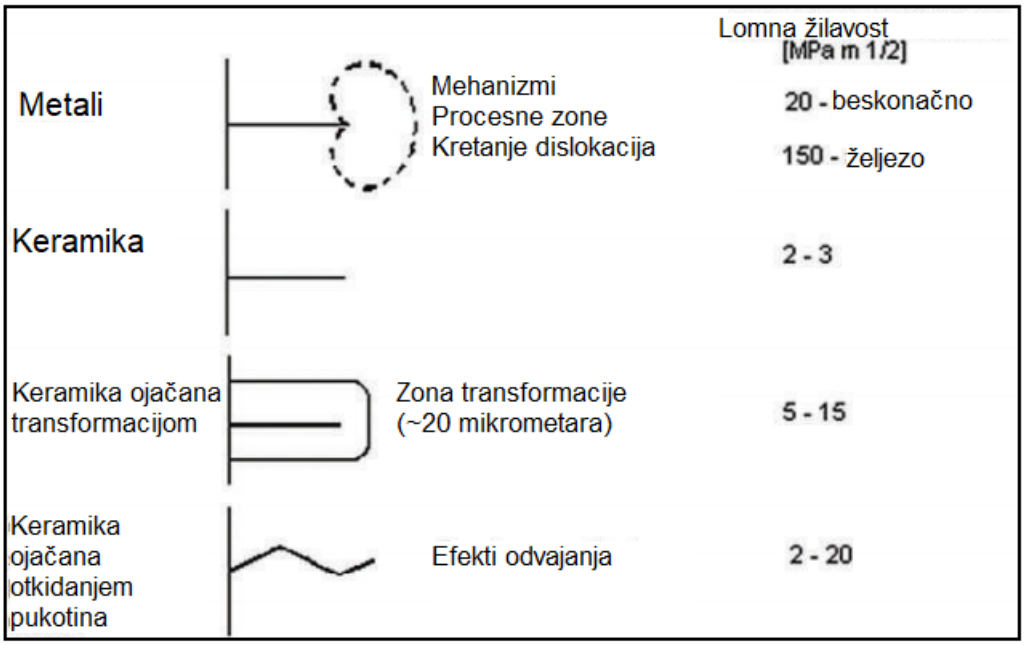
- kubična: koja je stabilna do 2680°C
- tetragonalna: koja je stabilna do 2370°C
- monoklinska: koja je stabilna do 950°C.

Dolazi do velike volumenske promjene prilikom prijelaza tetragonalne modifikacije u monoklinsku jer se čisti ZrO_2 ne može koristiti kao keramika. Transformacija tetragonalne modifikacije u monoklinsku događa se samo mjestimice gdje su visoka vlačna naprezanja, odnosno u prednjem dijelu pukotine. S obzirom da monoklinska faza ima volumen približno veći 4% od tetragonalne faze, na tim mjestima se javlja

razvoj tlačnih deformacija, koje modificiraju stanje naprezanja na pukotini i na taj način usporavaju daljnji razvoj pukotina.

Transformacija izazvana naprezanjem tijekom opterećenja, pokretanje finih pukotina i odstupanje pukotina o početnog smjera rasta su tri mehanizma koji odlučuju o rasipanju energije pri kvaru materijala (Slika 19) [3].

Slika 19: Shematski prikaz rasipanja energije u pukotini rasta metalnih i keramičkih matrica



Izvor : Sikalidis, *Advances in Ceramics – characterization, raw materials, processing, properties, degradation and healing,* 2011, Rijeka, Hrvatska

Martenzitna fazna transformacija tetragonalnog ZrO_2 u monoklinsku izazvana naprezanjem se očituje zaštitnim učinkom pukotine, popraćenom gore spomenutim promjenama volumena. Do rasipanja energije loma dolazi zbog energije koja se troši na nukleaciju fazne transformacije i energije koja se troši za stvaranje novog volumena nastalog transformacijom. Stvaranje finih mikropukotina u područjima raspršenih čestica u kojima se tetragonalna faza transforimirala u monoklinsku fazu, povoljno djeluje na povećanje lomne žilavosti [3].

5.3. Prednosti tehničke keramike

- Velika tvrdoća : jedno od najčešćih svojstava keramike je ekstremna tvrdoća. Neke keramike su i do četiri puta tvrđe od nehrđajućeg čelika. Velika tvrdoća daje odličnu otpornost na trošenje, što znači da mnoga tehnička keramika ima sposobnost zadržavanja svog preciznog završnog sloja s velikom tolerancijom mnogo dulje od drugih materijala.

- Čvrstoća: tehnička keramika ima vrlo visoku čvrstoću, no to je samo kada je komprimirana. Na primjer, veliki dio tehničke keramike može podnijeti izuzetno velika opterećenja u rasponu od 1000 do 4000 MPa. Titanij, koji se smatra vrlo jakim metalom ima samo 1000 MPa tlačne čvrstoće [8].

- Niska gustoća: tehnička keramika je niske gustoće, u rasponu od 2 do 6 g/cm^3. Što znači da je znatno lakša od nehrđajućeg čelika koji je 8 g/cm^3 i titanija koji je 4,5 g/cm^3, s tim da je puno mekši aluminij slične gustoće. Tehnička se keramika zbog svoje velike tvrdoće i male težine koristi sve više u raznim industrijama u primjenama u kojima niti jedan drugi materijal ne može odgovarati kao što keramika odgovara svojim performansama i vijekom trajanja.

- Izvrsna otpornost na trošenje: mnoge tehničke keramike mogu podnijeti nevjerojatno visoke temperature zadržavajući pri tom svoja mehanička i električna svojstva. Tamo gdje će se polimerima i metalima početi narušavati svoja svojstva, tehnička keramika će i dalje funkcionirati vrlo postojano i pouzdano. Ovo svojstvo čini keramiku prikladnom za uporabu pri vrlo visokim temperaturama poput peći, kočionih sustava, reznih alata i mlaznih motora.

- Izvrsna električna svojstva: tehnička keramika je izvrstan električni izolator. Posebno je korisna u primjenama na visokim temperaturama gdje se mehanička i toplinska svojstva kod drugih materijala pogoršavaju. Neke keramike imaju male električne gubitke i veliku dielektričnu propusnost. Uz

to je sposobnost kombiniranja izolatora sa strukturnom komponentom dovela do mnogo inovacija proizvoda.

- Sposobnost rada na ultra- visokim temperaturama: tehnička keramika može funkcionirati u situacijama kada gotovo niti jedan drugi materijal ne može zadržati svoja svojstva. Neke keramike mogu raditi na temperaturama višim od 1750 °C, što ih svrstava u vlastitu klasu kao materijale za ultra- visoke temperature. Ova keramika se pokazala neprocjenjivom u primjenama na visokim temperaturama, poput motora, turbina i ležajeva, gdje su povećali njihov životni vijek, performanse i učinkovitost.

- Toplinski vodljiva ili izolacijska: različite vrste keramičkih materijala imaju izuzetno različita toplinska svojstva. Postoje neke keramike koje su visoko toplinski vodljive i često se koriste kao hladnjaci ili izmjenjivači u mnogim električnim primjenama. Ostala keramika je puno manje toplotna, što je čini pogodnom za širok spektar primjena.

- Kemijski inertna i otporna na koroziju: tehnička keramika je vrlo kemijski stabilna i ima nisku kemijsku topljivost što je čini otpornom na koroziju. Ono što čini keramiku vrlo atraktivnom opcijom u mnogim komercijalnim i industrijskim primjenama je to što metali i polimeri ne mogu pružiti istu otpornost na koroziju, također isto tako kada je potrebna i otpornost na trošenje [8].

5.4. Nedostaci tehničke keramike

- Loša smična i vlačna čvrstoća: čvrstoća tehničke keramike kod druge vrste čvrstoće, vlačne i posmične, može biti i do 15 puta manja od čvrstoće metala.

- Visoka krhkost: tehnička keramika zbog svoje male plastičnosti može biti vrlo lomljiva. To znači da tehnička keramika ima vrlo lošu otpornost na udarce, koja je uzrokovana jedinstvenom atomskom vezom tehničke keramike. Metali imaju metalne veze koje su relativno male čvrstoće, ali imaju mogućnost vezati se za atome u bilo kojem smjeru. Ta sposobnost čini

metale žilavim, duktilnim i relativno snažnim. Keramika nema takve veze kao metali, već ima ionske i kovalentne veze, one su vrlo jake i mogu se vezati samo u određenim smjerovima. Ovakva organizirana vezna struktura znači da će se atomski slojevi teško pomaknuti, što čini keramiku nepodatnom.

- Teško za dizajn: svaka vrsta tehničke keramike ima specifična toplinska, mehanička i električna svojstva koja se mogu značajno razlikovati ovisno o radnim okolnostima i izgledu proizvoda [8].

6. Primjena tehničke keramike

Tehnička keramika se zbog svojih svojstava koristi u brojne svrhe. Koristi se u strojarstvu zbog svoje dobre čvrstoće na visokim temperaturama, niske gustoće, otpornosti na koroziju i trošenje, a specifične karakteristike pojedinih tehničkih keramika i njihova primjena prikazane su kako slijedi [4]:

Oksidna keramika

Al_2O_3 (aluminijev oksid)

- Karakteristike: - dobro vodi struju,
  - dobra lomna žilavost,
  - dobra toplinska vodljivost.
- Primjena: izolatori za svjećice, komponente električne i elektroničke industrije, abrazivni materijali, vatrostalni, ploče za zaštitu itd.

ZrO_2 (cirkonij)

- Karakteristike: - velika gustoća,
  - niska toplinska vodljivost,
  - vrlo visoka čvrstoća i tvrdoća na savijanje.
- Primjena: noževi i škare, brtve, ventili, ortopedski implantati, elektroničke i električne primjene.

Neoksidna keramika

SiC (silicijev karbid)

- Karakteristike: - vrlo velika tvrdoća,
  - velika otpornost na trošenje,
  - dobra otpornost na toplinski udar,
  - vrlo visoka toplinska vodljivost.
- Primjena: abrazivi, mlaznice plamenika, nakit.

WC (volframov karbid)

- Karakteristike: - heksagonska struktura,

- visoka topljivost.

- Primjena: alati za rezanje, sport, kućanstvo, nakit.

Si_3N_4 (silicijev nitrid)

- Karakteristike: - velika žilavost,
  - velika čvrstoća, čak i pri visokim temperaturama,
  - izvrsna otpornost na trošenje,
  - dobra otpornost na kemikalije.
- Primjena: strojne komponente s vrlo visokim dinamičkim naprezanjima i zahtjevima pouzdanosti, zrakoplovna industrija, kemijska industrija[4].

6.1. Primjena tehničke keramike u strojarstvu

Proizvodi iz tehničke keramike proizvođača Kyocera su široko zastupljeni u industrijskim strojevima, električnoj opremi i uređajima. Proizvođač Kyocera je u praksi primijenio svoju ultra preciznu tehnologiju obrade u proizvodnji dijelova opreme i optičkih korektora gdje je potrebna visoka preciznost.

Plinska turbina (Slika 20) najavljuje se kao vodeći motor 21. stoljeća. Razvoj i komercijalizacija tehničke keramike, koja može izdržati teške uvjete kao što su visoke temperature i velika opterećenja je ključ uspjeha plinskoturbinskog motora.

Slika 20: Dijelovi plinske turbine

Izvor : https://global.kyocera.com/prdct/fc/index.html (7.6.2021.)

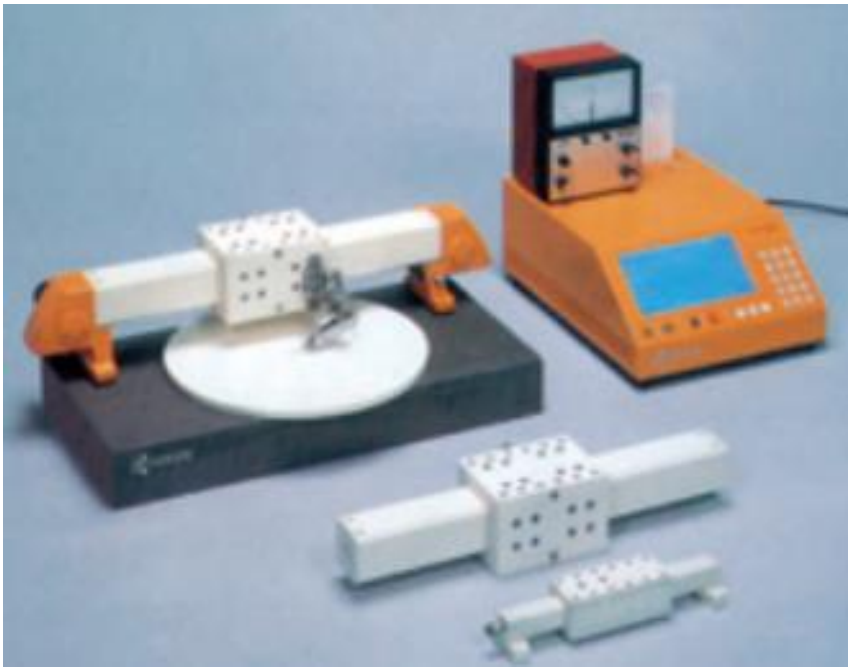
U industriji visoke tehnologije postoji potražnja za laganim zračnim vretenima (Slika 21). Kyocera keramička zračna vretena koriste se u rotacijskim stolovima, zajedno s motorom, oblikuju jedinice za okretanje. Ove primjene imaju prednost od velike tvrdoće keramike i vrhunske rotacijske preciznosti.

Slika 21: Zračno vreteno

Izvor : https://global.kyocera.com/prdct/fc/index.html (7.6.2021.)

Klizači (Slika 22), za X-Y stolove i mjerne jedinice, proizvedeni su pomoću Kyocerine napredne tehnologije obrade, stvarajući visoku preciznost i pouzdanost.

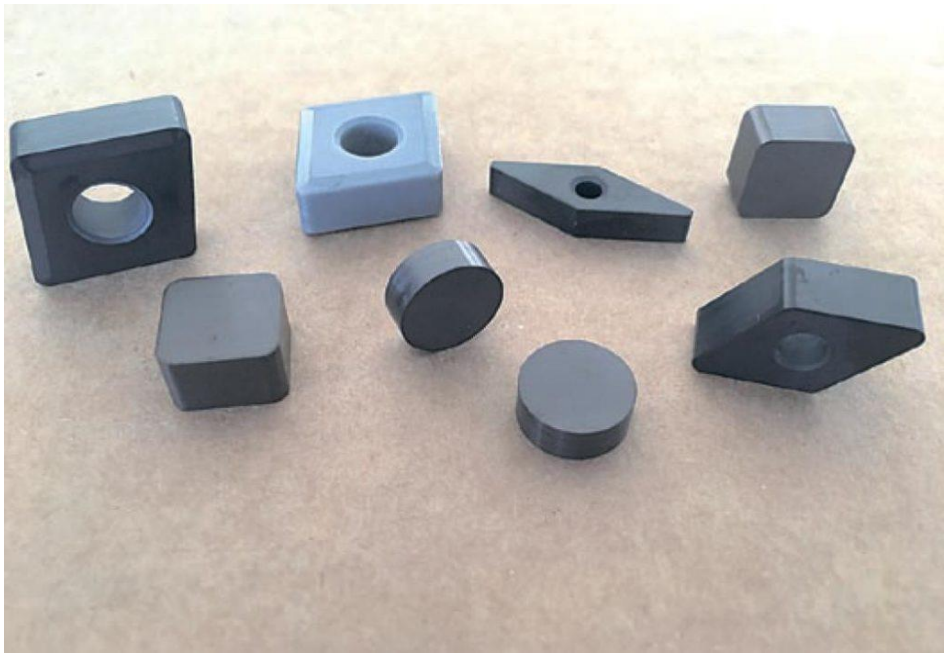
Slika 22: Zračni klizač



Izvor : https://global.kyocera.com/prdct/fc/index.html (7.6.2021.)

Keramički materijali se koriste kao alati za rezanje za obradu lijevanog željeza i legiranih materijala. Aluminijev oksid Al_2O_3 , silicijev nitrid Si_3N_4 i silicijev aluminij oksinitrid SiAlON se koriste za izradu reznih alata, poput alata za tokarenje (Slika 23), alata za glodanje itd.

Slika 23: Rezne oštrice alata za tokarenje



Izvor: https://mefexport.com/ceramic-cutting-tools/ (20.5.2021.)

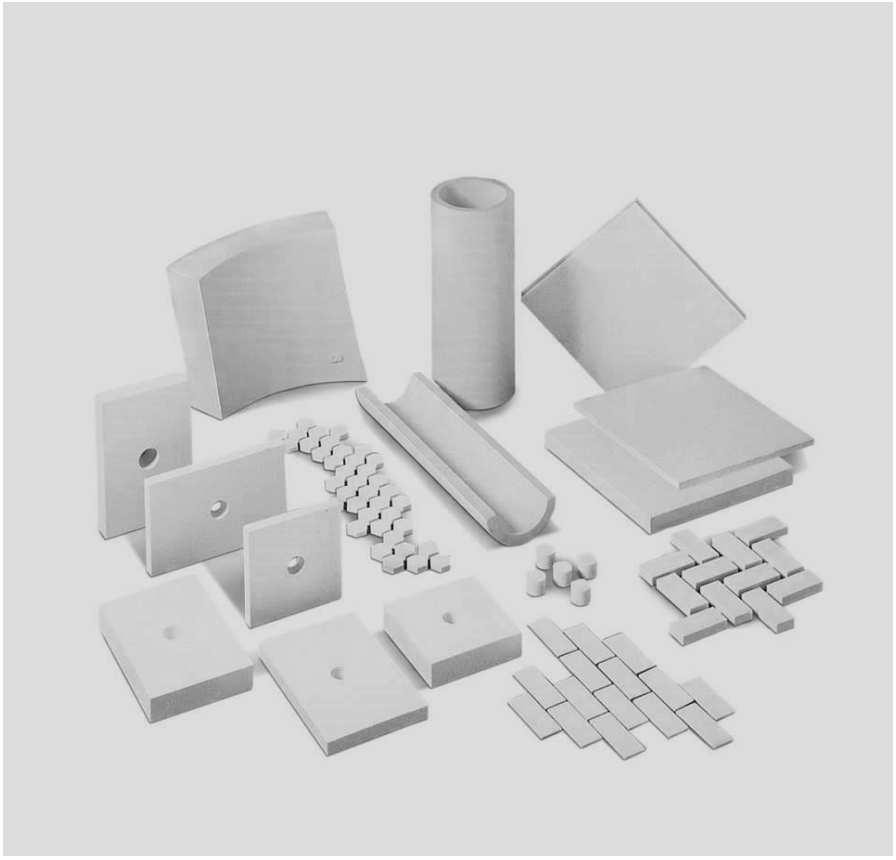
Tehnička keramika pronalazi primjenu u općoj konstrukciji strojeva u raznim dijelovima kao što su premazi, čahure, mlaznice, vodilice, cijevi za zaštitu vratila, klizni prsteni (Slika 24) i drugi. Materijali koji se koriste za navedene dijelove su aluminijski oksid, silicijev karbid, silicijev nitrid, cirkonijev oksid i kvarcni porculan.

Slika 24: Klizni i brtveni prstenovi

Izvor: http://hr.sicproduct.com/sic-products/pressureless-sintering-silicon-carbide/silicon-carbide-sealing-rings.html (16, svibanj 2021.)

Silicijev karbid se koristi u primjenama koje zahtijevaju visoku toplinsku vodljivost, postao je nezamjenjivi materijal kemijskog procesnog inženjerstva.
Aluminijev oksid se koristi u raznim tehničkim proizvodima kao što su obloge za čahure i cilindre, za proizvodnju ploča, oblikovnih dijelova i cilindara (Slika 25).

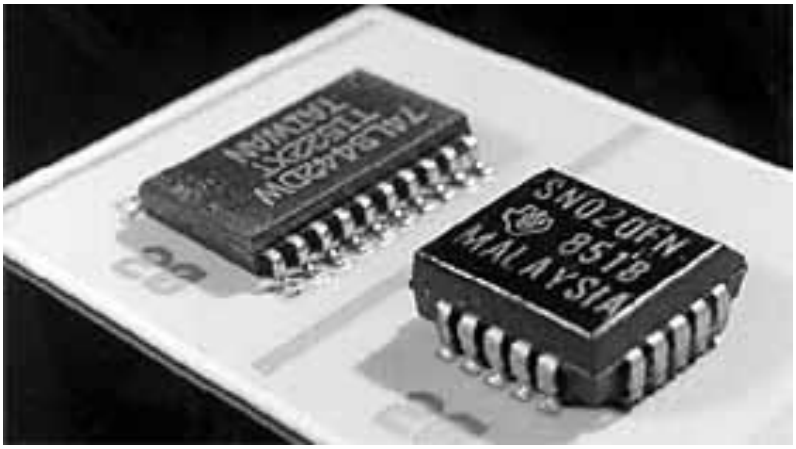
Slika 25: Oblikovni dijelovi od aluminijevog oksida



Izvor: https://www.kalenborn.com/en-us/products/wear-protection-materials/kalocer/ (16. 5.2021.)

Tehnička keramika koristi se za podloge električnih uređaja (Slika 26), rotore turbopuhala (Slika 27) i glave za zasun za upotrebu u automobilskim motorima.

Slika 26: Keramičke podloge za električne uređaje



Izvor: https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/ceramics-materials-joining-and-applications-054 (19.5.2021.)

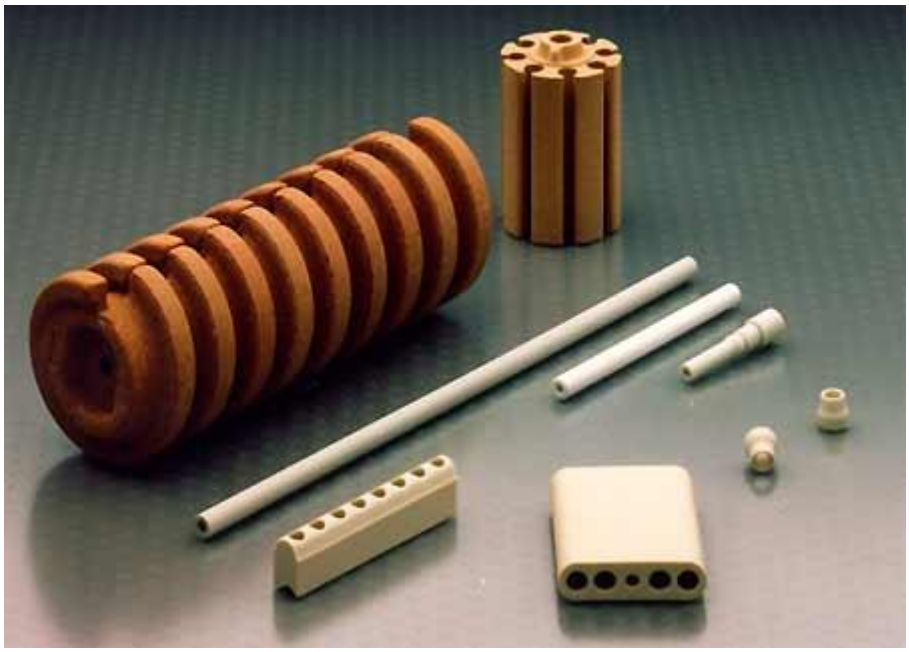
Slika 27: Keramički sklop rotora turbopuhala od silicijevog nitrida

Izvor : https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/ceramics-materials-joining-and-applications-054 (19.5.2021.)

6.2. Primjena tehničke keramike u elektrotehnici i elektronici

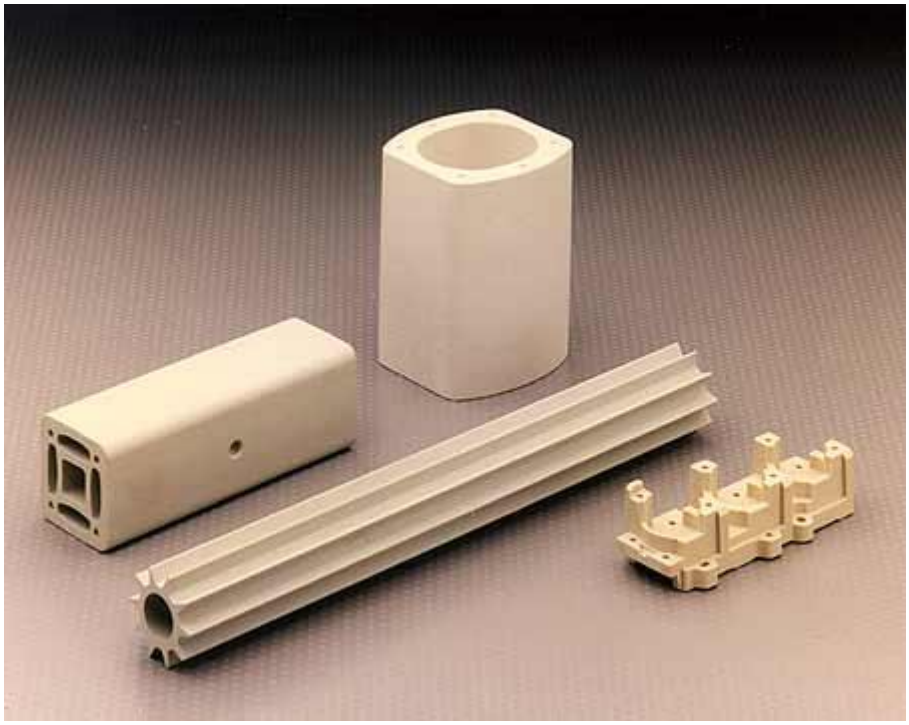
Keramički materijali u elektrotehnici također mogu biti poluvodiči, supravodljivi, feroelektrični ili izolatori (Slika 28). Koriste se kao tijela električnih osigurača (Slika 29), otpornici (Slika 30), utičnice.

Slika: 28 Izolatori izrađeni od tehničke keramike



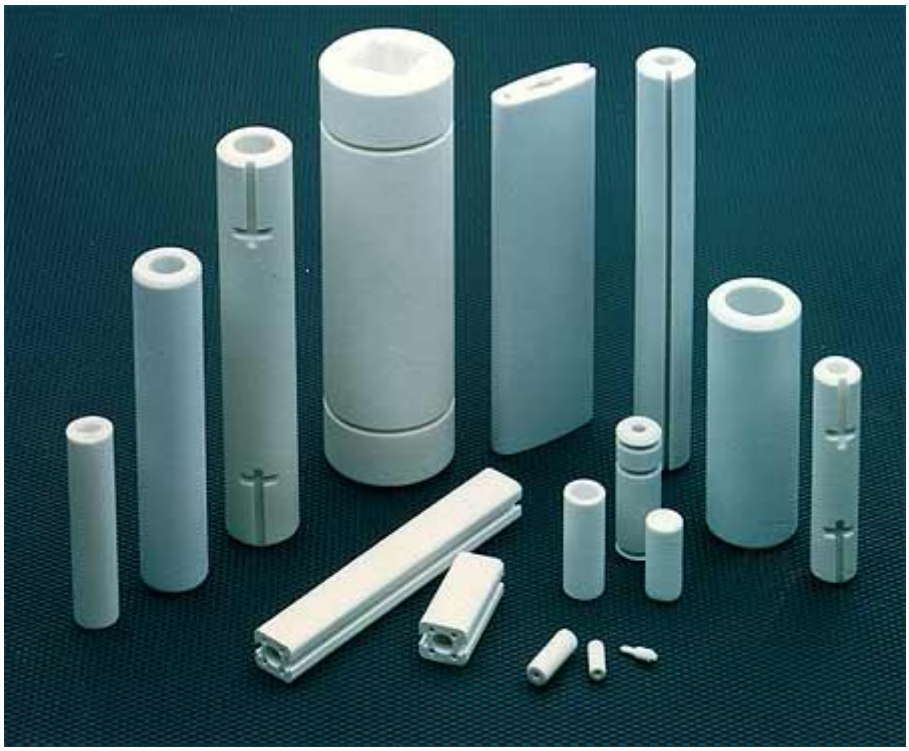
Izvor: Fahner, *Breviary Tehnical Ceramics*, 2004

Slika 29: Električni osigurači, utičnice



Izvor: Fahner, *Breviary Tehnical Ceramics*, 2004

Slika 30: Otpornici izrađeni od tehničke keramike



Izvor: Fahner, *Breviary Tehnical Ceramics*, 2004

Keramički materijali mogu biti magnetski, stoga je magnetska keramika široko korištena. Neke se vrste mogu trajno magnetizirati, a one se koriste u motorima za električne četkice i noževe, zvučnicima, motorima (Slika 31) koji napajaju dodatnu opremu u automobilu i magneti za kućanstvo. Također postoje vrste koje se mogu magnetizirati i demagnitizirati, a koriste se u televizorima, radiju, komunikacijskim sustavima i drugo.

Slika 31: Keramički magneti za motore

Izvor: http://www.permanentferritemagnet.com/sale-13235828-motorcycle-motor-arc-countersunk-ceramic-ferrite-magnets.html (20.5.2021.)

6.3. Primjena tehničke keramike u medicini

Keramika pronalazi veliku primjenu u medicini jer je netoksična, stabilna i nije kancerogena, na primjer proizvodi za implantacije poput zglobova kuka i koljena su izrađeni od monolitnih keramičkih materijala. Također i u mnogim biomedicinskim uređajima. U stomatologiji služi za izradu zubnih implantata (Slika 32) jer su otporni na abraziju te jaki, te za krunice.

Slika 32: Zubni implantati

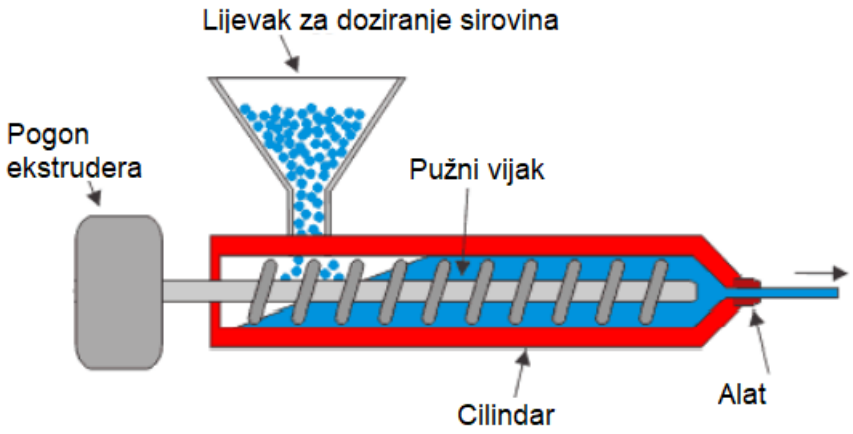
Izvor: https://www.preciseceramic.com/blog/zirconium-oxide-in-dental-field/ (25.5.2021)

7. Proizvodnja gotovih proizvoda iz tehničke keramike

Različiti su postupci oblikovanja gotovih proizvoda iz tehničke keramike. Mnogo je postupaka, a među najčešćim su ekstrudiranje i lijevanje u kalupe. Uglavnom su to poznati, postojeći strojevi, koji se koriste i za proizvodnju gotovih proizvoda iz drugih materijala, ali su prilagođeni proizvodnji keramičkih proizvoda.

Ekstrudiranje (Slika 33) je postupak oblikovanja koji se sastoji od provlačenja plastične smjese keramičkog praha kroz steznu matricu za dobivanje izduženih oblika koji imaju konstantan presjek. Mješavina praha se sastoji od finog keramičkog praha s odgovarajućim dodacima veziva i pastifikatorima tako da daju željena svojstva [3].

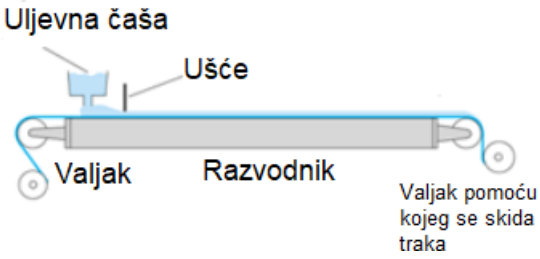
Slika 33: Postupak oblikovanja ekstrudiranjem



Izvor: M. Gorski, J. A. Rodea, Advanced Ceramic in Structural Engineering

Lijevanje trakom (Slika 34) je postupak korištenja kaše koja se sastoji od keramičkog praha s odgovarajućim dodacima otapala pastifikatora i veziva, te lijevanja kaše na pokretnu površinu nosača. Kaša prolazi ispod ruba noža dok se nosač pomiče duž podupirućeg stola. Otapala isparavaju te ostavljaju gustu fleksibilnu traku koja se može čuvati na valjcima ili skidati s nosača [4].

Slika 34: Lijevanje trakom



Izvor: M. Gorski, J. A. Rodea, Advanced Ceramic in Structural Engineering

8. Zaključak

Tehnička keramika nudi inovativnim inženjerima nove brojne mogućnosti za daljnji razvoj strojeva i sustava u svrhu produljenja njihovog vijeka trajanja i pouzdanosti. Materijali se kontinuirano razvijaju i poboljšavaju, a najzanimljivija evolucija od svih materijala je evolucija tehničkih keramika koje se koriste u inženjerstvu. Zbog širokog raspona upotrebe u industriji i razvoja materijala, tehnička keramika sve više postaje zanimljiva programerima, dizajnerima i kupcima. Tehnička keramika ima nevjerojatan raspon svojstava i namjene, te prema svojstvima i raznim primjenama nadmašuje ostale materijale poput metala i legura. U industriji željeza i čelika, keramički vatrostalni materijali se koriste kao obloge za peći, cijevi koje odvode vruće plinove i slično.

Keramika osim što je jedno od najstarijih otkrivenih materijala može se pronaći u velikim količinama u svakodnevnoj primjeni. Raznolikost primjene tehničke keramike čini ju najsvestranijim materijalom koji danas postoji i omogućuje upotrebu na prilično neobične i neočekivane načine.

Literatura

Knjige:

[1] J.G. Heinrich i C.M. Gomes, *Introduction to Ceramics Processing,* 2014, Germany

[2] Fahner, *Breviary Tehnical Ceramics*, 2004

[3] C.Sikalidis, *Advances in Ceramics – characterization, raw materials, processing, properties, degradation and healing,* 2011, Rijeka, Hrvatska

[4] M. Gorski, J. A. Rodea, Advanced Ceramic in Structural Engineering

Internetske stranice:

[5] Gabrić i S. Šitić, Materijali I, Split, rujan 2012. dostupno na: https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI_1_skripta_listopad_2013.pdf (pristupljeno 9.ožujak 2021)

[6] The American Ceramic Society, ,,Brief History of Ceramics and Glass“ https://ceramics.org/about/what-are-engineered-ceramics-and-glass/brief-history-of-ceramics-and-glass (pristupljeno 11.ožujak 2021.)

[7] Bronocice pot, https://en.wikipedia.org/wiki/Bronocice_pot (pristupljeno 10.travanj 2021.)

[8] Precision Ceramics USA. https://precision-ceramics.com/about-technical-ceramics/ (pristupljeno 19.ožujak 2021.)

[9] CeramTec ceramic materials, Tehnical Ceramics from The Ceramic Experts https://www.ceramtec.com/ceramic-materials/ (pristupljeno 19. ožujak 2021.)

[10] Types of Ceramics for Industrial Applications https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/types-of-ceramics/ (pristupljeno 19.ožujak 2021.)

[11] About advanced ceramics, https://advancedceramics.org/about-advanced-ceramics/ (pristupljeno 20. ožujak 2021.)

[12] Precision Ceramics USA, Tehnical Ceramics https://precision-ceramics.com/about-technical-ceramics/ (pristupljeno 10. travanj 2021.)

[13] https://www.preciseceramic.com/blog/new-ceramic-vs-traditional-ceramic-materials/ (pristupljeno 15. svibanj 2021)
[14] https://www.betase.nl/traditional-and-advanced-ceramics/?lang=en (pristupljeno 15. svibanj 2021)
[15] https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=30267 (pristupljeno 15. svibanj 2021)
[16] https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/ceramics-materials-joining-and-applications-054 (pristupljeno 16. svibanj 2021.)
[17] https://www.ceramdis.com/en/materials/silicon-carbide (pristupljeno 16. svibanj 2021.)
[18] https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1775-uses-for-advanced-ceramics (pristupljeno 20.svibanj 2021.)
[19] https://mefexport.com/ceramic-cutting-tools/ (pristupljeno20.svibanj 2021.)
[20] https://ceramics.org/about/what-are-engineered-ceramics-and-glass/ceramics-and-glass-in-everyday-life (pristupljeno 20. svibanj 2021.)
[21] https://global.kyocera.com/prdct/fc/index.html (pristupljeno 27. svibanj 2021.)
[22] https://usporedi.hr/novosti/kirurzi-stvorili-napredni-elasticni-3d-presadak (pristupljeno 17. lipanj 2021.)

Popis slika

Slika 1 Venera iz Dolni Vestonice
Slika 2 Oblikovanje mokre gline na lončarskom kolu
Slika 3 Lonac Bronocice
Slika 4 Ukrašena urna od keramike
Slika 5 Keramičko posuđe
Slika 6 Osnovna podjela keramike
Slika 7 Povezanost SiO4 tetraedrara
Slika 8 Prikaz SiO4 tetraedarskih vrsta
Slika 9 Tehnička keramika
Slika 10 Podjela oksidne i neoksidne keramike
Slika 11 Podjela keramičkih materijala
Slika 12 Kompozitni materijali s keramičkom matricom

Slika 13 Proizvodnja sintetičkih, amorfnih i kristalnih natrijevih disilikata
Slika 14 Proizvodnja SKS-6 i SKS-6-Co granulata
Slika 15 Struktura amorfnog i kristalnog sintetičkog natrijevog disilikata
Slika 16 Proizvodnja Al2O3 prema Bayerovom postupku
Slika 17 Raspodjela čvrstoće unutar serija
Slika 18 Vickersov otisak s opterećenjem od 10 N
Slika 19 Shematski prikaz rasipanja energije u pukotini rasta metalnih i keramičkih
Slika 20 Dijelovi plinske turbine
Slika 21 Zračno vreteno
Slika 22 Zračni klizač
Slika 23 Rezne oštrice alata za tokarenje
Slika 24 Klizni i brtveni prstenovi
Slika 25 Oblikovni dijelovi od aluminijevog oksida
Slika 26 Keramičke podloge za električne uređaje
Slika 27 Keramički sklop rotora turbopuhala od silicijevog nitrida
Slika 28 Izolatori izrađeni od tehničke keramike
Slika 29 Električni osigurači, utičnice
Slika 30 Otpornici izrađeni od tehničke keramike
Slika 31 Keramički magneti za motore
Slika 32 Zubni implantati
Slika 33 Postupak oblikovanja ekstrudiranjem
Slika 34 Lijevanje trakom

Popis tablica

Tablica 1 Najvažnije prekretnice u povijesti keramike
Tablica 2 Proizvodnja karbida
Tablica 3 Proizvodnja nitrida
Tablica 4 Usporedba svojstava keramike, metala i polimera