

Postupci oblikovanja tehničke keramike

Matić, Mislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:068515>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-17**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mislav Matić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Lidija Čurković

Student:

Mislav Matić

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu uz financijsku potporu Hrvatske zaklade za znanost projektom IP2016-06-6000. Napredna monolitna i kompozitna keramika za zaštitu od trošenja i korozije (WECOR).

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof. dr. sc. Lidiji Ćurković na pomoći, savjetima i ideji za ovaj rad.

Mislav Matić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1 | |
| Ur. broj: 15 - 1703 - 21 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mislav Matić** Mat. br.: 0035211058

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Postupci oblikovanja tehničke keramike**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Shaping of technical ceramics**

Opis zadatka:

U cjelokupnom kompleksnom procesu proizvodnje, određeni prah, oblikovanje i proces sinteriranja zajedno utječu na stvaranje presudno važne mikrostrukture i time željenih svojstava keramičkih proizvoda. Vrlo je važno da se različitim postupcima oblikovanja ne stvore različiti gradijenti gustoće i teksture, jer se to počenjem (sinteriranjem) može pojačati i dovesti do deformacija i uzrokovati nastajanje neželjenih naprezanja. Odabir prikladnog postupka oblikovanja tehničke keramike provodi se najčešće prema ekonomskim kriterijima (racionalna izrada).


U radu je potrebno navesti i opisati postupke oblikovanje tehničke keramike:

1. prešanje (hladno izostatičko, vruće izostatičko),
2. lijevanje (lijevanje suspenzije, lijevanje folija),
3. plastično oblikovanje (injekcijsko lijevanje, ekstrudiranje).

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatok zadan:
30. studenoga 2020.

Zadatok zadan:


Prof. dr. sc. Lidija Čurković

Datum predaje rada:
1. rok: 18. veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | |
|---|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | IV |
| SAŽETAK..... | V |
| SUMMARY | VI |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. TEHNIČKA KERAMIKA | 4 |
| 3. POSTUPCI OBLIKOVANJA TEHNIČKE KERAMIKE | 6 |
| 4. PREŠANJE | 10 |
| 4.1. Hladno izostatičko prešanje | 10 |
| 4.1.1. Opis procesa..... | 10 |
| 4.1.2. Metoda „mokra vreća“ | 11 |
| 4.1.3. Metoda „suhe vreće“ | 13 |
| 4.2. Vruće izostatičko prešanje | 15 |
| 4.2.1. Opis procesa..... | 15 |
| 4.2.2. Prešanje pomoću kapsule | 17 |
| 4.2.3. Prešanje bez kapsuliranja | 18 |
| 4.2.4. Prednosti i primjena | 18 |
| 5. LIJEVANJE..... | 20 |
| 5.1. Lijevanje suspenzije | 20 |
| 5.1.1. Opis procesa..... | 20 |
| 5.1.2. Stabilnost suspenzije | 21 |
| 5.1.3. Prednosti i nedostaci | 22 |
| 5.2. Lijevanje folije | 23 |
| 5.2.1. Opis i primjena..... | 23 |
| 5.2.2. Proces oblikovanja | 23 |
| 5.2.3. Prednosti i nedostaci | 25 |
| 6. PLASTIČNO OBLIKOVANJE | 26 |

| | |
|--|----|
| 6.1. Injekcijsko prešanje..... | 26 |
| 6.1.1. Opis procesa..... | 26 |
| 6.1.2. Primjene, prednosti i nedostaci | 29 |
| 6.2. Ekstrudiranje | 30 |
| 6.2.1. Opis procesa..... | 30 |
| 6.2.2. Ekstruder s klipnim mehanizmom | 31 |
| 6.2.3. Ekstruder s pužnim vijkom | 32 |
| 6.2.4. Prednosti i nedostaci, primjena | 32 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 35 |
| LITERATURA..... | 36 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. a) Posuda iz kulture stare Grčke i b) drevna ikona građena keramičkim materijalom [2,3] | 1 |
| Slika 2. a) Svjećica Ottovog motora i b) zubni imaplatanti [5,6]..... | 1 |
| Slika 3. a) Piezo-keramički proizvodi i b) proizvodi od cirkonijevog oksida [9]..... | 5 |
| Slika 4. Prah aluminijevog oksida [11] | 6 |
| Slika 5. Mikrostruktura aluminijevog oksida snimljenog mikroskopom [4] | 6 |
| Slika 6. Primjeri nehomogenosti mikrostrukture oblikovanog praha [12]..... | 7 |
| Slika 7. Bitne faze procesa proizvodnje tehničke keramike [4]..... | 8 |
| Slika 8. Utjecajni faktori na mikrostrukturu i svojstva keramičkog proizvoda [4]..... | 9 |
| Slika 9. Djelovanje tlaka tekućine na uronjeno tijelo [14]..... | 10 |
| Slika 10. Gumeni kalupi za izostatičko prešanje [15]..... | 11 |
| Slika 11. Skica izostatičkog prešanja „mokrom vrećom“ [13] | 12 |
| Slika 12. Prešanje svjećica za Ottov motor s unutarnjim izgaranjem [13] | 13 |
| Slika 13. Postupak izostatičkog prešanja „suhom vrećom“ [13] | 14 |
| Slika 14. Stanica za hladno izostatičko prešanje [16] | 15 |
| Slika 15. Presjek komore prilikom prešanja [17]..... | 16 |
| Slika 16. Postupak vrućeg izostatičkog prešanja pomoću kapsule [13]..... | 17 |
| Slika 17. Postupak prešanja prethodno oblikovanog komada [13] | 18 |
| Slika 18. Postupak lijevanja suspenzije [19] | 20 |
| Slika 19. Stabilni i nestabilni koloid [20]..... | 21 |
| Slika 20. Velikoserijska proizvodnja keramike lijevanjem suspenzije u kalupe [21]..... | 22 |
| Slika 21. Skica postupka oblikovanja lijevanja folije [23]..... | 23 |
| Slika 22. Uređaj za lijevanje keramičke folije [22]..... | 24 |
| Slika 23. a) Keramička folija dobivena lijevanjem i b) oblikovanje keramičke folije [22].... | 25 |
| Slika 24. Faze procesa oblikovanja i proizvodnje injekcijskim prešanjem [25]..... | 27 |
| Slika 25. Skica postupka injekcijskog prešanja [13]..... | 28 |
| Slika 26. Sklop jedinica za injekcijsko prešanje [26]..... | 29 |
| Slika 27. Izvedba ekstrudera s klipom pri izradi osovine i cijevi [13]..... | 31 |
| Slika 28. Izvedba ekstrudera s pužnim vijkom [4]..... | 32 |
| Slika 29. a) Oblikovana sačasta komponenta i b) oblikovani cilindrični dijelovi [28]..... | 33 |
| Slika 30. Ekstruder sa sklopnim jedinicama za proizvodnju [29]..... | 34 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Usporedba svojstva keramike, metala i polimera [7] | 2 |
| Tablica 2. Prednosti i nedostaci lijevanja suspenzije [4,18] | 22 |
| Tablica 3. Prednosti i nedostaci lijevanja folije [4,22]..... | 25 |
| Tablica 4. Aditivi koji se dodaju u masu za injekcijsko prešanje [13]..... | 27 |
| Tablica 5. Prednosti i nedostaci injekcijskog prešanja [4,13,24] | 30 |
| Tablica 6. Primjeri proizvoda dobivenih ekstrudiranjem [27] | 33 |
| Tablica 7. Prednosti i nedostaci ekstrudiranja [4] | 34 |

SAŽETAK

Cilj u ovom radu bio je navesti i opisati postupke oblikovanja tehničke keramike. Uz odabrani prah i postupak sinteriranja, na mikrostrukturu i svojstva keramičkih proizvoda bitno utječu postupci oblikovanja. Prema tome veoma je važno prilikom konstruiranja i proizvodnje keramičkih proizvoda odabrati adekvatan postupak za oblikovanje.

Bitno je da postupkom oblikovanja ne dođe stvaranja različitih gradijenata gustoće i teksture jer kod postupka sinteriranja može doći do dodatnog povećanja gradijenta pa s time dolazi deformacija i nastajanja zaostalih naprezanja u materijalu. Također, o odabiru postupka oblikovanja tehničke keramike ovisi ekonomski kriterij.

Ključne riječi: postupci oblikovanja tehničke keramike, mikrostruktura, svojstva, ekonomski kriterij

SUMMARY

The aim of this paper was to list and describe the procedures for shaping technical ceramics. In addition to the selected powder and sintering process, the microstructure and properties of ceramic products are significantly affected by molding processes. Therefore, it is very important when designing and manufacturing ceramic products to choose an appropriate molding process. It is important that the forming process does not create different gradients of density and texture, because the sintering process can lead to an additional increase in that gradients, which leads to deformation and the formation of residual stresses in the material. Also, the economic criterion depends on the choice of the process of shaping technical ceramics.

Key words: advanced ceramics shaping procedures, microstructure, properties, economic criterion

1. UVOD

Keramika je jedan od najstarijih čovjeku poznatih materijala od koje su kroz povijest radena mnoga pomagala kao što su lonci, vrčevi, alati, i slično. Na slici 1 prikazani su primjeri drevnih keramičkih proizvoda. [1]



Slika 1. a) Posuda iz kulture stare Grčke i b) drevna ikona građena keramičkim materijalom [2,3]

Međutim, keramika se tek počela razmatrati i razvijati za tehničke primjene u prvoj polovici prošlog stoljeća. Keramika koja se primjenjuje u tehnici i industriji naziva *tehnička keramika*. Njezinim razvitkom došlo je do sve češće primjene od svakodnevnog života do zrakoplovstva, strojarstva, građevinarstva, elektrotehnike, medicine, autoindustrije i mnoge druge. [4] Slika 2 prikazuje keramičke dijelove koji se koriste u navedenim industrijama.



Slika 2. a) Svjećica Ottovog motora i b) zubni imaplatanti [5,6]

Upravo zbog njenih odličnih svojstava kao što su visoka tvrdoća i čvrstoća, visoko talište, visoke dopuštene temperature primjene, kemijska postojanost i otpornost na trošenje te mnoga druga, mogu se primjenjivati u gotovo svim uvjetima rada. Najveća mana keramike je svojstvo krhkosti odnosno male žilavosti koja ograničava primjenu u uvjetima gdje su npr. prisutna dinamička promjenjiva opterećenja. Također, keramika je sklona pucanju pri temperaturnim šokovima i ima malu mogućnost istezanja. [4] U tablici 1 prikazana je usporedba svojstava keramike sa drugim materijalima.

Tablica 1. Usporedba svojstva keramike, metala i polimera [7]

| Karakteristika | Keramika | Metali | Polimeri |
|----------------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Gustoća | niska do visoka | niska do visoka | niska |
| Tvrdoća | visoka | srednja | niska |
| Čvrstoća | srednja | visoka | niska |
| Otpornost trošenju | visoka | srednja | niska |
| Vlačna Čvrstoća | niska do srednja | visoka | niska |
| Pritisna čvrstoća | visoka | srednja do visoka | niska do srednja |
| Youngov modul elastičnosti | srednji do visoki | nizak do visok | nizak |
| Dimenzijska stabilnosti | visoka | srednja | niska |
| Toplinska rastezljivost | niska do visoka | srednja do visoka | visoka |
| Toplinska provodnost | srednja | srednja do visoka | niska |
| Toplinski umor | niska | srednja do visoka | visoka |
| Električna otpornost | visoka | niska | visoka |
| Kemijska otpornost | visoka | niska do srednja | srednja |
| Otpornost oksidaciji | srednja do visoka | niska | niska |
| Rezljivost | niska | visoka | srednja |

S druge strane, inženjeri u praksi rijetko primjenjuju keramičke proizvode zbog nedostatka upućenosti i iskustva s takvim materijalom. Keramika se također može proizvoditi u kombinaciji sa drugim skupinama materijala odnosno metalima i polimerima čineći kompozite. Kompozitima se nastoji postići svojstva koja se jednom skupinom materijala to ne može postići. [4,8]

Keramički proizvodi se najčešće proizvode iz praha. Kod proizvodnje keramike toplinska obrada proizvoda dolazi nakon oblikovanja za razliku od metala i polimera gdje je obrnuti slučaj. Proces proizvodnje, naručito postupak oblikovanja, bitno utječe na mikrostrukturu, a time i na svojstva gotovog proizvoda. Zato je velika pažnja inženjera usmjerena na razvijanje optimalnih načina proizvodnje keramike odnosno keramičkih proizvoda kako bi se zadovoljio ekonomski kriterij s jedne strane te kriterij kvalitete s druge strane. [4,8]

U ovom radu pažnja je posvećena proizvodnji tehničke keramike odnosno jednom od koraka proizvodnje, a to su **postupci oblikovanja tehničke keramike**. Oblikovanje jedan je od najvažnijih koraka u procesu proizvodnje tehničke keramike. U ovom radu su navedeni i opisani najčešći postupci oblikovanja, razlozi i način na koji se koriste u proizvodnji.

Vrijedi spomenuti da u hrvatskoj postoji nekoliko tvrtki koje se bave proizvodnjom tehničke keramike, a to su: „*Applied Ceramics*“ iz Siska, „*Selk*“ iz Kutine, „*Inker*“ iz Zaprešića. [9]

2. TEHNIČKA KERAMIKA

Keramika je anorganska tvar koju sačinjavaju međusobni spojevi nemetala i metala povezanih ionskim ili kovalentnim vezama. Keramika jedna je od četiri skupina iz grupe tehničkih materijala te su uz nju metali, polimeri i kompoziti. Svaka skupina ima specifična svojstva i strukturu. Tehnička keramika obuhvaća sve vrste keramike i keramičkih proizvoda koji se koriste u tehničke svrhe i industriji. [4]

Tehnička keramika dijeli se prema kemijskom (mineralnom) sastavu na [4]:

- silikatnu keramiku (npr. porculan, mulit, kordijerit, steatit)
- oksidnu keramiku (tipični predstavnici: Al_2O_3 , ZrO_2 , Al_2TiO_5)
- neoksidnu keramiku (tipični predstavnici: SiC , Si_3N_4 , B_4C , kubni BN, tvrdi metali: TiN, TiC)

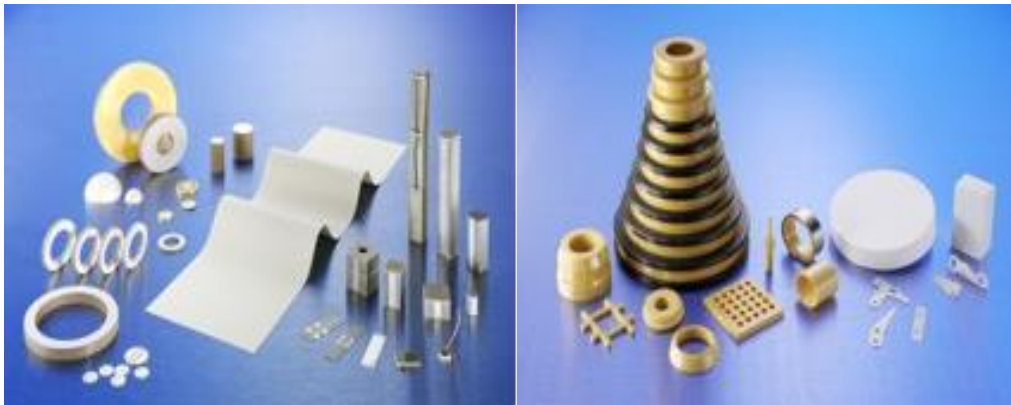
S obzirom na veličinu zrna tehnička keramika se dijeli na [4]:

- grubu keramiku (veličina zrna iznosi od 0,1 mm do 0,2 mm)
- finu keramiku (veličina zrna manja od 0,1 mm)

I zadnja podjela prema namjeni [4]:

- visokokvalitetna keramika
- konstrukcijska keramika
- industrijska keramika
- funkcionalna keramika
- elektrokemika
- rezna keramika
- biokeramika

Na sljedećoj slici 3 prikazan je skup keramičkih proizvoda.



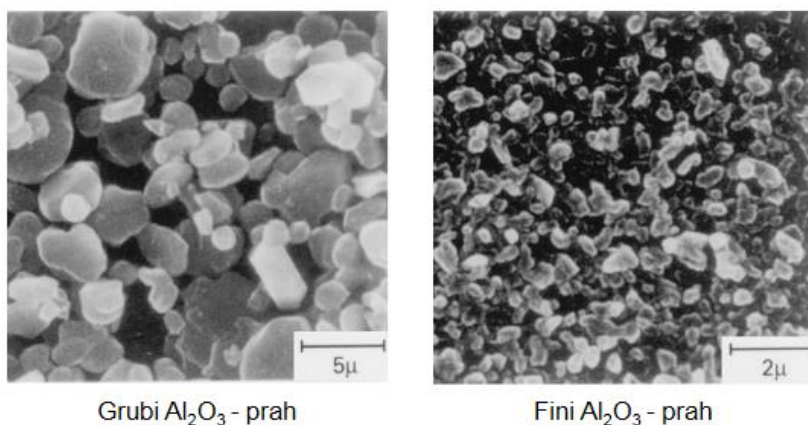
Slika 3. a) Piezo-keramički proizvodi i b) proizvodi od cirkonijskog oksida [9]

3. POSTUPCI OBLIKOVANJA TEHNIČKE KERAMIKE

Keramički proizvodi obično se izrađuju iz praha koji se podvrgava različitim fazama proizvodnje te se formira u željene oblike koji mogu biti prilično složeni. Odabir načina proizvodnje pogotovo postupak oblikovanja značajno ovisi o vrsti materijala, konačnom obliku komponenta te utječe na konačna svojstva proizvoda. [8] Na slici 4 i 5 dan je primjer praha aluminijevog oksida i njegove mikrostrukture.

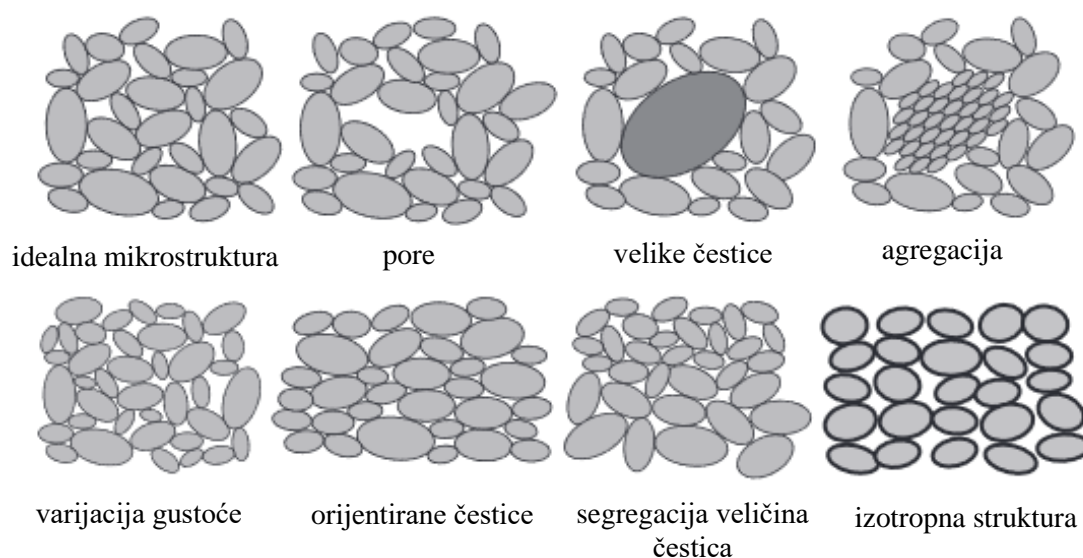


Slika 4. Prah aluminijevog oksida [11]



Slika 5. Mikrostruktura aluminijevog oksida snimljenog mikroskopom [4]

Glavni cilj u procesu proizvodnje je postići što bolju kvalitetu proizvoda odnosno postići što bolju mikrostrukturu bez grešaka jer nastale pore, uključci, nečistoće ili neka druga nehomogenost mikrostrukture mogu prilikom primjene komponente u eksploataciji uzrokovati koncentraciju naprezanja ako se radi o uvjetima opterećenja, a time i rizik od loma. [8] Slika 6 daje prikaz različitih mikrostrukture sa nehomogenostima u kompaktiranom prahu.



Slika 6. Primjeri nehomogenosti mikrostrukture oblikovanog praha [12]

Te nepravilnosti odnosno greške najčešće proizlaze iz samog keramičkog praha, a nepravilnosti unesene u bilo kojoj od faza zadržati će se i u nadolazećim fazama proizvodnje te se oni daljnjom obradom ne mogu ukloniti. Zbog toga je čistoća i kontrola prahova prvi ključni faktor za proizvodnju komponenata bez grešaka. Stoga, kako bi se izradili kvalitetniji proizvodi potrebno je razviti metode za sintezu čistih, kontroliranih prahova s malim udjelom i veličinom nepravilnosti te izbjeci unosenje novih grešaka u narednim proizvodnim koracima. [8] Kod većina metoda prilikom pripreme mase dodaju se određeni aditivi kako bi poboljšali svojstva smjese, a neki od njih su [4]:

- Veziva
- Otapala
- Disperzanti
- Plastifikatori
- Ojačala
- Pomoćna sredstva za sinteriranje
- Sredstva za tečenje

Postupak za pripremu mase radi se ovisno o postupku oblikovanja odnosno svaki postupak oblikovanja zahtijeva određen pripravak mase [4]:

- Suspenzije – za lijevanje
- Granulati – za prešanje
- Keramička „tijesta“ (oblikovljive mase) – za ekstrudiranje i injekcijsko prešanje

Tehnikom prerade praha keramika se proizvodi u slijedećim fazama kako je prikazano na slici 7.



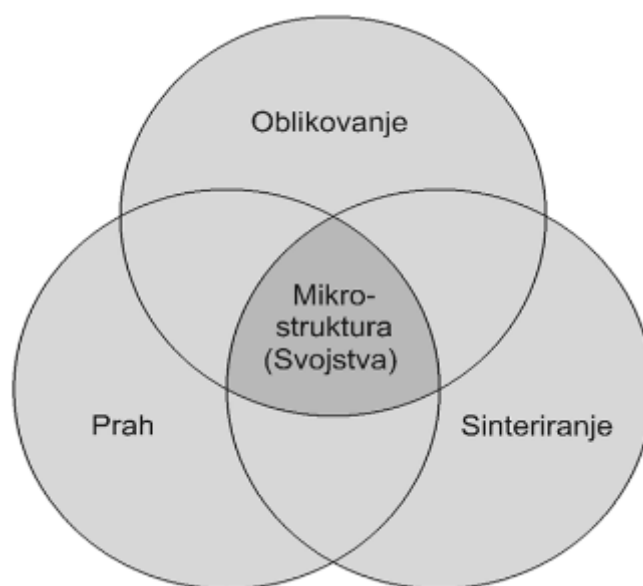
Slika 7. Bitne faze procesa proizvodnje tehničke keramike [4]

Oblikovanje jedan je od najvažnijih koraka u procesu proizvodnje gdje dolazi do kompaktiranja keramičkog praha u oblikovano tijelo odnosno *sirovac*. Različite tehnologije oblikovanja mogu se koristiti za proizvodnju tehničke keramike kao što su lijevanje suspenzije i folije, prešanje, ekstrudiranje te neki visoko sofisticirani postupci poput tlačnog lijevanja, brze izrade prototipa i druge. Neke metode oblikovanja su dobro razvijene i dostupne za veliku odnosno masovnu proizvodnju dok su druge u razvoju pa su prikladne samo za laboratorijske potrebe. [8]

Općenita podjela metoda oblikovanja se prikazuje u tri skupine prema udjelu prisutne vlage [4]:

- Prešanje: - ugušćivanje oblikovane mase (praha), vruće prešanje, vruće izostatsko prešanje, hladno izostatsko prešanje, suho prešanje
- vlažnost: 0 – 15%
- Plastično oblikovanje : - ekstrudiranje
- injekcijsko prešanje,
- vlažnost 15 – 25 %
- Lijevanje (koloidne metode): - lijevanje pod tlakom
- lijevanje suspenzije
- lijevanje folije
- vlažnost > 25%

Mikrostruktura keramičkog proizvoda ovisiti će o procesu oblikovanja keramičkog praha u sirovac, a mikrostruktura sirovca zadržati će se i u danjim postupcima obrade. Vrijedi spomenuti da se metode koje se koriste za oblikovanje i proizvodnju polimera mogu primijeniti i na keramičke proizvode pa je iz toga i izraz *plastično* oblikovanje. Slično kao što se keramika proizvodi iz praha mogu se proizvoditi i metalni proizvodi. Također, treba se racionalno odabrati adekvatan postupak kako bi bilo ekonomski prihvatljivo i isplativo. [4,8] Na slici 8 dan je prikaz utjecajnih čimbenika na svojstva i mikrostrukturu keramičkog proizvoda.



Slika 8. Utjecajni faktori na mikrostrukturu i svojstva keramičkog proizvoda [4]

4. PREŠANJE

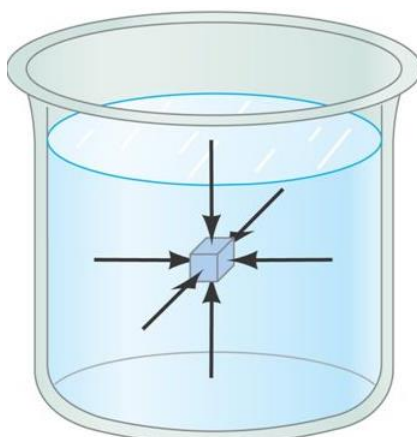
Metoda oblikovanja prešanjem praha u željeni oblik ili sirovac, jedan je od najraširenijih postupaka proizvodnje preradom praha bilo kod keramičkih ili metalnih dijelova. Najrazvijenije i najčešće metode prešanja koje se koriste u praksi su suho jednoosno prešanje, vruće jednoosno prešanje, hladno izostatičko prešanje, vruće izostatičko prešanje.

Kao što je spomenuto za svaki postupak oblikovanja radi se poseban pripravak mase pa će se u slučaju prešanja koristiti granulati odnosno masa veoma niske vlažnosti sa malim udjelima aditiva, a veličina čestica ovisiti će o vrsti prešanja. [13]

4.1. Hladno izostatičko prešanje

4.1.1. Opis procesa

Hladno izostatičko prešanje česta je metoda koja se primjenjuje u proizvodnji keramičkih dijelova gotovo za sve vrste oblika i veličine keramičkih proizvoda. Kod izostatičkog prešanja suzbijanje praha se ostvaruje na način da se tlačenje vrši u svim smjerovima pomoću tekućeg ili plinovitog medija. Djelovanje hidrostatskog tlaka na tijelo uronjeno u tekućinu objašnjava mehanizam ovakvog načina prešanja. [13] Tlak tekućine djeluje na uronjeno tijelo u svakoj točki površine jednako kao što je prikazano na slici 9.



Slika 9. Djelovanje tlaka tekućine na uronjeno tijelo [14]

Tijekom procesa prešanja tlak se regulira radom preše ili pumpe. Pojam *hladno* govori da se postupak odvija pri sobnoj temperaturi. U ovom postupku koristi se savitljivi kalup uronjen u tlačenu tekućinu. Kalup se izrađuje od polimernih materijala (gume) kako bi se mogao savijati prilikom procesa te mora sadržavati definirani unutarnji oblik sirovca. [13] Slikom 10 prikazano je nekoliko gumenih kalupa korištenih u procesu prešanja.



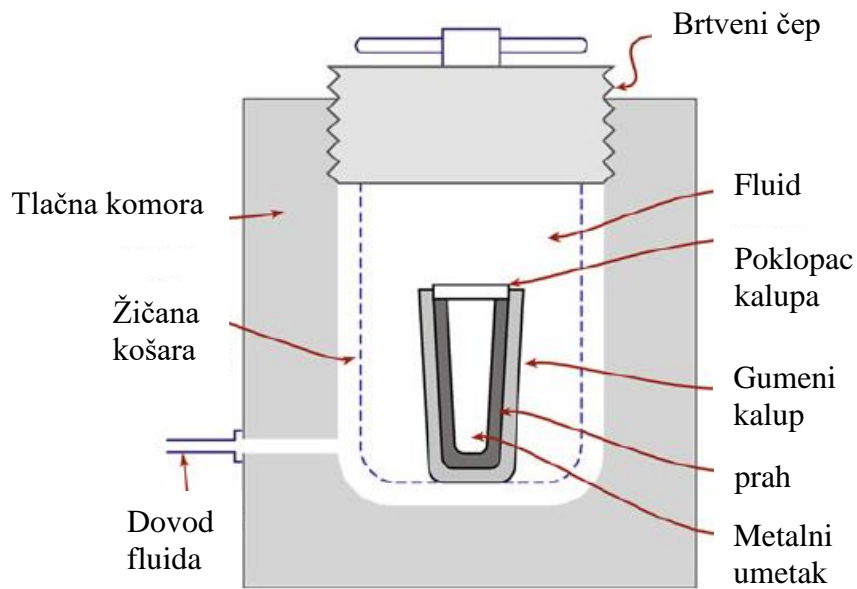
Slika 10. Gumeni kalupi za izostatičko prešanje [15]

Koriste se dvije vrste hladnog izostatičkog prešanja [13]:

- „Mokra vreća“
- „Suha vreća“

4.1.2. Metoda „mokra vreća“

Kod metode „Mokre vreće“ prah se puni u savitljivi gumeni kalup (vreća) koji se zatvara pomoću metalne brtvene ploče ili umetka ovisno o obliku sirovca. Zatim se zabrtvljeni gumeni kalup uroni u tlačnu komoru ispunjenu fluidom kojim se vrši tlačjenje. Tlačene tekućine su obično mješavine ulja i vode. Komora se zatim zatvara brtvenim poklopcem nakon čega dolazi do tlačjenja. Tlakovi koji se primjenjuju mogu varirati od 20 MPa do 1 GPa ovisno o proizvodu i preši. Međutim, u praksi se najčešće vrijednosti tlakova ne penju iznad 400 MPa. Kada je tlačjenje praha gotovo tlak se postupno smanjuje, a gumeni kalup se izvadi iz komore iz kojeg se odvaja oblikovani sirovac. Postupak može se automatizirati i u komori se može nalaziti više napunjenih kalupa ovisno o prostoru komore. [13] Na slici 11 dan je prikaz postupka hladnog izostatičkog prešanja s „mokrrom vrećom“.



Slika 11. Skica izostatičkog prešanja „mokrom vrećom“ [13]

Prednosti metode „mokre vreće“ su [13]:

- mogu se oblikovati sirovci složenijih oblika i velikih dimenzija
- postiže se uniformna gustoća sirovca
- nema velikih troškova alata i održavanja

Nedostaci [13]:

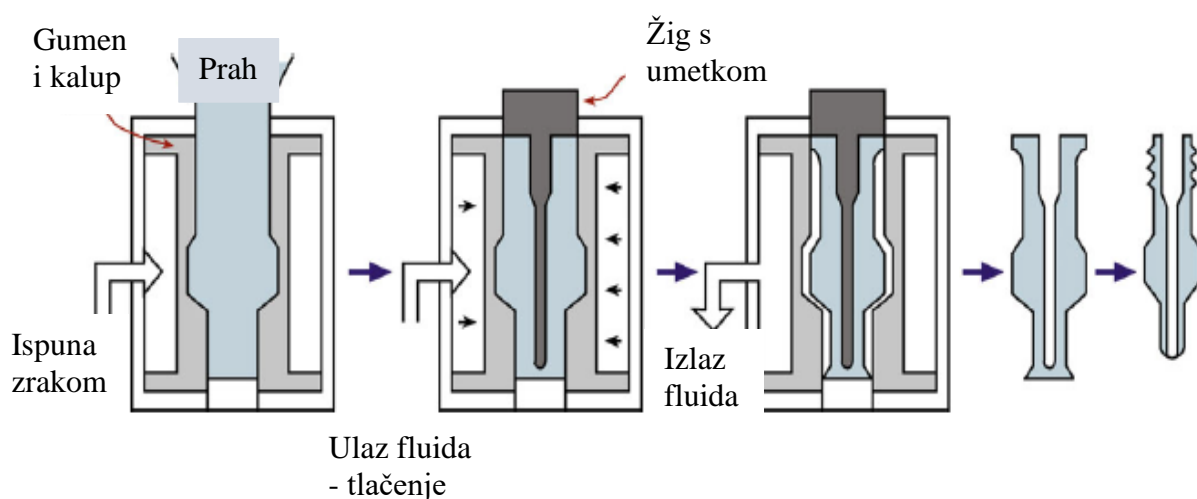
- loša kontrola oblika i dimenzija pogotovo za složenije oblike
- često je potrebna mehanička obrada nakon prešanja
- duže vrijeme postupka (od 5 min do 1 h) što loše utječe na ekonomsku isplativost

4.1.3. Metoda „suhe vreće“

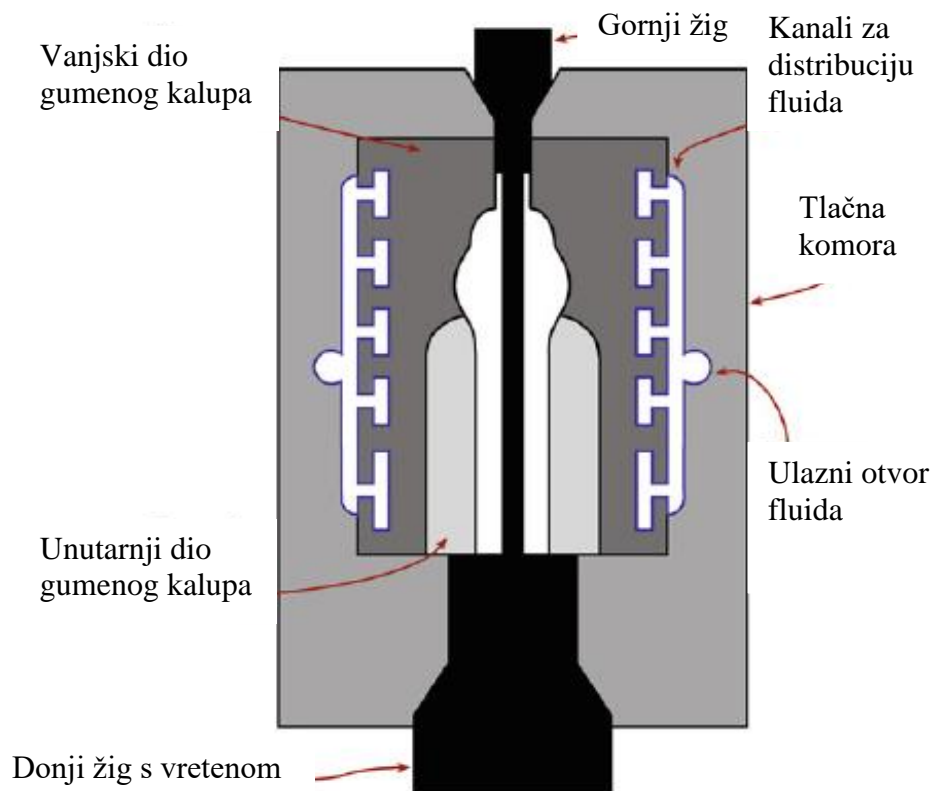
Najveća razlika između ove i prethodne vrste prešanja je ta što je kod metode „suhe vreće“ gumeni kalup ugrađen unutar komore pa je sada sastavni dio preše. Proces prešanja se izvodi nešto slično kao i kod prethodnog postupka.

Prije punjenja praha u kalup donji žig brtvi i zatvara donju šupljinu kalupa. Ako je proizvod šupljeg oblika tada je jedan od žigova preše izveden u obliku vretena oko kojeg se prostor ispunjava prahom. Nakon što je ubačena propisana količina praha u kalup gornji žig također zatvara i brtvi gornju šupljinu kalupa te počinje proces tlačenja odnosno prešanja. Tlačenje se vrši fluidom ravnomjerno sa bočnih strana te pomoću žigova preše s gornje i donje strane pa će posljedično tome utjecaj hidrostatskog tlaka biti nešto manji nego kod prethodne metode. [13] Nakon prešanja tlak se postupno smanjuje, žigovi se uvlače, a sirovac se odvaja iz nepomičnog kalupa. Ovaj postupak lako se automatizira upravo zbog integriranog kalupa unutar preše pa je vrijeme ciklusa puno kraće u usporedbi sa prethodnom metodom. [13]

U industriji proizvodnje tehničke keramike ovaj postupak je u širokoj primjeni i njegovim razvojem postignuta je visoka produktivnost pogotovo kod proizvoda manjih dimenzija i jednostavnijih oblika. Ova metoda prešanja koristi se dugi niz godina za proizvodnju svjećica automobila. Na sljedećim slikama 12 i 13 prikazan je postupak prešanja „suhom vrećom“ i proizvodnja sirovca za svjećice Ottovog motora s unutarnjim izgaranjem istim postupkom. [13]



Slika 12. Prešanje svjećica za Ottov motor s unutarnjim izgaranjem [13]



Slika 13. Postupak izostatičkog prešanja „suhom vrećom“ [13]

Prednosti postupka „suhe vreće“ [13] :

- pogodan za velikoserijske proizvodnje
- uniformna gustoća sirovca
- kratko vrijeme ciklusa

Nedostaci postupka [13]:

- nije pogodno za kompliciranije oblike

Na slijedećoj slici 14 prikazan je sustav jedinica odnosno kompletan uređaj za hladno izostatičko prešanje.



Slika 14. Stanica za hladno izostatičko prešanje [16]

4.2. Vruće izostatičko prešanje

4.2.1. Opis procesa

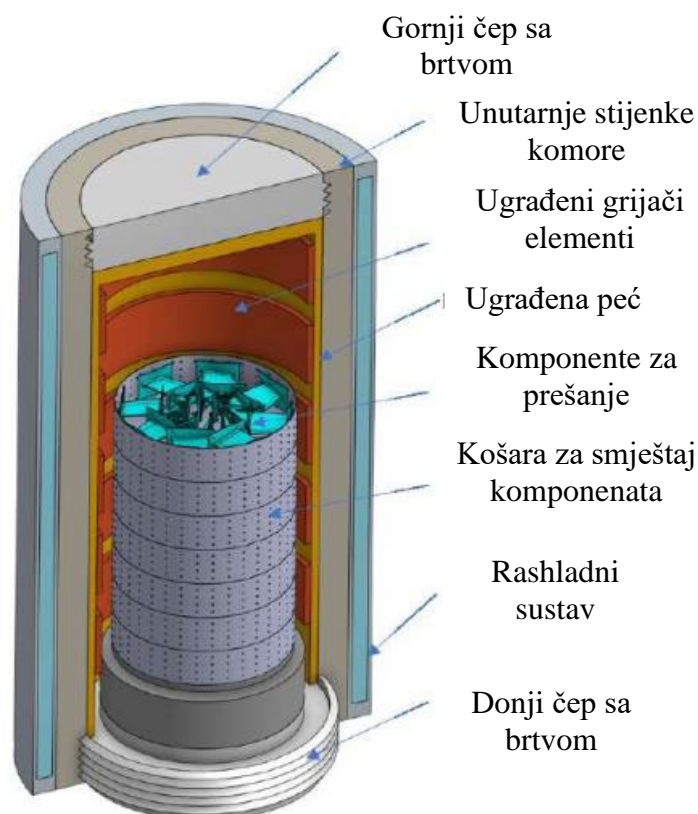
Vruće izostatičko prešanje je postupak oblikovanja ujedno i sinteriranja keramičkih ili metalnih proizvoda gdje se (kao i kod hladnog izostatičkog prešanja) prah tlači jednako na ukupnu površinu izratka, ali u uvjetima povišene temperature. Temperature vrućeg izostatičkog prešanja kreću se od nekoliko stotina pa sve do čak 2000 °C ovisno o materijalu praha. Jedna od ključnih razlika je što se u ovom postupku za radni fluid koriste plinovi dok se u prethodnom postupku koriste tekućine. Najčešće se koristi inertni plin argon kako ne bi došlo do reakcije s određenim materijalima, ali se mogu koristiti i aktivni plinovi odnosno oksidni i reaktivni plinovi. Kako bi se postigla potrebna temperatura unutar tlačne komore ugrađena je peć u koju se postavljaju komadi za prešanje. Veličina tlakova se također primjenjuje ovisno o materijalu praha, složenosti i veličini oblika kao što vrijedi i za temperaturu. Uobičajene vrijednosti tlaka prilikom prešanja često se kreću od 30 – 300 MPa. [13]

Kod procesa vrućeg izostatičkog prešanja prah koji se priprema za prešanje ne treba sadržavati količine aditiva kao i kod ostalih postupaka te često nisu ni potrebni. Ovim postupkom mogu se proizvesti keramički dijelovi jednostavnijih ili složenijih oblika. [13]

Važno je spomenuti da se ovaj postupak primjenjuje na kraju procesa proizvodnje za razliku od klasičnog redoslijeda faza proizvodnje. Sastavne jedinice i dijelovi koji čine sklop za vruće izostatičko prešanje najčešće su izrađeni od vatrootpornih materijala kao što su čelične legure na bazi kroma, aluminijske i molibden, ili vlaknima ojačan grafit. Postupak vrućeg prešanja izvodi se na dva različita načina [13]:

- Prešanje pomoću deformabilne kapsule
- Bez kapsule (prvo se vrši oblikovanje i sinteriranje pa prešanje)

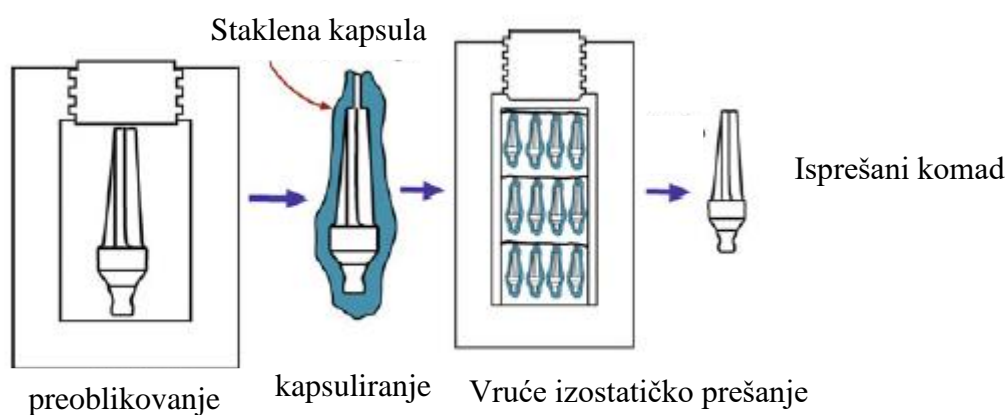
Na slici 15 dana je skica presjeka komore unutar koje se vrši prešanje.



Slika 15. Presjek komore prilikom prešanja [17]

4.2.2. Prešanje pomoću kapsule

Metoda u kojoj se prešanje vrši pomoću deformabilne kapsule je klasičan način kojim se primjenjuje vruće izostatičko prešanje kako metalnih tako i keramičkih dijelova. Ciklus prešanja započinje punjenjem kapsule prahom koji poprima odgovarajući oblik zatim se zrak istisne i kapsula se zatvara i brtvi. Tako zatvorena kapsula se sada izlaže visokoj temperaturi i tlaku odnosno prešanju. Međutim, kako su se s razvojem keramičkog praha veličina zrna postupno smanjivala pojavile su se komplikacije prilikom prešanja. Kako bi se izbjegle komplikacije keramički se prah prethodno oblikuje jednim od postupaka (jednoosno, hladno izostatičko ili injekcijsko prešanje) te se tako oblikovan sirovac omota u staklenu kapsulu nakon čega se primjenjuje vruće izostatičko prešanje. [13] Takav postupak prikazan je na slijedećoj slici 16.

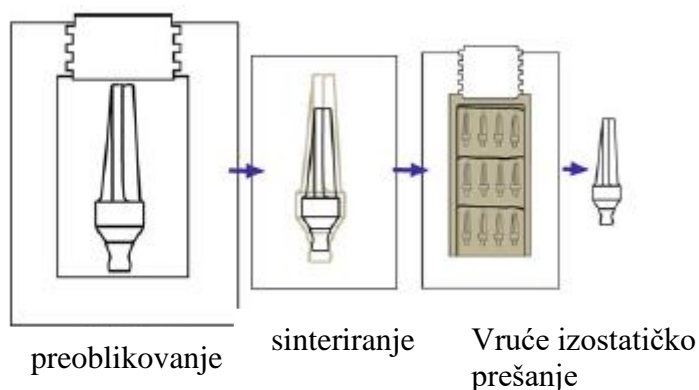


Slika 16. Postupak vrućeg izostatičkog prešanja pomoću kapsule [13]

Ova metoda zahtjeva duže vrijeme ciklusa s obzirom da se keramički prah kapsulira i na kraju procesa sirovci vade iz staklenih kapsula, ali se taj problem može kompenzirati ako se istovremeno obrađuje više komada. [13]

4.2.3. Prešanje bez kapsuliranja

Drugi način postupaka radi se bez kapsulacije praha na način da se prah prethodno oblikuje u sirovac jednom od metoda oblikovanja nakon kojeg se vrši sinteriranje na relativno visokim temperaturama kako bi se zatvorile površinske pore za sprječavanje ulaska plina. Na kraju dolazi do vrućeg izostatičkog prešanja. [13] Ovaj način često se naziva i „*sinter - plus HIP*“ metoda koja je prikazana na slijedećoj slici 17.



Slika 17. Postupak prešanja prethodno oblikovanog komada [13]

4.2.4. Prednosti i primjena

Vruće izostatičko prešanje ima veoma široku primjenu upravo zbog prednosti koje povlači za sobom [13]:

- mogu sve proizvoditi od jednostavnih do veoma složenih oblika
- proizvodi ovim postupkom postižu gotovo 100 % moguću gustoću zadržavanjem manjih zrna
- aditivi su gotovo nepotrebni
- postiže se uniformna gustoća
- zatvaraju se mikrostrukturne pore
- nedostaci uneseni prilikom prethodnih faza mogu se ukloniti ovim postupkom čime se uklanjaju potencijalna mjesta loma
- postiže se izotropna mikrostruktura te time i svojstva

- smanjuje mogućnost loma zbog umora materijala
- povećava se duktilnost proizvoda
- rastu tvrdoća i čvrstoća
- ovim postupkom proizvode se metali i njihove legure sa posebnim zahtjevima na svojstva kao i metalni i keramički kompoziti

Ovim postupkom naručito se proizvode dijelovi koji su izloženi teškim radnim uvjetima gdje su prisutna visoka opterećenja, visoke temperature, agresivni mediji i slično. Njegova najveća manjkavost je visoka cijena. Razlog visoke cijene je veći utrošak energije prilikom procesa jer se radi o visokim temperaturama i tlakovima te također visoka cijena sklopnih dijelova preše, a nekad je potrebna i naknadna obrada isprešanog komada. [13]

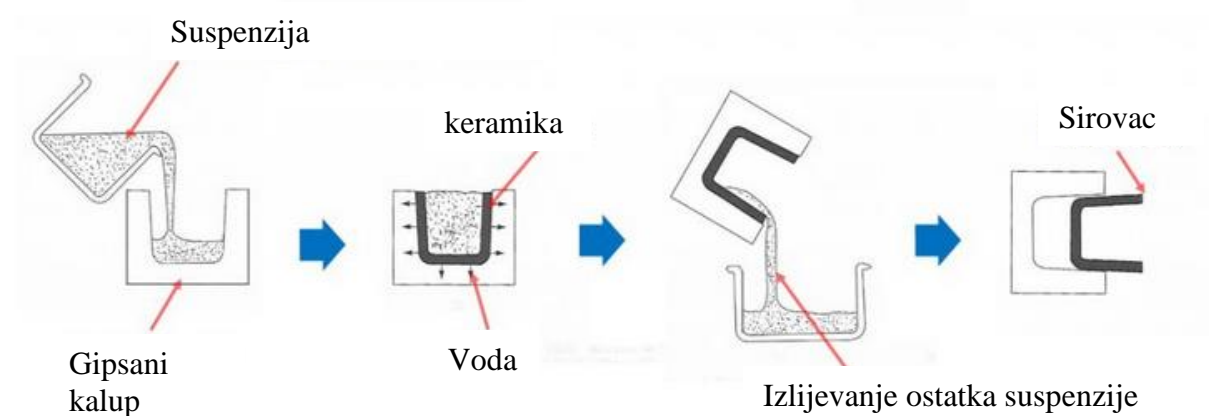
5. LIJEVANJE

Lijevanje je najstariji postupak oblikovanja koji se koristi prilikom proizvodnje bilo tradicionalne ili tehničke keramike, a pod pojmom lijevanje se ponajprije misli na postupak lijevanja suspenzije što je ujedno i tradicionalan postupak za izradu keramičkih posuda. Međutim, kako je rastao interes za proizvodnju keramičkih dijelova tako su se razvijale različite metode oblikovanja lijevanjem pa su do danas razvijene metode kao što je lijevanje folije te tlačno lijevanje i mnoge druge. Međutim najčešće se primjenjuju metode lijevanja suspenzije i lijevanje folije koje su ujedno u ovom radu opisane. [10]

5.1. Lijevanje suspenzije

5.1.1. Opis procesa

Lijevanje suspenzije jedan je od najstarijih postupaka oblikovanja keramike. Ovim postupkom lijevanja mogu se oblikovati veoma složeni oblici keramičkih proizvoda. Postupak se vrlo jednostavno provodi na sobnoj temperaturi tako što se pripravljena masa odnosno suspenzija ulijeva u kalup čije šupljine poprimaju potreban oblik proizvoda. Kako je kalup izrađen od gipsa povući će vlagu, a u kalupu ostaje kruta keramička smjesa odnosno sirovac. Nakon određenog vremena kompaktiranja, sirovac se vadi iz kalupa i odlazi na daljnju obradu odnosno sušenje i sinteriranje (pečenje). Ako se radi o šupljem komadu ostatak suspenzije se izlijeva iz kalupa u suprotnom suspenzija se ne izlijeva ako se radi o punom komadu. [13] Na slici 18 dan je prikaz postupka lijevanja suspenzije.

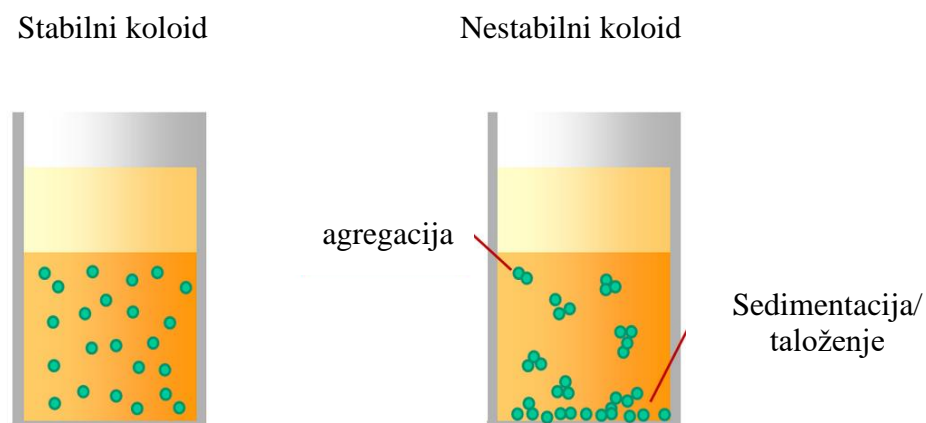


Slika 18. Postupak lijevanja suspenzije [19]

5.1.2. Stabilnost suspenzije

Sama izvedba postupka je vrlo jednostavna, no to se može zakomplicirati ako pripravljena suspenzija nema odgovarajuća svojstva odnosno nije stabilna. Keramička suspenzija priprema se na način da se odgovarajući keramički prah najčešće pomiješa sa destiliranom vodom i potrebnom količinom disperzanta koji omogućava stabilnost suspenzije. [8]

Koloidni sustav je višefazni sustav u kojem je jedna ili više faza dispergirana odnosno raspršena u drugoj s tim da su veličine čestica faza u rasponu reda veličine od nekoliko nanometra do nekoliko mikrometra. Što će reći da koloidni sustav sadrži velike molekule odnosno male čestice [8]. Slika 19 daje jasni prikaz koloidnog sustava.



Slika 19. Stabilni i nestabilni koloid [20]

Svojstva koloida određuju se prema interakcijama na površini čestice. Većom površinom čestica ostvaruje se veća interakcija među česticama. Keramička suspenzija je koloidni sustav s povećanom interakcijom čestica, a posljedica tome je povećanje viskoznosti. [8]

Pošto su čestice keramičkog praha gušće od vode doći će do sedimentacije pa se zbog toga dodaje određena količina disperzanta koji će omogućiti da te čestice praha u suspenziji budu jednoliko raspršene. Stabilna suspenzija je razlog postignute homogene mikrostrukture keramičke komponente. Što će reći da čim je veća disperznost odnosno raspršenost čestica to će biti bolja mikrostruktura, a time i svojstva proizvoda. Najbitniji čimbenici u postupku lijevanja suspenzije su sastav, gustoća, zeta potencijal i viskoznost. Potrebna svojstva dobivena su dodavanjem određene količine aditiva kao što su disperzanti, ojačala i ostala sredstva. [18]

5.1.3. Prednosti i nedostaci

Tablicom 2 navedene su prednosti i nedostaci postupka lijevanja suspenzije.

Tablica 2. Prednosti i nedostaci lijevanja suspenzije [4,18]

| Prednosti | Nedostaci |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">– jednostavnost– fleksibilnost– pouzdanost– ekonomičnost– ekološki prihvatljivo | <ul style="list-style-type: none">– komplicirana reologija mase– hrapave površine– ograničena tolerancija oblika |

Također, ovaj postupak se primjenjuje za proizvodnju monolitne i kompozitne keramike različitih veličina i složenosti oblika, a može se i automatizirati. [18] Na slijedećoj slici 20 prikazan je automatiziran postupak oblikovanja lijevanjem suspenzije u industriji.



Slika 20. Velikoserijska proizvodnja keramike lijevanjem suspenzije u kalupe [21]

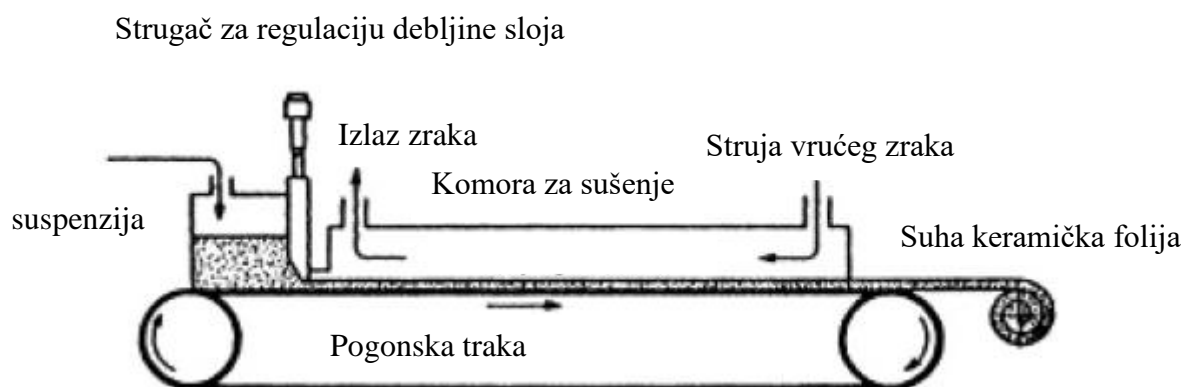
5.2. Lijevanje folije

5.2.1. Opis i primjena

Uz prethodni postupak lijevanja u industriji za proizvodnju keramike primjenjuje se postupak lijevanja folije. Na ovaj način proizvode se dijelovi u obliku ploča, folija ili traka veoma tankih debljina čije se debljine kreću od 5 μm mikrometara do nekoliko milimetra. Metoda je relativno mlada te se danas ovom metodom proizvode keramički dijelovi kao što su keramičke podloge u elektroničkim primjenama, piezo aktuatori, mikro filteri, komponente za pojedine vrste gorivih ćelija i mnoge druge. Također, kao u prethodnom postupku prije početka procesa oblikovanja potrebno je pripremiti keramičku stabilnu suspenziju odgovarajućih svojstava. Suspenzija mora biti stabilna i odgovarajuće viskoznosti kako bi konačan proizvod imao homogenu odnosno ujednačenu mikrostrukturu te odgovarajući oblik i debljinu sloja. [22]

5.2.2. Proces oblikovanja

Oblikovanje keramike lijevanjem folija sastoji se od vrlo jednostavnih faza procesa kao što je prikazano na slijedećoj slici 21.



Slika 21. Skica postupka oblikovanja lijevanja folije [23]

Pripremljena suspenzija se ulijeva u spremnik iz kojeg se zatim suspenzija izliva na pokretnu traku, a debljinu nanošenog sloja regulira strugač, koji postavljen na odgovarajuću visinu, sprječava prolazak viška suspenzije na traku. Pokretna traka gonjena je optimalnom konstantnom brzinom, a najčešće je izrađena od čelika, ali i polimera što je čini fleksibilnom.

Nakon lijevanja keramičke folije provodi se sušenje kako bi se vezivo i ostala dodatna sredstva uklonila te folija mogla podvrgnuti sinteriranju. Ako se radi o većoj debljini folije postupak sušenja je duži, a brzina pogonske trake se mora tome prilagoditi. Nakon procesa sušenja dobivena je fleksibilna keramička folija koja se može dalje obrađivati rezanjem, bušenjem ili savijati u svitke. [22]

Kao pripravljena masa koriste se dvije vrste suspenzije [22]:

- Suspenzije s organskim otapalom
- Vodene suspenzije

Kako bi se postigla maksimalna gustoća i što bolja stabilnost često se koriste suspenzije s organskim otapalom uz koju dolaze brojne kombinacije s određenim aditivima. Premda se ovakvom suspenzijom postižu bolja svojstva, pri rukovanju s ovakvom masom potrebno je poduzeti propisane mjere zbog opasnosti od toksičnosti, eksplozije i zagađenja okoliša što dovodi do visokih cijena. [22]

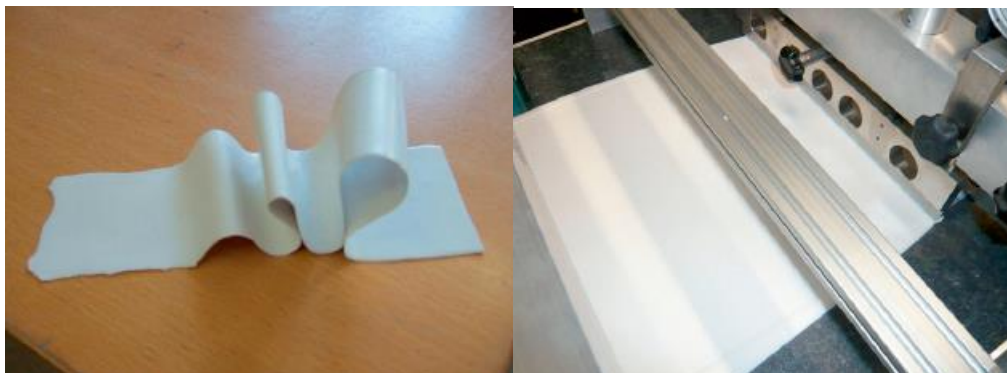
S druge strane, vodene suspenzije nude manju mogućnost odabira i kombinacija aditiva, ali su ekološki prihvatljive, no isto tako vodene suspenzije se teže suše i postižu slabija svojstva od suspenzija s organskim otapalima. Rjeđe se koriste za proizvodnju keramike, ali su i dalje u fazi istraživanja kako bi se otklonili nedostaci. [22]

Na sljedećoj slici 22 prikazan je uređaj za lijevanje folije.



Slika 22. Uređaj za lijevanje keramičke folije [22]

Slikom 23 prikazan je konačni produkt oblikovanja ovim postupkom lijevanja.



Slika 23. a) Keramička folija dobivena lijevanjem i b) oblikovanje keramičke folije [22]

5.2.3. Prednosti i nedostaci

Tablicom 3 dani su prednosti i nedostaci lijevanja folije.

Tablica 3. Prednosti i nedostaci lijevanja folije [4,22].

| Prednosti | Nedostaci |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> – Kontinuirana proizvodnja – Tanki slojevi – Dobra dimenzijska stabilnost – Velik proizvodni kapacitet | <ul style="list-style-type: none"> – Ograničena geometrija dijelova – Visoki investicijski troškovi – Nužno je i otežano sušenje ako se radi o organskim aditivima |

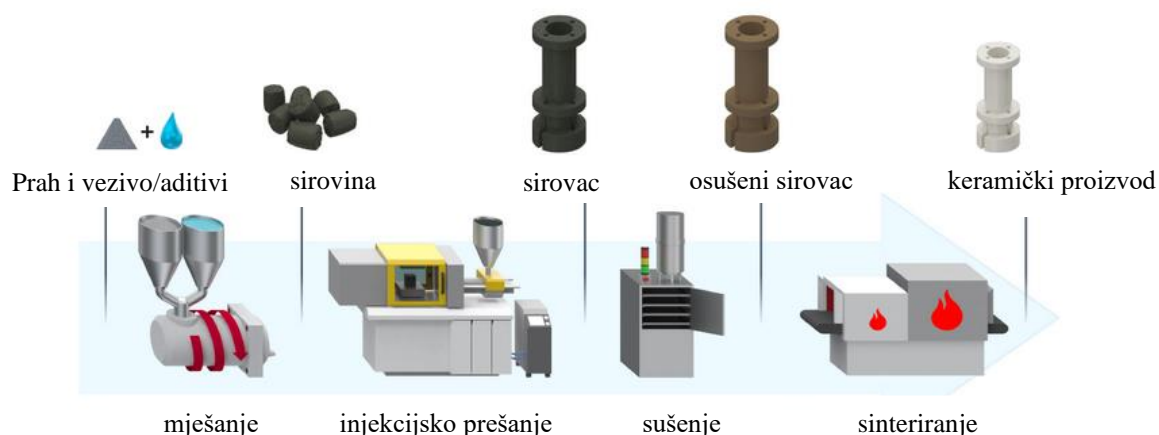
6. PLASTIČNO OBLIKOVANJE

Plastično oblikovanje (kao što u samom izrazu stoji „*plastično*“) predstavlja metode oblikovanja koje se prvobitno koriste za proizvodnju i oblikovanje plastike odnosno termoplastičnih polimera. No ova se metoda oblikovanja razvojem tehnologije prerade praha počela koristiti za oblikovanje metala i keramike. Kod postupka prešanjem su bile potrebne pripreme mase u obliku granulata s najmanjim udjelom vlage, a kod postupaka lijevanja suspenzije dok će kod plastičnog oblikovanja biti potrebno pripremiti keramička „*tijesta*“ odnosno masu koja se može deformirati, a zatim transformirati u željene oblike. Za postizanje takve mase potreban je određeni udio vlage, a udio vlage za pripremu takve mase se kreće od 15 do 25 % ovisno o metodi, obliku proizvoda i materijalu. Dvije najčešće i najzastupljenije metode plastičnog oblikovanja koje se koriste u proizvodnji tehničke keramike su injekcijsko prešanje/injekcijsko lijevanje i ekstrudiranje. [4,13]

6.1. Injekcijsko prešanje

6.1.1. Opis procesa

Injekcijsko prešanje je jedna od metoda oblikovanja u procesu proizvodnje koja se široko koristi u proizvodnji termoplastičnih polimera. Termoplastični materijal odnosno polimeri imaju takva svojstva da pri povišenim temperaturama mekšaju u plastičnu tečnu masu, a hlađenjem do temperatura nešto većih od sobne stvrdnjavaju. S obzirom na sve veću primjenu keramičkih materijala kako u automobilnoj tako i drugim industrijama rasli su i zahtjevi za proizvodnju keramičkih komponenti od jednostavnijih do kompliciranijih te komponenata veoma složenih geometrija. Stoga je razvijena proizvodnja keramičkih dijelova postupkom injekcijskog prešanja koja je povoljna za proizvodnju komponenti vrlo složenih oblika, ali je ograničena veličinom takvih dijelova. [24] Proces proizvodnje keramičkih komponenti ovim načinom oblikovanja uključuje slijedeće faze prikazane na slici 24.



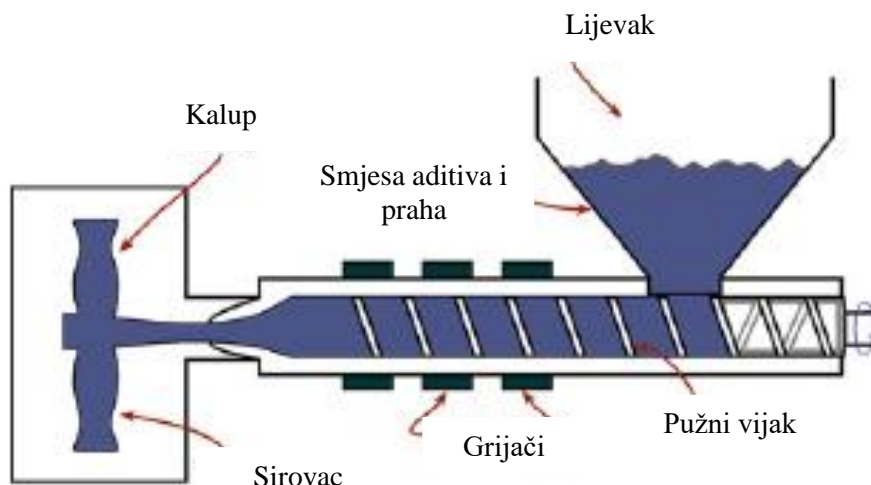
Slika 24. Faze procesa oblikovanja i proizvodnje injekcijskim prešanjem [25]

Što se tiče mase koja se oblikuje u kalup ona mora sadržavati odgovarajuća reološka svojstva koja se postižu miješanjem keramičkog praha s odgovarajućom količinom veziva i aditiva. Veziva su organskog podrijetla odnosno termoplastični polimeri koji omogućuju tečenje mase, a aditivi omogućuju stabilizaciju i potrebna svojstva. [13,24] U tablici 4 dan je popis aditiva koji se koriste u procesu injekcijskog prešanja.

Tablica 4. Aditivi koji se dodaju u masu za injekcijsko prešanje [13]

| Funkcija | Primjeri | Količina (maseni udio) | Temperatura isparivanja (°C) |
|--|--|------------------------|------------------------------|
| Termoplastični materijali | <ul style="list-style-type: none"> – Etil celuloza – Polietilen – Polietilen glikol | 9 – 17% | 200 – 400 |
| Vosak ili ulja s visokom temperaturom isparavanja | <ul style="list-style-type: none"> – Parafin – Mineralna ulja – Ulje povrća | 2 – 3,5% | 150 – 190 |
| Ugljikovodici ili ulja s niskom temperaturom isparavanja | <ul style="list-style-type: none"> – Životinjska ulja – Ulja povrća – Mineralna ulja | 4,5 – 8,5% | 50 – 150 |
| Lubrikanti | <ul style="list-style-type: none"> – Masne kiseline – Masni alkoholi – Masni esteri | 1 – 3 % | |
| Termoaktivni materijali | <ul style="list-style-type: none"> – Epoksilna smola – Fenol-formaldehidi – polifenilen | | 450 - 1000 |

Sam postupak injektiranja odnosno ubrizgavanja keramičke smjese u kalup pospješuje se uz djelovanje povišene temperature (koja dodatno pruža bolje tečenje mase) i djelovanje tlaka kako bi se što bolje popunila kalupna šupljina. [13,24] Na slici 25 prikazan je postupak injekcijskog prešanja keramičke komponente u kalup.



Slika 25. Skica postupka injekcijskog prešanja [13]

Kao što je prikazano na slici pripravljena masa se ubacuje u stroj koji pomoću pužnog vijka te okolnih grijača omogućuje da se postignu potrebni uvjeti tlaka i temperature kako bi se materijal mogao ubrizgati u kalup. Povećanje tlaka se dodatno manifestira na kraju pužnog vijka suženjem odnosno pomoću mlaznice pri ulazu mase u kalup. Nakon što je ubrizgani materijal ispunio kalupnu šupljinu ondje se hladi te nakon hlađenja se kalup otvara, a novonastali sirovac ide na daljnju obradu sušenja odnosno uklanjanja veziva i aditiva te završnog sinteriranja. [13,24] Upravo zbog velikog udjela veziva i aditiva postupak sušenja je prilično otežan i provodi se na dva načina [24]:

- Uklanjanje veziva otapalom – vezivo se uklanja uranjanjem u određeno otapalo ili vodi
- Uklanjanje veziva pri povišenoj temperaturi – primjenjuje se temperatura isparavanja veziva

Zbog velikog udjela organskog veziva doći će do velikog skupljanja odljevka pa se vrši kontrola dimenzija. Skupljanje obično iznosi od 15% do 20%. [24]

Ovim postupkom dobivena je izrazito kvalitetna površina obratka pa nisu potrebne dodatne obrade kao što su tokarenje i slično. [24] Na slici 26 dan je prikaz uređaj s ugrađenim kalupom za injekcijsko prešanje.



Slika 26. Sklop jedinica za injekcijsko prešanje [26]

6.1.2. Primjene, prednosti i nedostaci

Postupkom injekcijskog prešanja keramike proizvodi se veliki dio dijelova u autoindustriji, piezokeramika, lopatice rotora parne turbine i mnogi drugi. Također, vrijeme trajanja jednog ciklusa odnosno vrijeme obrade jednog komada je najčešće od 10 do 60 sekundi ovisno o obliku i veličini proizvoda. Stoga ova metoda omogućuje velikoserijske proizvodnje i ekonomičnost procesa, ali s druge strane cijena opreme je izuzetno skupa te otežano sušenje komponenti dodatno povećava cijenu proizvodnje. [13] U tablici 5 dane su prednosti i nedostaci postupka injekcijskog prešanja.

Tablica 5. Prednosti i nedostaci injekcijskog prešanja [4,13,24]

| Prednosti | Nedostaci |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> – kompleksne geometrije – uske tolerancije – dobra ponovljivost – velik broj komada – vrlo dobra kvaliteta površine – oštre konture | <ul style="list-style-type: none"> – visoki troškovi alata – veliko trošenje alata – ograničena veličina obradka – otežano i skupo uklanjanje veziva |

6.2. Ekstrudiranje

6.2.1. Opis procesa

Kao što je već spomenuto postupak oblikovanja ekstrudiranjem također se široko primjenjuje i prvobitno je korišten za proizvodnju polimera odnosno polimernih proizvoda, ali preradom praha koristi se za proizvodnju kako tradicionalne tako i tehničke keramike. [27]

Ovim postupkom se proizvode komponente ujednačenog presjeka i velikog omjera dužine i promjera te simetrični i jednostavniji oblici proizvoda kao što su osovine, cijevi, razni profili, ali i sačastih i ćelijastih oblika. [13]

Postoji nekoliko zahtjeva na svojstva keramičke mase za ekstrudiranje. S jedne strane, materijal mora biti dovoljno plastičan odnosno mora imati odgovarajuće tečenje kako bi se mogao oblikovati u željeni oblik primjenom pritiska, a s druge strane materijal mora biti dovoljno čvrst kako bi se mogao oduprijeti deformaciji zbog vlastite težine prilikom procesa. Ovakva svojstva se postižu pravilnom odabiru keramičkog praha te odgovarajućeg veziva i ostalih aditiva, ali i kvalitetnim miješanjem pripremljene mase. [27]

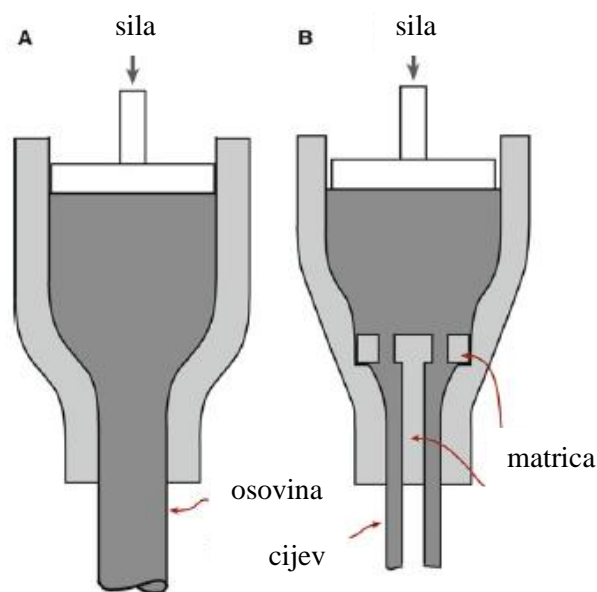
Također i u ovom postupku za pripremu mase koriste se polimerna veziva, ali može i voda ovisno o odabranom keramičkom prahu. Postupak proizvodnje keramičkih dijelova, koji

uključuje oblikovanje ekstrudiranjem odnosno istiskivanjem, sastoji se od faza: odabir praha i mješanje praha sa odgovarajućim količinama veziva, disperzanata, plastifikatora i drugih aditiva, istiskivanje u željeni oblik, sušenje i sinteriranje. Uređaj za istiskivanje odnosno ekstruder ujedno sadrži i spremnik odnosno cilindar u kojem se vrši miješanje mase, a može biti konstruiran na dva načina [27]:

- Ekstruder sa klipnim mehanizmom
- Ekstruder sa pužnim vijkom

6.2.2. Ekstruder s klipnim mehanizmom

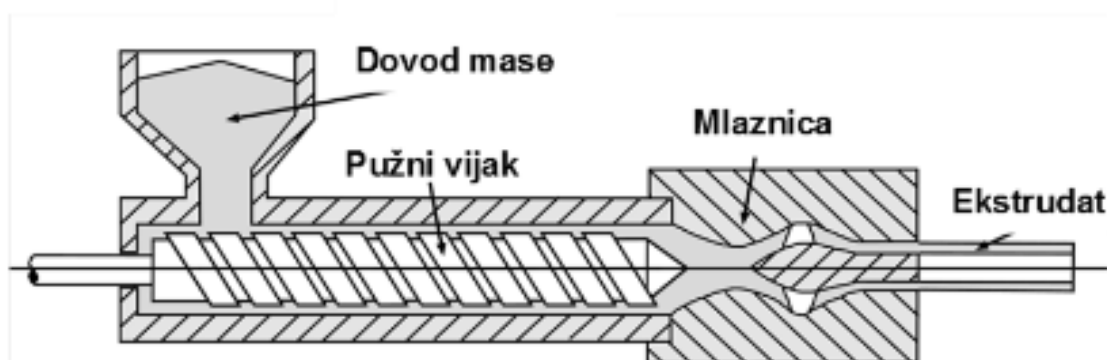
Ekstruder sa klipnim mehanizmom je vrlo jednostavne izvedbe. Sastoji se od komorne cijevi, klipa i matrice. Matrica je završni dio koji na izlazu cijevi ekstrudera daje oblik poprečnog presjeka istisnutoj masi. Klipnim mehanizmom smanjena je količina kontakta između keramičke smjese i ekstrudera što rezultira dužem vijeku trajanja i manjoj količini trošenja, a kako bi se smanjilo trenje dodaju se lubrikanti. No s druge strane, ovakva izvedba otežava kontinuirani proces jer se ekstruder ne puni dok se ne istisne određena količina smjese. Tek kada se klip vrati u svoj početni položaj vrši se punjenje mase do potrebne količine. Na slici 27 dan je prikaz ekstrudera s klipnim mehanizmom. [27]



Slika 27. Izvedba ekstrudera s klipom pri izradi osovine i cijevi [13]

6.2.3. Ekstruder s pužnim vijkom

Za razliku od klipnog mehanizma ekstruder izveden sa pužnim vijkom pruža kontinuirani proces istiskivanja i dodavanja mase bez prekida. No ovakva izvedba je prilično složenija i skuplja. Zbog svoje izvedbe pužni vijak sklon je trošenju kako je povećana dodirna površina između smjese i ekstrudera. Kako uslijed trošenja dolazi do odvajanja čestica može doći i do greške u materijalu proizvoda. Na sljedećoj slici 28 dan je prikaz ekstrudera sa pužnim vijkom. [27]



Slika 28. Izvedba ekstrudera s pužnim vijkom [4]

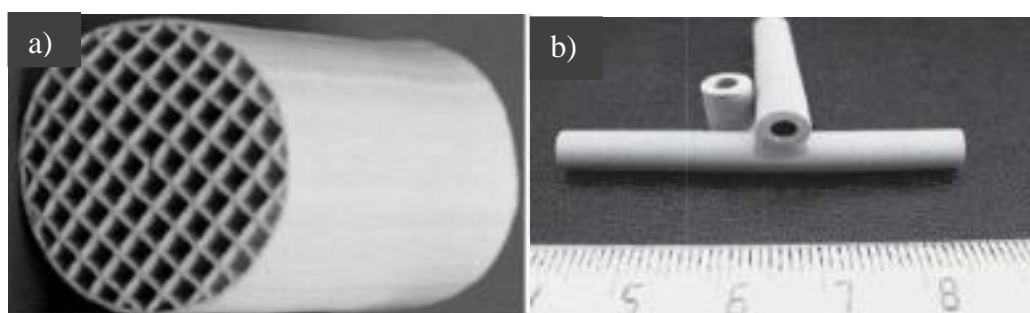
6.2.4. Prednosti i nedostaci, primjena

Ovom metodom se najčešće proizvode komponente sačastog oblika iz keramičkih prahova kordijerta ili silicijeva karbida. Takvi keramički dijelovi se najviše primjenjuju kao katalitički pretvarači i filteri u motorima gdje je niska kontrola povratnog tlaka. Pužni ekstruderi rutinski se koriste u industriji teške gline, vatrostalnih materijala i bijele tehnike. Osim toga, koriste se u primjenama tehničke keramike kao što su kondenzatori i cijevi s termoelementom. [27] Tablica 6 prikazuje primjere komponenti oblikovanih ekstrudiranjem od pojedinih keramičkih materijala.

Tablica 6. Primjeri proizvoda dobivenih ekstrudiranjem [27]

| Tip proizvoda | Keramički materijal |
|-----------------------------|---|
| Cijevi i peći | Aluminijev oksid, mulit, silicijev karbid, cirkonij |
| Izolatori | Aluminijev oksid, steatit |
| Cijevasti kondenzatori | Barijev titanat |
| Nosači katalizatora | Kordijert, aluminijev oksid, silicij, aluminosilikati |
| Otporni grijači | Barijev titanat |
| Vatrostalni proizvodi | Glina, aluminijev oksid, mulit |
| Elektroničke ploče | Aluminijev oksid, kordijert, staklo |
| Cijevi izmjenjivača topline | Silicijev karbid, mulit |

Isto tako proizvode se i jednostavniji oblici kao što su šuplje osovine. Slika 29 prikazuje primjere ekstrudiranih komponenti.



Slika 29. a) Oblikovana sačasta komponenta i b) oblikovani cilindrični dijelovi [28]

U tablici 6 dan je prikaz prednosti i nedostataka postupka.

Tablica 7. Prednosti i nedostaci ekstrudiranja [4]

| Prednosti | Nedostaci |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">– Kontinuirana proizvodnja– Velik proizvodni kapacitet– Dijelovi velikih duljina– Jeftina proizvodnja | <ul style="list-style-type: none">– Izražene teksture– Nužno sušenje |

Na slici 30 prikazan je ekstruder sa svim potrebnim sklopnim jedinicama za proizvodnju.



Slika 30. Ekstruder sa sklopnim jedinicama za proizvodnju [29]

6. ZAKLJUČAK

Keramika kao tehnički materijal danas ima sve veću primjenu upravo zbog njezinih odličnih svojstava koja im omogućuju izdržljivost u uvjetima u kojim drugi materijali ne mogu izdržati. Kako se povećao interes za keramičke materijale odnosno proizvode tehničke keramike tako su se razvijali i postupci oblikovanja takvih proizvoda.

Istovremeno tehnologija prerade praha je znatno napredovala, a upravo preradom keramičkog praha, pomoću ovih metoda, se omogućuje njihovo oblikovanje u polugotove proizvode odnosno sirovce. Sve metode opisane i navedene u ovom radu imaju širok raspon primjene u industriji proizvodnje keramičkih komponenata koje se koriste u kućanstvu, za sanitarne potrebe pa sve do primjena u strojarstvu i ostalim granama tehnike.

Odabir bilo koje od metoda ovisi o nekoliko čimbenika kao što su vrsta materijala, složenost oblika i veličina proizvoda te zahtjevi na kvalitetu kao i ekonomski kriterij.

Može se reći da se ovim metodama oblikovanja znatno ubrzao i poboljšao proces proizvodnje keramike. Međutim, svaka od ovih metoda sa sobom povlači prednosti i nedostatke. Također, viša cijena postupka diktira kvalitetu proizvoda što opet ovisi o zahtjevu na svojstva proizvoda. Kako se keramika kao prikladan i pogodan materijal i dalje razvija tako se razvijaju i druge metode oblikovanja keramike, a neke od njih već imaju mjesto u proizvodnji tehničke keramike.

LITERATURA

- [1] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=31230>; preuzeto 12.9.2021.
- [2] https://www.worldhistory.org/Greek_Pottery/; preuzeto 12.9.2021.
- [3] <https://whytile.com/tile-history/ceramic-tile-origins/>; preuzeto 12.9.2021.
- [4] Prof. dr. sc. L. Čurković, Kolegij: keramika, beton i drvo, Podloge za predavanje iz predmeta 1. i 2. dio, Katedra za materijale, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [5] <https://auto-silvio.hr/odrzavanje-vozila/kontrola/denso-svjecice>; preuzeto 12.9.2021.
- [6] <https://dental-art.hr/savjeti/koliko-traju-implantati/>; preuzeto 12.9.2021.
- [7] <https://precision-ceramics.com/about-technical-ceramics/>; preuzeto 12.9.2021.
- [8] R. Moreno, Colloidal processing of ceramics and composites, *Advances in Applied Ceramics*, vol. 111, no. 5-6, pp. 246 – 253, 2012.
- [9] <https://tehnika.lzmk.hr/keramika/>; preuzeto 12.9.2021.
- [10] <http://194.245.150.115/ceramic-materials/>; preuzeto 12.9.2021.
- [11] <http://hr.byabrasivesru.com/abrasives/white-fused-alumina/high-quality-aluminum-oxide-powder.html>; preuzeto 12.9.2021.
- [12] K. Uematsu, Processing defects in ceramic powders and powder compacts, *Advanced Powder Technology*, vol. 25, pp. 154 – 162, 2014.
- [13] C.B. Carter and M.G. Norton, Shaping and forming, *Ceramic Materials: Science and Engineering*, pp. 423 – 437, 2012.
- [14] http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring17/atmo336s2/lectures/sec1/Fluid_Pressure_atmo170.html; preuzeto 12.9.2021.
- [15] <https://www.made-in-china.com/showroom/highindustry/product-detailkNTmKQMchlWi/China-Cold-Isostatic-Pressing-Mold-CIP-Bags-Mould-Cold-Isostatic-Pressing-Bags-CIP-Mould.html>; preuzeto 12.9.2021.
- [16] <https://www.exportersindia.com/product-detail/cold-isostatic-press-3487421.htm>; preuzeto 12.9.2021.
- [17] R. Arias, Hot isostatic pressing services, 2020., <https://www.eicf.org/wp-content/uploads/2020/01/ITS-Press-Release.pdf>; preuzeto 12.9.2021.
- [18] Prof. dr. sc. L. Čurković, Kolegij: keramika, beton i drvo, Podloge za vježbe, Katedra za materijale, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2021.
- [19] <https://www.syalons.com/2018/09/06/slip-casting-sialons/>; preuzeto 12.9.2021.
- [20] <https://en.wikipedia.org/wiki/Colloid#/media/File:ColloidalStability.png>; preuzeto 12.9.2021.

- [21] <https://www.designboom.com/design/laufen-factory-visit-ceramic-casting/>; preuzeto 12.9.2021.
- [22] A. Kaiser, R. van Loo, J. Kraus, A. Hajduk, Comparison of Different Shaping Technologies for Advanced Ceramics Production, *Process Engineering*, vol. 86, no. 4, pp. 41 – 48, 2009.
- [23] F. Bensebaa, *Nanoparticle Technologies, Interface Science and Technology*, vol. 19, pp. 232, 2013.
- [24] Z. Stanimirović, I. Stanimirović, *Ceramic Injection Molding, Some Critical Issues for Injection Molding*, pp. 131 – 148, 2012.
- [25] <http://polymertek.com/inject/ceramic-mim/process/>; preuzeto 12.9.2021.
- [26] <https://www.topunite-injection.com/en/category/Dual-Color-Servo-Energy-Saving-Injection-Molding-Machine/Dual-Color-Servo-Energy-Saving-Injection-Molding-Machine.html>; preuzeto 12.9.2021.
- [27] R. A. Terpstra, P. P. A. C. Pex, A. H. de Vries, *Plastic forming of ceramics: extrusion and injection moulding*, *Ceramic Processing*, Springer-Science+Business Media, B. V., pp. 174 – 211, 1995.
- [28] F. Akhtar, L. Andersson, S. Ogunwumi, N. Hedin i L. Bergstrom, Structuring adsorbents and catalysts by processing of porous powders, *Journal of the European Ceramic Society*, pp. 1643-1666, 2014.
- [29] <https://www.ceramicmachinerymagazine.com/2019/03/20/the-success-of-the-verdes-magna-series-of-extruders/>; preuzeto 12.9.2021.