

# Injekcijsko prešanje metala u obliku praha

---

**Kraljević, Danijel**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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:235:090132>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial 4.0 International](#)/[Imenovanje-Nekomercijalno 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-02**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Danijel Kraljević**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Damir Godec, dipl. ing.

Student:

Danijel Kraljević

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Damiru Godecu na povjerenju i pomoći u pisanju završnog rada. Također se zahvaljujem roditeljima na pruženoj potpori, razumijevanju i pomoći tijekom studiranja.

Danijel Kraljević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala, autonomni sustavi i računalna inteligencija i mehatronika i robotika

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1                                 |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -                                    |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Danijel Kraljević** JMBAG: **0035211079**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Injekcijsko prešanje metala u obliku praha**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Metal powder injection moulding**

Opis zadatka:

Injekcijsko prešanje metala (eng. *Metal Injection Moulding* – MIM) je postupak prerade polimerno-metalnih kompozita injekcijskim prešanjem koji objedinjuje slobodu oblikovanja karakterističnu za injekcijsko prešanje polimera i svojstva gotovih otpresaka sa značajkama metalnog proizvoda. Pri tome je potrebno voditi računa o specifičnostima MIM postupka koji se sastoji od tri temeljne faze: injekcijskog prešanja, uklanjanja polimernog veziva i srašćivanja metalnih čestica u gotov proizvod.

U okviru završnog rada, potrebno je:

- načiniti pregled najvažnijih područja primjene MIM proizvoda
- detaljno opisati sve faze proizvodnje MIM postupkom
- osvrnuti se na osnovna pravila konstruiranja proizvoda namijenjenih MIM postupku
- u praktičnom dijelu rada potrebno je na jednom konkretnom primjeru primijeniti pravila konstruiranja za razvoj otpreska namijenjenog MIM postupku proizvodnje.

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

Zadatak zadan:

20.4.2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Godec

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 12. 7. 2023.  
3. rok: 21. i 22.9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

## SADRŽAJ

|   |     |
|---|-----|
| SADRŽAJ .....   | I   |
| POPIS SLIKA .....                                       | III |
| POPIS TABLICA.....                                      | IV  |
| POPIS OZNAKA I KRATICA .....                            | V   |
| SAŽETAK.....  | VI  |
| SUMMARY .....   | VII |
| 1. UVOD.....  | 1   |
| 2. OSNOVNE INJEKCIJSKOG PREŠANJA METALA.....            | 2   |
| 2.1 Povijest injekcijskog prešanja.....                 | 2   |
| 2.2 Sustav za injekcijsko prešanje.....                 | 2   |
| 2.3 Proizvodnja metalnog praha.....                     | 5   |
| 2.4 Priprema smjese.....                                | 7   |
| 2.5 Oblikovanje praha.....                              | 8   |
| 3. KORACI U POSTUPKU INJEKCIJSKOG PREŠANJA METALA.....  | 10  |
| 3.1 Miješanje.....                                      | 10  |
| 3.2 Injekcijsko prešanje.....                           | 10  |
| 3.3 Uklanjanje veziva.....                              | 11  |
| 3.4 Sinteriranje .....                                  | 12  |
| 3.5 Materijali u proizvodnji MIM.....                   | 13  |
| 4. PRIMJENA PROIZVODA INJEKCIJSKOG PREŠANJA METALA..... | 15  |
| 5. KONSTRUIRANJE PROIZVODA ZA POSTUPAK MIM-a.....       | 18  |
| 5.1 Debljina stijenke.....                              | 18  |
| 5.2 Rubovi, uvrta i provrta.....                        | 19  |
| 5.3 Linija sljubljanja.....                             | 19  |
| 5.4 Ušće kalupa.....                                    | 20  |
| 5.5 Navoji.....   | 20  |
| 5.6 Tolerancije i hrapavost.....                        | 21  |

---

|  |    |
|--|----|
| 6. OBLIKOVANJE VODILICE KROVNOG PROZORA..... | 22 |
| 7. ZAKLJUČAK.....                            | 27 |
| LITERATURA.....                              | 28 |
| PRILOZI.....                                 | 29 |

**POPIS SLIKA**

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Sustav za injekcijsko prešanje .....   | 3  |
| Slika 2.  | Postupak injekcijskog prešanja metala.....   | 4  |
| Slika 3.  | Plinska atomizacija praha.....   | 6  |
| Slika 4.  | Vodena atomizacija .....   | 7  |
| Slika 5.  | Različiti tipovi mljevenja:a)mljevenje valjanjem, b)kuglično mljevenje, c)udarno mljevenje ..... | 8  |
| Slika 6.  | Primjer jednoosnog kompaktiranja i mikrostrukture prije i poslije istog.....                     | 9  |
| Slika 7.  | Primjer stroja za miješanje praha i veziva.....  | 10 |
| Slika 8.  | Primjer brizgalice za injekcijsko prešanje metala .....  | 11 |
| Slika 9.  | Primjer komore za odvajanje veziva u zaštićenoj atmosferi .....                                  | 12 |
| Slika 10. | Faze sinteriranja u čvrstom stanju .....   | 13 |
| Slika 11. | Područja primjene MIM proizvoda .....  | 16 |
| Slika 12. | Kučište ventila (lijevo) i vodilice ventila (desno) .....  | 17 |
| Slika 13. | Primjer korištenja umetaka i izbjegavanje oštih rubova .....                                     | 18 |
| Slika 14. | Primjer korištenja umetaka za ostvarivanje uvrta i provrta.....                                  | 19 |
| Slika 15. | Prikaz linije sljublivanja.....  | 20 |
| Slika 16. | Prikaz loše i dobre pozicije ušća .....  | 20 |
| Slika 17. | Primjer navoja u kalupu koji se razdvaja .....   | 21 |
| Slika 18. | Vodilica krovnog prozora.....  | 22 |
| Slika 19. | Vodilica krovnog prozora konstruirana u CAD programu (prednji pogled).....                       | 23 |
| Slika 20. | Vodilica krovnog prozora konstruirana u CAD programu (stražnji pogled) .....                     | 23 |
| Slika 21. | Nacrt vodilice s pozicijom umetaka i kritičnim mjestom.....                                      | 24 |
| Slika 22. | Linija pozicija ušća, linija tokova sirovine i linija dodira tokova sirovine .....               | 24 |
| Slika 23. | Prikaz detalja vodilice krovnog prozora.....   | 25 |
| Slika 24. | Slika vodilice s puknućem na kritičnom mjestu.....   | 25 |



## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Usporedba preciznog lijeva i injekcijskog prešanja metala ..... 5

## POPIS OZNAKA I KRATICA

| <b>Kratica</b> | <b>Opis</b>   |
|----------------|---|
| MIM            | Injekcijsko prešanje metala ( <i>metal injection moulding</i> ) |

## **SAŽETAK**

Injekcijsko prešanje metala je u prošlom desetljeću postao kompetitivna tehnologija za izradu relativno malih i složenih komponenti i sklopova, koje je skupo proizvesti alternativnim postupcima.

Tehnologija injekcijskog prešanja metala u mogućnosti je proizvesti veliki volumen komponenti kompleksnog oblika u jako velikom rasponu materijala od raznih metala, keramika, intermetalnih spojeva i kompozita.

Ove značajke tehnologije vrlo su zanimljive inženjerima automobilske, zrakoplovne, dentalne i medicinske industrije gdje se relativno maleni strojni dijelovi koriste u velikom postotku.

U radu će se opisati najvažnije grane područja primjene proizvoda injekcijskog prešanja metala, detaljno opisati sve faze proizvodnje, osvrnuti na osnovna pravila konstruiranja proizvoda namijenjenih postupkom injekcijskog prešanja metala. Na posljjetku će se na praktičnom primjeru primijeniti pravila konstruiranja za razvoj otpreska namijenjenog postupku proizvodnje injekcijskog prešanja metala.

Ključne riječi: injekcijsko prešanje metala, metalurgija praha, sinteriranje

## **SUMMARY**

Metal injection moulding (MIM) as a technology is becoming one of the primary competitive means of production of relatively small, complex shaped components and assemblies which are expensive to produce using alternative methods.

MIM technology is capable of producing medium to large volume of components of complex shape in various types of materials such as metals, ceramics, intermetallic compounds and composites.

These characteristics are very important in industries which use a large percentage of small complex components such as automobile industry, aerospace industry and dental and medicine industry.

This study will overview major areas of use of MIM technology, analyze all major phases of MIM technology of production and will go over some basic rules to consider when designing for MIM. Lastly, on a practical example methods of designing will be used for development of a moulded parts used in MIM production.

Key words: metal injection moulding, powder metallurgy, sintering

## 1. UVOD

Konstantno potraživanje za novim, boljim rješenjima, tehnologijama i materijalima optimiranje između cijene, kvalitete, vremena izrade te iskoristivosti nameću se kao glavni faktori u proizvodnji.

Kod optimiranja proizvodnje vrlo je važno imati razumijevanje svih fizikalnih i mehaničkih procesa, te ograničenja i velika znanja u području su potrebna. Glavi nedostatak konvencionalnih tehnologija obrade metala jest veliki postotak otpadnog materijala.

Odgovor na taj problem ima relativno nova tehnologija „konačnog oblika“ u kojem je proizvod zadovoljavajućih svojstava s minimalnim otpadnim škartom. Tehnologija injekcijskog prešanja metala bazira se na istim principima injekcijsko prešanja polimera gdje se usitnjena sirovina ubrizgava u kalup pod tlakom i povišenoj temperaturi te oblikuje u zadani oblik.

Za injekcijsko prešanje metala često se koristi engleska skraćenica MIM (*metal injection moulding*).

## 2. OSNOVE INJEKCIJSKOG PREŠANJA METALA

Prema definiciji, injekcijsko prešanje je ciklički postupak praoblikovanja ubrizgavanjem tvari potrebne smične viskoznosti iz jedinice za pripremu i ubrizgavanje u temperiranu kalupnu šupljinu. Tvorevina, otpresak, postaje polireakcijom i/ili umrežavanjem, geliranjem i/ili hlađenjem podobnom za vađenje iz kalupne šupljine. Otpresci mogu biti različitih veličina, mase manje od miligrama pa sve do približno 180 kg. Prema prerađenim količinama injekcijsko prešanje je odmah iza ekstrudiranja. Injekcijskim prešanjem se prerađuju svi polimeri, a danas se mogu prerađivati keramičke smjese, metalni prahovi, kompoziti raznih vrsta, pa i žive stanice. Do sada je zabilježeno najmanje 240 inačica injekcijskog prešanja.[1]

### 2.1 Povijest injekcijskog prešanja

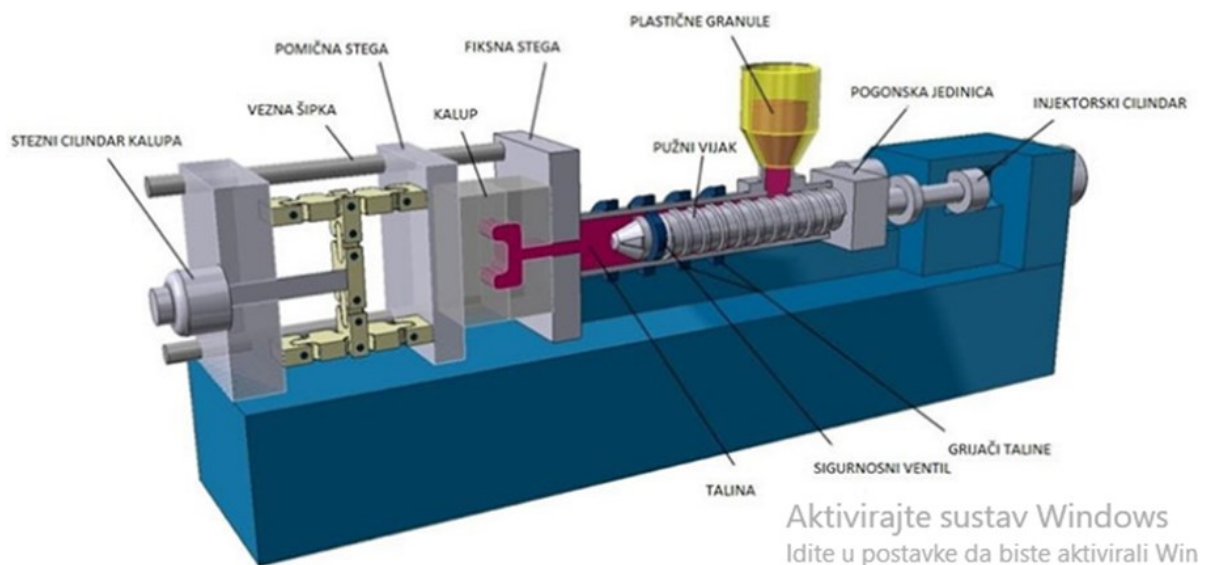
Prvi dokumentirani postupci tlačnog lijevanja javljaju se sredinom 19. stoljeća, ubrizgavanjem obojenih i lakih metala u kalupnu šupljinu. Prvi patenti u tom području su preradba plastomernih taljevina 1843. godine H. Becka, ubrizgavalica sa pužnim vijkom za preradbu kaučukovih smjesa Francuza R. Quiellery 1938.godine. Godine 1919. Nijemac Eichengrun patentirao je prvu klipnu ubrizgavalicu za preradbu polimerne taljevine, celuloznog acetata i time stvorio temelje suvremene proizvodnje injekcijskim prešanjem.

Bitna promjena u gradnji strojeva za injekcijsko prešanje dolazi 1956. godine kada njemačka tvrtka Ankerwek (danas Demag) pokreće proizvodnju prve komercijalne ubrizgavalice s jednim pužnim vijkom. Takvo načelo rada se zadržalo i do danas. Prve primjene injekcijskog prešanja sa metalnom smjesom javljaju se u 1970.-ima za proizvodnju sirovca. [1]

### 2.2 Sustav za injekcijsko prešanje

Osnovni elementi sustava za injekcijsko prešanje su: ubrizgavalica, temperiralo i kalup. Sustav za klasično injekcijsko prešanje prikazan je na slici 1 . Preradba plastike i gume jedna je od najbrže rastućih industrijskih grana u svijetu, a unutar nje injekcijskim prešanjem prerađuje se oko 40 % svih plastomera i duomera. Injekcijsko prešanje karakteriziraju masovna proizvodnja velikog broja proizvoda, uz visoku ponovljivost i vrlo malo ili bez završnih operacija. Razvoj opreme injekcijskog prešanja radi potreba i zahtjeva proizvođača bazira se na razvoju novih vrsta pogona, upotrebi računala i novih računalnih programa, upotrebi robota i dr. Novi sustavi

injekcijskog prešanja su pouzdaniji, troše znatno manje energije, postižu višu proizvodnost i povisuju ujednačenu kvalitetu proizvoda. [1]



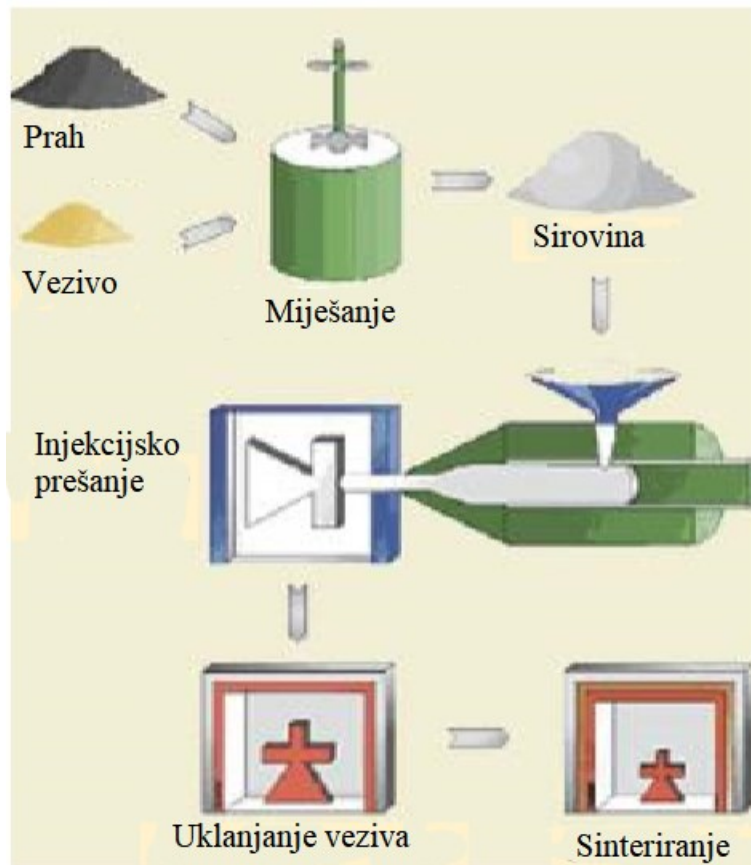
Slika 1. Sustav za injekcijsko prešanje [2]

Injekcijsko prešanje metala je tehnologija oblikovanja koja sjedinjuje strukturne prednosti metalnih materijala sa složenošću oblika koje se postiže injekcijskim prešanjem polimera.

Od klasične metalurgije praha preuzeta je mogućnost višestrukog legiranja miješanjem i prešanjem najrazličitijih prahova kao i mogućnost proizvodnje dijelova od nelivljivih ili visokotaljivih metala i njihovih legura.

Mješavina praha i veziva koja se ubrizgava u kalup mora biti homogena, te su prahovi sitniji od onih za konvencionalno prešanje u hladnom ukovnju (MIM prah: 10 - 20  $\mu\text{m}$ , konvencionalni prah 50 - 150  $\mu\text{m}$ ). U ovom postupku koriste se visoki postoci veziva u otpresku (do 40 %) te dolazi do značajnog smanjenja dimenzija sinteriranjem (do 20 % linearno) i proizvode se uglavnom manji složeniji otpresci boljih uporabnih svojstava u usporedbi s klasičnim kompaktiranjem, u prvom redu zbog više gustoće.

Ukratko, postupak injekcijskog prešanja počinje predmiješanjem metalnog praha s organskim vezivom, koje je najčešće plastomerna mješavina voska, polimera, ulja i maziva. Nakon miješanja i granuliranja smjesa se ubrizgava u kalup. Nakon prešanja vezivo se uklanja otapanjem i/ili zagrijavanjem. Završni korak je sinteriranje.



Slika 2. Postupak injekcijskog prešanja metala [3]

Kad je otpresak izbačen iz kalupa, vezivni materijal se uklanja ili otapajem i ekstrakcijom ili/i toplinskim procesom, a zatim otpresak sinterira. Uslijed velike količine veziva u početnom materijalu, otpresak dobiven postupkom injekcijskog prešanja je podvrgnut velikom smanjenju volumena tijekom sinteriranja. Dimenzijske tolerancije stoga nisu tako dobre te se mora uzimati u obzir prilikom samog dizajniranja procesa proizvodnje.

Postupkom injekcijskog prešanja mogu se u odgovarajućem obliku praha proizvesti gotovo svi proizvodi od metala i njihovih legura. Primjer su čelici (niskolegirani, nehrđajući, brzorezni), legure na bazi bakra, superlegure nikla i kobalta, titana, intermetalni spojevi, magnetične legure, metali s visokim talište i tvrdi metali. Izuzetak su aluminij i magnezij, zbog toga što oksidni film, koji je još uvijek prisutan na površini čestica praha usporava sinteriranje.

Poznato je da se finije čestice lakše sinteriraju od velikih. Zbog toga je za injekcijsko prešanje potrebo odabrati finije čestice s odgovarajućim raspodjelom veličine, kako bi se postigla velika gustoća slaganja i niski troškovi.

Injekcijsko prešanje metala je u suštini tehnologija proizvodnje kompleksnih dijelova u velikim količinama. Ako bi oblik dopuštao proizvodnju konvencionalnim prešanjem i sinteriranjem,



MIM bi u većini slučajeva bio neekonomičan. Tipična tehnologija koja parira MIM jest precizni lijev, no u mnogim karakteristikama injekcijsko prešanje metala je u prednosti.

**Tablica 1. Usporedba preciznog lijeva i injekcijskog prešanja metala [4]**

| Karakteristika                       | Precizni lijev | MIM  |
|--------------------------------------|----------------|------|
| Minimalni promjer provrta, mm        | 2              | 0,4  |
| Minimalna dubina sljepog provrta, mm | 2              | 20   |
| Minimalna debljina stijenke, mm      | 2              | <1   |
| Maksimalna debljina stijenke, mm     | neograničena   | 5    |
| Tolerancija kod dimenzija 14 mm      | 0,2            | 0,06 |
| Hrapavost površine Ra, $\mu$         | 5              | 4    |

U sljedećim poglavljima opisana je proizvodnja metalnih prahova, čije je znanje potrebno da bi se razumio postupak injekcijskog prešanja metala.

### 2.3 Proizvodnja metalnog praha

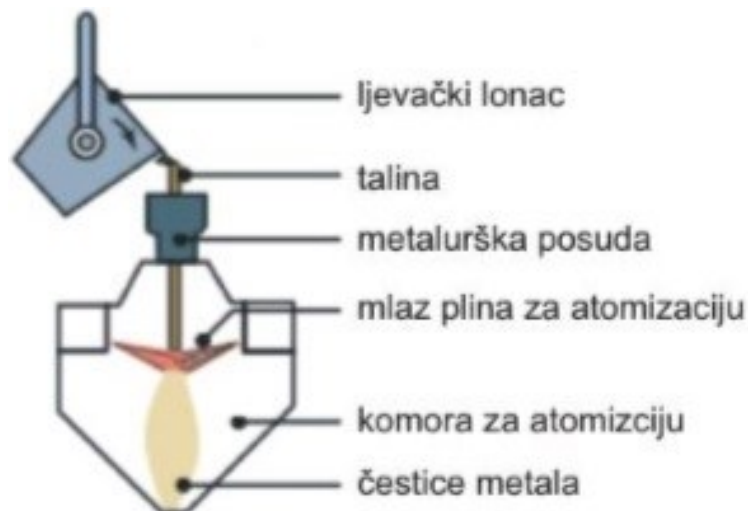
Proizvodnja metalnog praha može uslijediti iz tekućeg ili krutog stanja mehaničkim, elektrolitičkim i kemijskim tehnikama te atomizacijom praha. Kod mehaničkih postupaka prahovi se dobivaju usitnjavanjem polaznog materijala djelovanjem vanjskih sila (udarnim djelovanjem, trenjem, sječenjem ili tlačenjem). To je relativno jednostavan postupak u kojem ne postoji jednoličan pritisak na svaku od čestica te su one nepravilnog i nejednolikog oblika.

Elektrolitička tehnika je fizikalna metoda dobivanja praha. Najčešće uz pomoć elektrolize, prahovi metala talože se na katodi. Pravilno prilagođavanje parametara procesa omogućuje taloženje metala na katodu u obliku grudica ili pahuljica koje se kasnije usitnjavaju u prah.

Kemijski postupci uključuju redukciju metalnih smjesa, poput oksida, karbonata, nitrata ili halogenida s plinovima (najčešće vodikom) ili čvrstim tvarima (ugljik i visokotaljivi materijali). Prednost ovih postupaka je što se njima mogu proizvesti prahovi gotovo svih metala, veličine i oblika čestica.

Atomizacija praha je najzastupljenija metoda proizvodnje prahova metala i predlegiranih prahova aluminijskih, željeznih, bronzanih, niskolegiranih čelika, nehrđajućih i alatnih čelika, legura titana i superlegura. Ovi postupci omogućuju dobivanje prahova visoke čistoće izravno iz taljevine, čime je znatno smanjena cijena daljnje obrade prahova. Postupak se sastoji od taljenja,

atomizacije (pretvaranja taljevine u kapljice), te očvršćivanja i hlađenja. Rastaljeni metal raspršuje se strujanjem fluida pod velikim pritiskom u sitne kapi, ili rastaljeni metal pada na rotirajući disk gdje dolazi do brzog očvršćivanja u sitne čestice. Komercijalni atomizatori danas su sposobni proizvesti i do 400 kg praha u minuti.

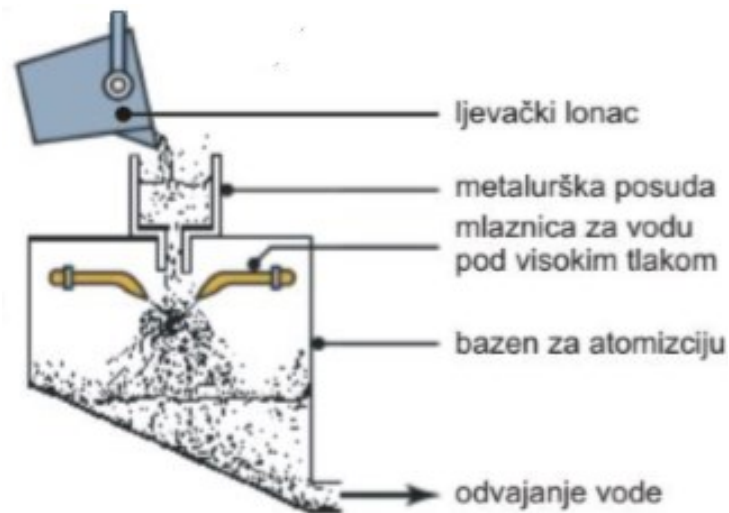


Slika 3. Plinska atomizacija praha [5]

Plinska atomizacija se provodi tako da se rastaljena legura dovodi u komoru za naštrecavanje gdje se s pomoću turbulentnog strujanja plina brzine 250-350 m/s pod tlakom 6-10 bar atomizira. Pod visokim tlakom plina rastaljeni metal se izlaskom iz mlaznice pretvar u fini sprej. Tijekom leta kroz komoru kapljice očvršćuju i padaju u spremnik za skupljanje. Najsitnije čestice strujom plina prenose se u posebnu posudu.

Kod plinske atomizacije se najčešće koriste zrak i dušik kao fluidi koji raspršuju rastaljeni metal, ali u nekim slučajevima to može biti i plin koji ima veću sposobnost hlađenja, npr. argon. Prosječna veličina ovako proizvedenih kapljica iznosi 150  $\mu\text{m}$ .

Vodena atomizacija je najčešći postupak za dobivanje praha metala koji se tale ispod 1600 °C. Mlaz vode pod visokim tlakom sudara se pod određenim kutom s mlazom rastaljenog metala što rezultira raspršivanjem i brzim očvršćivanjem nastalih kapljica, slika 4. Veličina čestica praha ovisi o tlaku vode.[4]



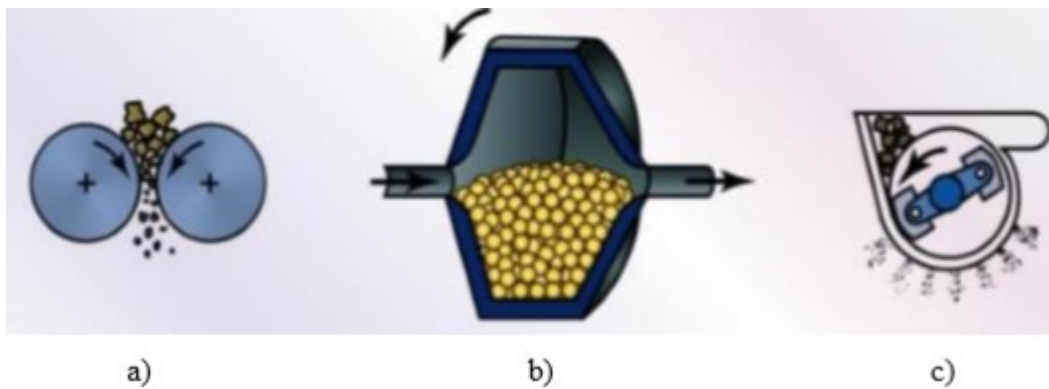
Slika 4. Vodena atomizacija [5]

## 2.4 Priprema smjese

Nakon odabira jednog ili više metalnih prahova određene čistoće, veličine zrna te odgovarajućih aditiva (plastifikatori, sredstva za tečenje) nužnih za oblikovanje i sintetriranje, pristupa se pripremiti smjese koja uključuje operacije: miješanje, mljevenje, sušenje, granuliranje.

Miješanje je postupak spajanja prahova različitog kemijskog sastava, kao što su elementarne mješavine metalnih prahova ili mješavine metala i nemetala (legiranje u čvrstom stanju - mehaničko legiranje). U mješavine se dodaju različiti aditivi koje je također potrebno homogenizirati. Stvaranje homogene mješavine preduvjet je nastanka homogene mikrostrukture.

Često se uz miješanje provodi i mljevenje koje podrazumijeva mehaničko oblikovanje čestica praha čime dolazi do njihova lomljenja i hladnog oblikovanja. Zbog sve većeg zanimanja za prahove što manjih zrna, važnost mljevenja je u porastu jer je moguće proizvesti zrna sitnija od onih proizvedenih postupkom atomizacije. Miješanje i mljevenje može biti mokro i suho. Mokri postupak je kvalitetniji budući da se njime postižu finije i jednoličnije mješavine. Neki od poznatih postupaka mljevenja su valjanje, kuglično mljevenje i udarno mljevenje.



**Slika 5. Različiti tipovi mljevenja: a) mljevenje valjanjem, b) kuglično mljevenje, c) udarno mljevenje [3]**

Danas prevladava kuglično mljevenje koje se provodi u kugličnom mlinu, cilindričnom bubnju koji rotira oko svoje osi i pritom je djelomično ispunjen prahom i kuglicama za mljevenje. Prilikom rotacije bubnja kuglice se podižu na određenu visinu s koje slobodno padaju ili se kotrljaju pritom djelujući na čestice praha udarnim silama i silama trenja.

Kuglice za mljevenje mogu biti od različitih materijala, a to su najčešće keramike, tvrdi metali, alatni i nehrđajući čelici. Tijekom mljevenja dolazi do kontaminacije praha trošenjem kuglica pa je poželjno da su one od istog materijala kao i prah koji se melje. Osim kemijske kompatibilnosti materijala treba voditi računa i o promjeru kuglica, njihovoj količini s obzirom na masu praha i volumen bubnja, brzini i vremenu mljevenja te mediju i atmosferi u bubnju. Najčešći uzrok lošeg mljevenja je prevelik promjer kuglica u odnosu na materijal koji se melje.

## 2.5 Oblikovanje praha

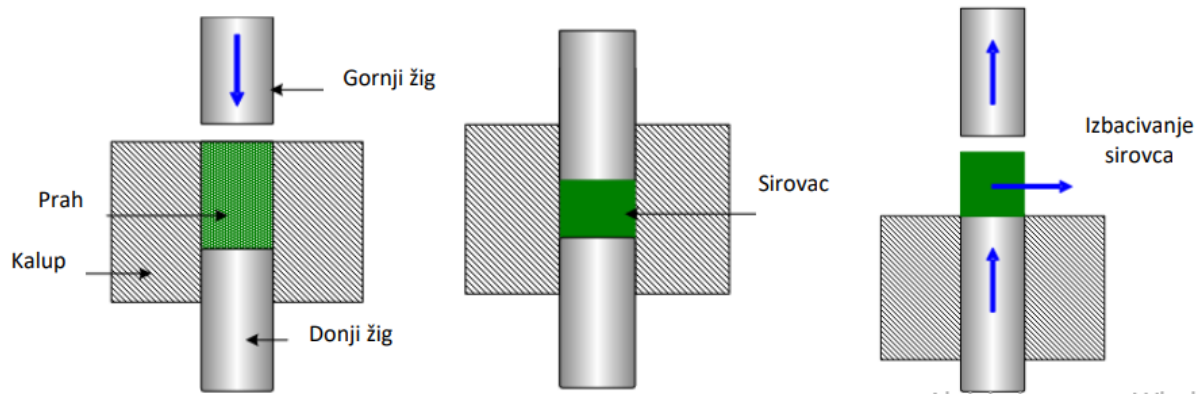
Osnovna zadaća oblikovanja ili kompaktiranja praha je povezivanje čestica praha u željeni oblik koji ima dovoljnu čvrstoću za daljnje rukovanje. Postupak se izvodi u kalupima u kojima se prah tlači pri čemu dolazi do deformacije čestica praha i smanjenja poroznosti.

Kompaktiranje može biti hladno i toplo. Postupak hladnog kompaktiranja ostvaruje se primjenom visokog tlaka na okolišnoj ili malo povišenoj temperaturi, dok toplo kompaktiranje uključuje primjenu tlaka na visokoj temperaturi. Primjena tlaka može biti u jednom smjeru (jednoosno kompaktiranje za jednostavnije dijelove), u dva smjera (dvoosno kompaktiranje za složenije dijelove) ili može biti izostatička.

Glavni problem kompaktiranja je nehomogena raspodjela gustoće i pojava teksture, što ovisi o prahu - veličini i obliku čestica, geometriji i dimenzijama izratka te postupku oblikovanja. S obzirom na postizive gustoće otpreska razlikuju se konvencionalni postupci i postupci kojima se postižu teorijske gustoće.

Osnovni ciljevi kompaktiranja jesu sljedeći:

- konsolidacija praha u željeni oblik,
- postizanje određenih konačnih dimenzija,
- postizanje određenog stupnja i vrste poroznosti,
- postizanje zadovoljavajuće čvrstoće za daljnje rukovanje.[3]



Slika 6. Shematski prikaz jednoosnog kompaktiranja u kalupu [6]

### 3. KORACI U POSTUPKU INJEKCIJSKOG PREŠANJA

#### 3.1 Miješanje

Učinkovitost miješanja je postignuta, ako je cijela površina čestica metala prekrivena vezivom. Za to je potrebno smično djelovanje koje se postiže planetarnim mješačima ili „Z“ mješačima. Veziva su često organskog tipa- plastomerna smjesa voska, polimera, ulja i maziva.

Potrebno je koristiti minimalnu dozu veziva, no optimalna doza ovisi o karakteristikama samog procesa. U industrijskoj primjeni, volumni postotak varira od 50 do 70 posto veziva.



Slika 7. Primjer stroja za miješanje praha i veziva [7]

#### 3.2 Injekcijsko prešanje

Strojevi za injekcijsko prešanje (ubrizgavalice) su općenito isti oni koji se koriste u industriji prerade polimera. Uobičajeno je granulirati mješavinu u pelete, koji se naknadno mogu skladištiti i dodavati po potrebi. Pužni vijak jest zagrijan na određenu temperaturu kao i mlaznica ubrizgavalice, koja je kontrolirana kako bi se osigurali konstantni uvjeti prerade. Temperatura samog kalupa se također kontrolira kako bi otpresak bio u čvrstom stanju, kada se izvadi iz kalupa. Kalup se konstruira sa što većim brojem kalupnih šupljina, kako bi se povisila proizvodnost, no to utječe na samu cijenu kalupa i održavanje.



Slika 8. Primjer ubrizgavalice za injekcijsko prešanje metala [7]

### 3.3 Uklanjanje veziva

Uklanjanje veziva sa sirovca je ključan korak u proizvodni i zahtijeva pažljivu kontrolu. Postoje dva osnovna procesa:

- 1) Zagrijavanje sirovca u svrhu rastapanja, rastvaranja i isparivanja veziva. Ovaj proces mora biti izveden pažljivo, kako ne bi došlo do neželjenog utjecaja na kalupljeni dio, može se koristiti više komponentata u vezivu s različitim temperaturama raspadanja. Ovaj proces uobičajeno traje satima i najviše ovisi o debljini sirovca.
- 2) Uklanjanje veziva kemijskim putem koristeći dušične kiseline ili oksalne kiseline je noviji proces koji znatno smanjuje vrijeme uklanjanja te je razvijena oprema u kojoj se katalitičko uklanjanje veziva može izvesti kontinuirano. Ovaj proces je primjenjiv samo na određene tipove organskih veziva.

Tijekom uklanjanja veziva struktura injekcijski prešanog dijela oslabljuje, pa se njime mora pažljivo rukovati.



Slika 9. Primjer komore za odvajanje veziva u zaštićenoj atmosferi [7]

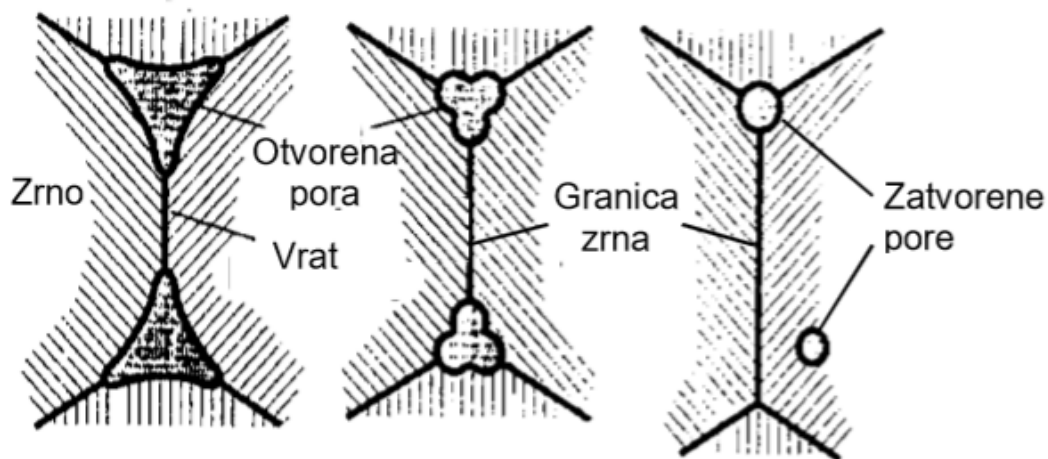
### 3.4 Sinteriranje

Nakon uklanjanja veziva, injekcijski prešani dijelovi se u kontroliranim atmosferama, ponekad vakuumu, zagrijevaju na visoke temperature ispod točke taljenja s ciljem povećanja čvrstoće i tvrdoće. Tijekom ove faze dolazi do transformacije mehaničkih veza ostvarenih oblikovanjem u mnogo čvršće metalne veze. Sinteriranje se provodi zagrijavanjem kompaktnog komada na temperaturu nižu od temperature taljenja glavnog konstituenta (oko 80% temperature tališta) u svrhu povezivanja čestice praha.

Veza među česticama ostvaruje se formiranjem „vrata“ na mjestu kontakta. Proces sinteriranja ostvaruje se kroz mehanizme kao što su zgušnjavanje, difuzija, rekristalizacija i rast zrna dok su osnovni parametri temperatura, vrijeme i atmosfera u peći. Prilikom sinteriranja mogu biti primijenjena dva različita mehanizma: sinteriranje u čvrstom stanju i sinteriranje u rastaljenoj fazi. Kod injekcijskog prešanja metala najčešće se koristi sinteriranje u čvrstoj fazi, osim u slučajevima proizvoda s više vrsta materijala zbog različitih tališta komponenata.

Sinteriranje u čvrstoj fazi karakterizira jaka difuzija u čvrstom stanju koja doprinosi zagrijavanju. Slika 10. prikazuje shematski različite faze procesa srašćivanja. S vremenom čestice srašćuju, udio pora se smanjuje te se oblikuju granice zrna.





Slika 10. Faze sinteriranja u čvrstom stanju [3]

U polaznom stanju čestice praha povezuju se formiranjem vrata na mjestu dodira, no još uvijek je prisutna velika poroznost. Tijekom daljnjeg postupka rastu kontaktne površine između zrna i iščezavaju otvorene pore. Difuzijskim gibanjem atoma u kontaktnim površinama u oba smjera u konačnici se oblikuju granice zrna što vodi očvršćivanju i postizanju maksimalno moguće gustoće zatvaranjem pora.

Kontrolirana ravnomjerna stezanja komponenti do 20 % događaju se u završnoj fazi sve do njihove zadane veličine oblika. Nadalje, dijelovi mogu biti toplinski obrađeni, polirani, obloženi ili zavareni ovisno o zahtjevima samog procesa.

### 3.5 Materijali u proizvodnji MIM

Mnoštvo proizvoda je razvijeno MIM materijalima - željezo kao temelj, nikal i ugljik kao legirajući elementi. U velikoserijskim proizvodnjama koriste se:

- a) nelegirani i nisko legirani čelici
- b) brzorezni čelici
- c) nehrđajući čelici: feritni, martenzitni, austenitni
- d) nikal i superlegure na bazi nikla
- e) željezo
- f) bakar i njegove legure; bronca, mesing, bakar-berilij legure
- g) magnetske legure
- h) keramika: oksidna, neoksidna
- i) tvrdi metali: volfram karbid, kobaltove legure

Nadalje, mogu se koristiti materijali s karakteristikama koje su superiornije u odnosu na standardne materijale ili one koje ne mogu biti obrađene korištenjem standardne tehnologije.

To su posebno :

- materijali postojani na habanje
- materijali postojani pri visokim temperaturama
- magnetski meki materijali.

Nudeći široku paletu materijala ovi proizvodi se razlikuju prema geometrijskoj slobodi konstruiranja, vrlo visokoj preciznosti i podobnosti na proizvodnju velikih količina.

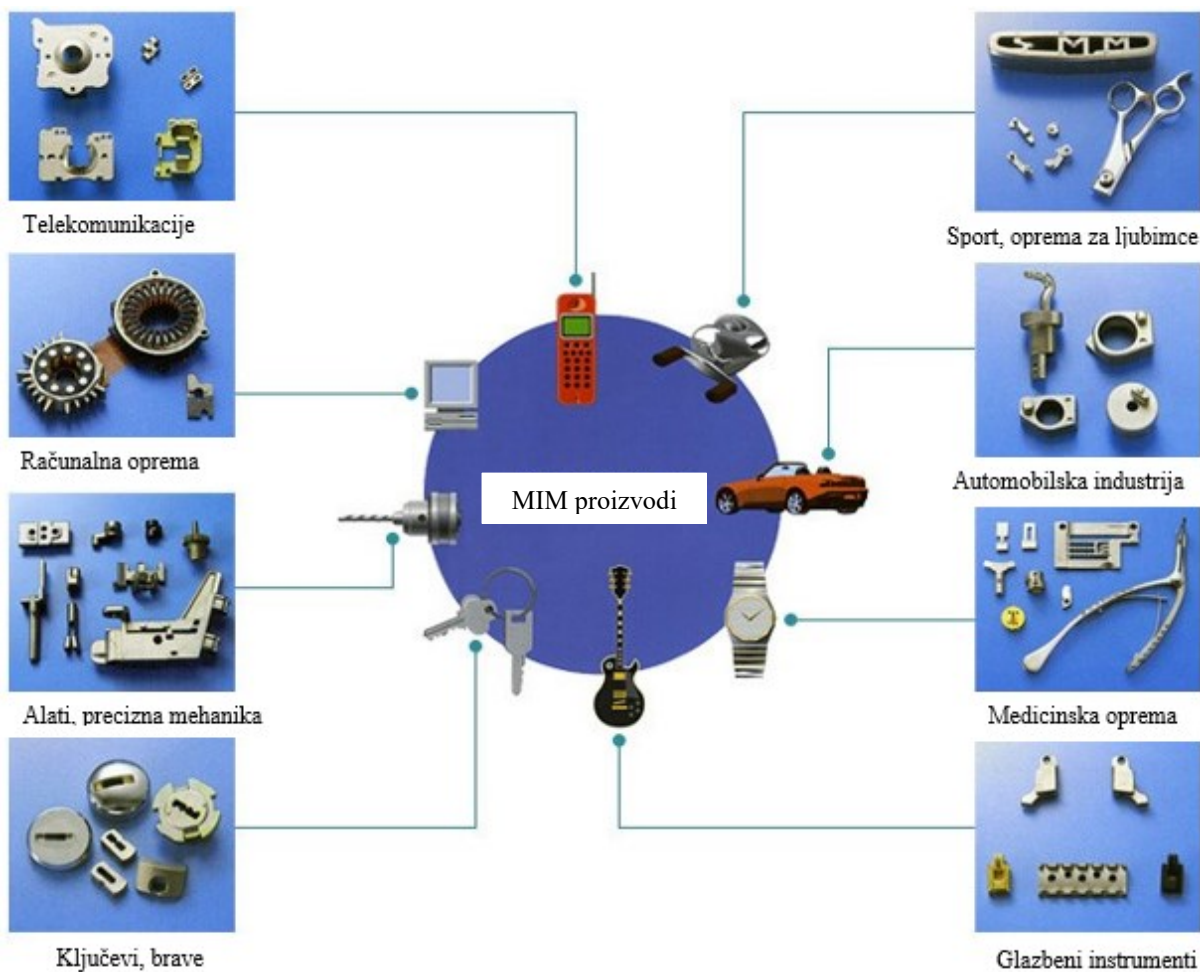
#### 4. PRIMJENA PROIZVODA INJEKCIJSKOG PREŠANJA METALA

MIM poboljšava kvalitetu proizvoda, smanjuje vrijeme proizvodnje i postiže uštedu troškova čak do 50% u odnosu na postupke kovanja čelika i postupke preciznog lijeva.

Tržište proizvoda metalurgije praha i injekcijskog prešanja je brzorastuće, s prihodom od 2,4 milijarde dolara u 2022. godini procijenjenim godišnjim rastom od 10%. Glavne industrije koje mogu iskoristiti prednosti ovih tehnologija su zrakoplovna, automobilska i vojna industrija zbog velikih budžeta za ulaganje u nove tehnologije. [8]

Kao rezultat prednosti MIM proces postaje široko prihvaćen kao standardni postupak unutar broja industrijskih sektora uključujući:

- medicinu – implantati, kirurške stezaljke, potpore za zglobove, koncentratori kisika, vanjske pumpe, drške skalpela i noževa
- strojarstvo – filteri, vodilice, poluge, zupčanici, osovine, vratila
- preciznu mehaniku – zupčanici, poluge, vodilice
- svemirsku industriju – toplinski izolatori, svjetlosni izolatori
- automobilsku industriju – ventili, dijelovi automatskih mjenjača, prijenosnici gibanja
- telekomunikacije – električni kontakti, sabirnice, releji
- analizu plinova – filteri, pumpe
- poljoprivredu
- instrumentaciju.



Slika 11. Područja primjene MIM proizvoda [9]

Automobilska industrija je vrlo kompetitivna industrija koja stalno ulaže u nove tehnologije proizvodnje i optimiranja proizvoda. Automobili kao komplicirana cjelina raznih sustava koji funkcioniraju u jedinstvu, sadrži mnogo dijelova koji mogu iskoristiti prednosti tehnologije injekcijskog prešanja ne samo metala, već i ostalih materijala u funkcionalnim dijelovima gdje je masa, čvrstoća i zamjenjivost samih dijelova važna. Motori s unutarnjim izgaranjem sadrže mnogo relativno malih dijelova koji nisu opterećeni velikim statičkim silama, no jesu opterećeni velikim brojem ciklusa pa je njihova otpornost na trošenje i dinamička čvrstoća također važna.



**Slika 12. Klackalice ventila (lijevo) i vodilice ventila (desno) [10]**

Dijelovi sustava za usis i ispuh zraka opterećeni su dinamičkim naprezanjem, povišenim tlakom i temperaturom te se od njih zahtijeva ponovljivost izvođenja zadatka. Injekcijsko prešanje metala osigurava da se ispune tražena ograničenja uz dobivanje zadovoljavajućih performansi.

## 5. KONSTRUIRANJE PROIZVODA ZA POSTUPAK MIM-a

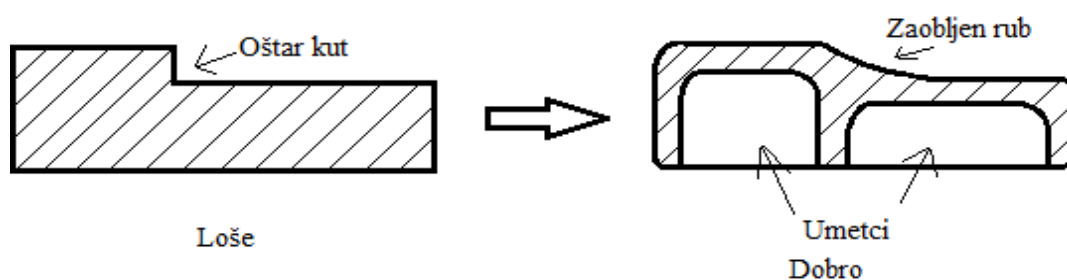
Zbog različitosti MIM-a od ostalih metoda koje koriste prešanje i sinteriranje trebaju se uzeti u obzir različiti faktori kod konstruiranja proizvoda. Svakom proizvodu treba pristupiti drugačije, ovisno o glavnim značajkama, funkciji i ograničenjima samog sustava i procesa injekcijskog prešanja. Glavna ograničenja svakog MIM procesa su kompleksnost proizvoda, materijal, broj proizvoda i cijena komponente.

### 5.1 Debljina stijenke

Debljina stijenke je jedna od glavnih značajka svakog proizvoda te je nositelj mehaničkih svojstava čvrstoće i krutosti. Konzistentna debljina stijenke je kritična u svrhu izbjegavanja distorzije, unutarnjih naprezanja, pucanja, nehomogenih popunjenosti kalupne šupljine, pukotina i drugo. Varijacija u debljini stijenke uzrokuje varijacije u skupljanju materijala tijekom sinteriranja što otežava upravljanje dimenzijama.

Poznata metoda zadržavanja jednolične debljine stijenke je korištenje umetaka, rebara i mreža. Umetci smanjuju količinu materijala i vrijeme izrade, no njihovo dodavanje povisuje kompleksnost samog procesa vađenja iz kalupa pa često postoji kompromis između korištenja umetaka i korištenja više materijala. Rebra i mreže služe za ojačavanje relativno tankih stijenki no također povećavaju kompleksnost kalupa i otežavaju tok sirovine.

Tijekom konstruiranja se preporučuje izbjegavanje oštih kutova.



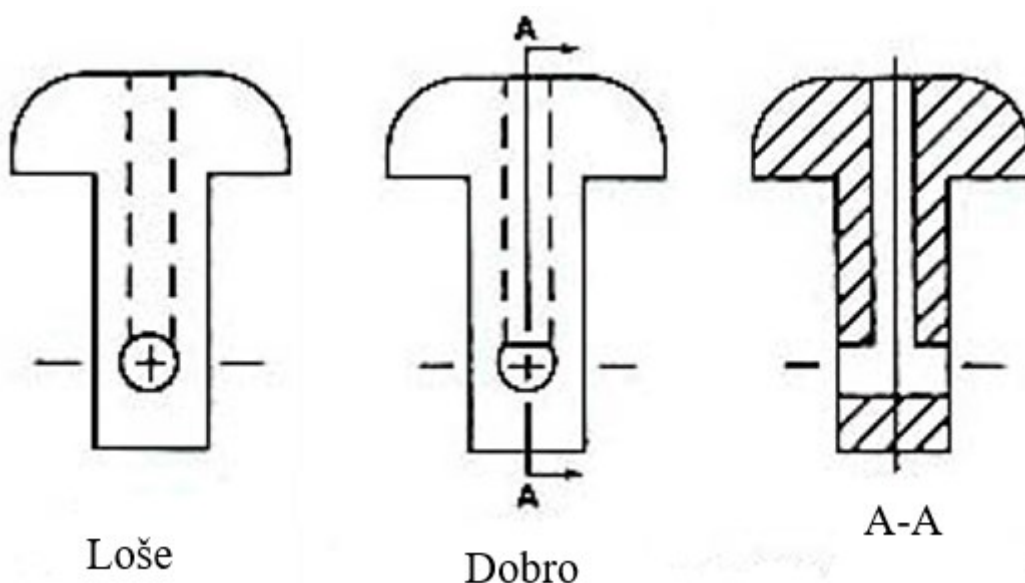
Slika 13. Primjer korištenja umetaka i izbjegavanja oštih rubova[11]

U nekim primjenama variranje debljine stijenke je neophodno. U tim slučajevima preporučuje se postepeni prijelaz debljine, da bi se umanjile koncentracije naprezanja i izbjegle linije toka na površini.

## 5.2 Rubovi, uvrta i provrti

Općenito je pravilo da se oštri rubovi izbjegavaju zbog nemogućnosti ispunjenja sirovinom; stoga se preporučuju zaokruženi rubovi. Mali provrti ili provrti koji su u blizini ruba moraju se izbjegavati zbog otežane kontrole toka sirovine do i oko njih.

Kod uvrta, dubina se generalno ograničava na dvostruku veličini promjera uvrta. Za dobivanje uvrta potrebno je korištenje umetaka, no problem nastaje zbog mogućeg izvijanja umetka uslijed toka sirovine. Provrti i uvrta koji su u okomitom odnosu postavljaju još jedan problem tijekom zatvaranja i brtvljenja kalupa te se preporučuje redizajniranje jednog od njih u „D“ oblik zbog lakše izvedbe kalupa i umetaka.



Slika 14. Primjer korištenja umetaka za ostvarivanje uvrta i provrta[11]

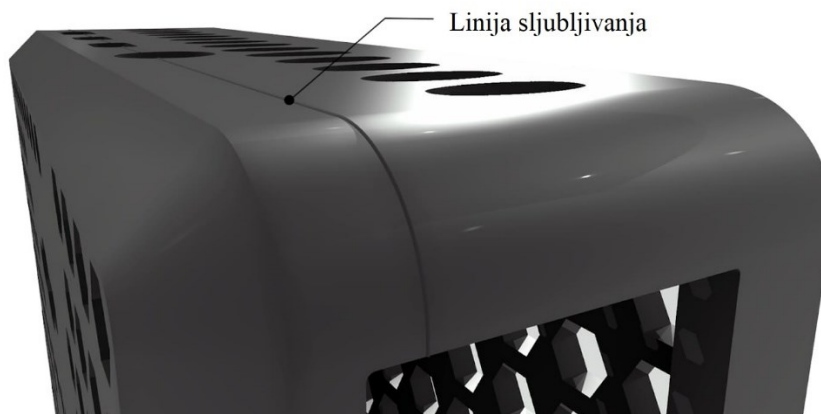
## 5.3 Linija sljublivanja

Linija sljublivanja je linija koja ukazuje na mjesto sljublivanja dvije polovice kalupa.

Vidljiva linija je utisnuta na površini otpreska, koja se podudara s linijom sljublivanja.

Ovisno o konstrukciji kalupa, može biti ravna linija ili krivulja. Sirovina se odvaja od te linije jer se zrak često nakuplja na tom prostoru. Linija sljublivanja često nema utjecaja na sam otpresak, no ako utječe na funkcionalnost, izgled ili geometrijsku toleranciju važno je uzeti u obzir njeno pozicioniranje.

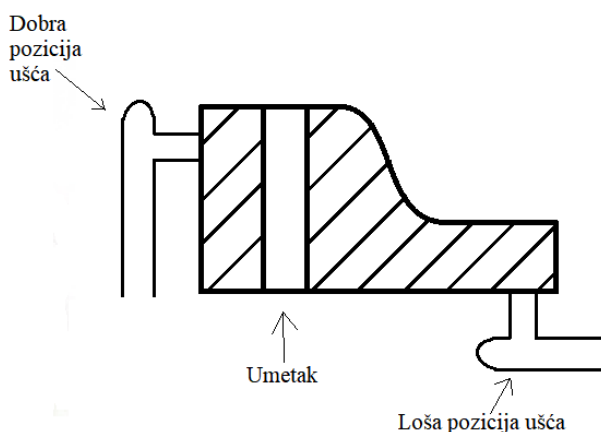
Linija sljublivanja može se prikriti na rubove dijela. Postavljanje kritičnih značajki na liniju sljublivanja treba izbjegavati.



Slika 15. Prikaz linije sljubljanja [12]

#### 5.4 Ušće kalupa

Ušće kalupa je mjesto gdje sama sirovina ulazi u kalup i jedno je od glavnih značajki konstruiranja kalupa za injekcijsko prešanje. Postavlja se na mjesto najvećeg poprečnog presjeka kako bi sirovina prvo ispunila deblje dijelove. Tečenje sirovine od tankog do debelog dijela često ostavlja praznine, koncentratore naprezanja i linije tečenja na površini otpreska. Mogu se koristiti i više ušća odjednom, ali je potrebno uskladiti tok oba ušća. Ušće kalupa ostavlja otisak na metalnom dijelu pa je važno odrediti utjecaj tog dijela.



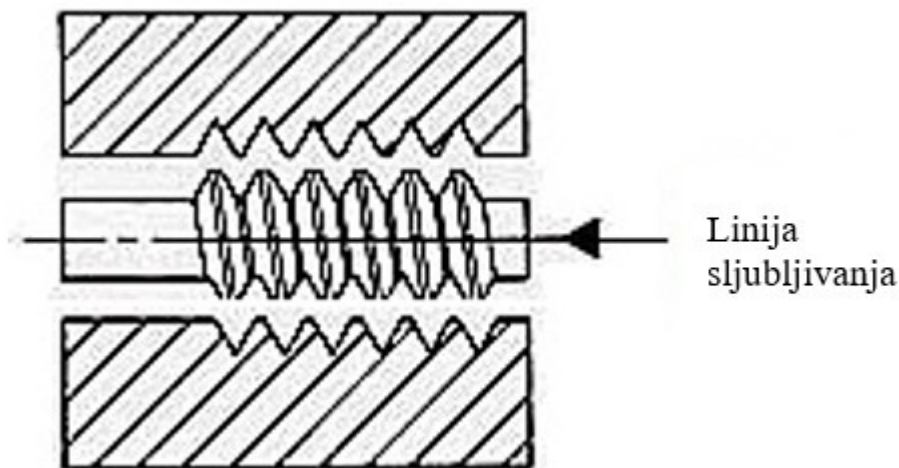
Slika 16. Primjer loše i dobre pozicije ušća [11]

#### 5.5 Navoji

Navoji su značajke promjenjive geometrije i kao takve predstavljaju problem ujednačenom toku sirovine. Sirovina teško ispunjava zavojnice navoja te sama geometrija navoja nosi rizik koncentracije naprezanja. Zbog relativno velike površine a malog volumena, vanjska površina se brže hladi od unutrašnjosti te postoji mogućnost toplinskih naprezanja. Kada je potrebno,



unutarnji i vanjski navoji mogu biti uključeni u samu konstrukciju kalupa eliminirajući potrebu naknadnim strojnim obradama. Unutrašnji navoji su izvedeni umetcima koji se odvrću naposljetku, no ovakav pristup nije isplativ pa se često ostavlja za naknadnu obradu.



Slika 17. Primjer navoja u kalupu koji se razdvaja [11]

## 5.6 Tolerancije i hrapavost

MIM procesi često ostvaruju tolerancije od  $\pm 0,003$  mm/mm. Smanjivanjem otpreska mogu se postići uže tolerancije, no tolerancije nisu proporcionalno vezane s veličinom dijela nego ovise i o veličini zrna, geometriji, materijalu i zahtjevima procesa.

Hrapavost MIM otpresaka je približno  $0,80 \mu\text{m}$  što je bolje od preciznog lijeva, međutim, poroznost može utjecati na mjerenje hrapavosti. Završna hrapavost može biti poboljšana naknadnom obradom kao što su brušenje, poliranje i lepanje.

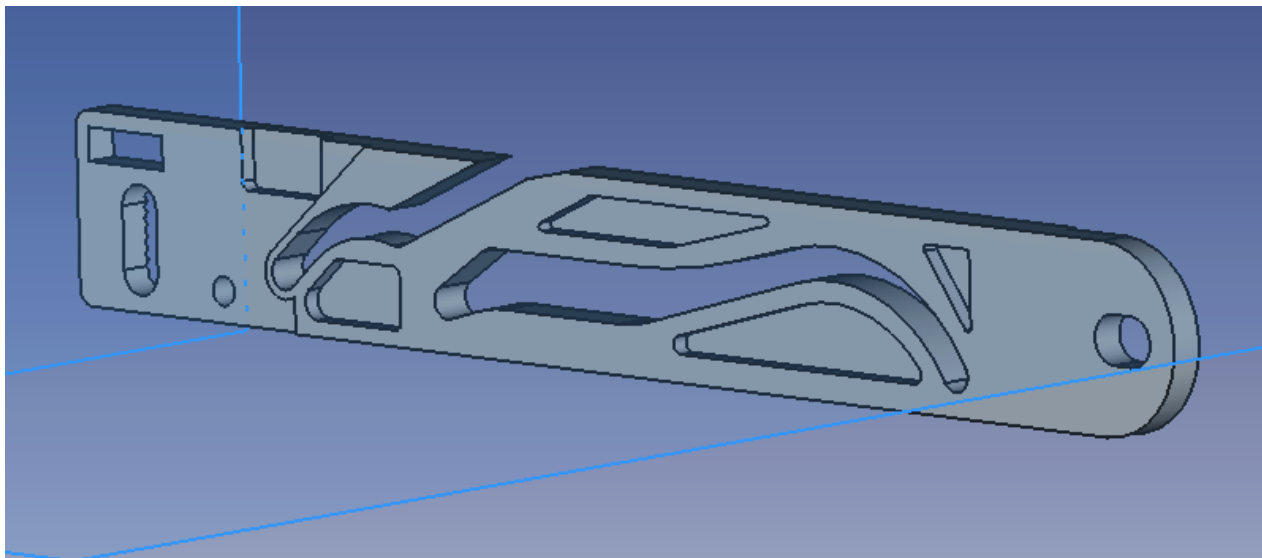
## 6. OBLIKOVANJE VODILICE KROVNOG PROZORA

U praktičnom dijelu biti će obrađen razvoj vodilice krovnog prozora automobila marke Audi 80 iz 1984. godine za izradu MIM postupkom. Vodilica će biti konstruirana u CAD programu FreeCAD te će se na njoj prikazati preporuke za konstruiranje otpreska namijenjenog MIM postupku proizvodnje.

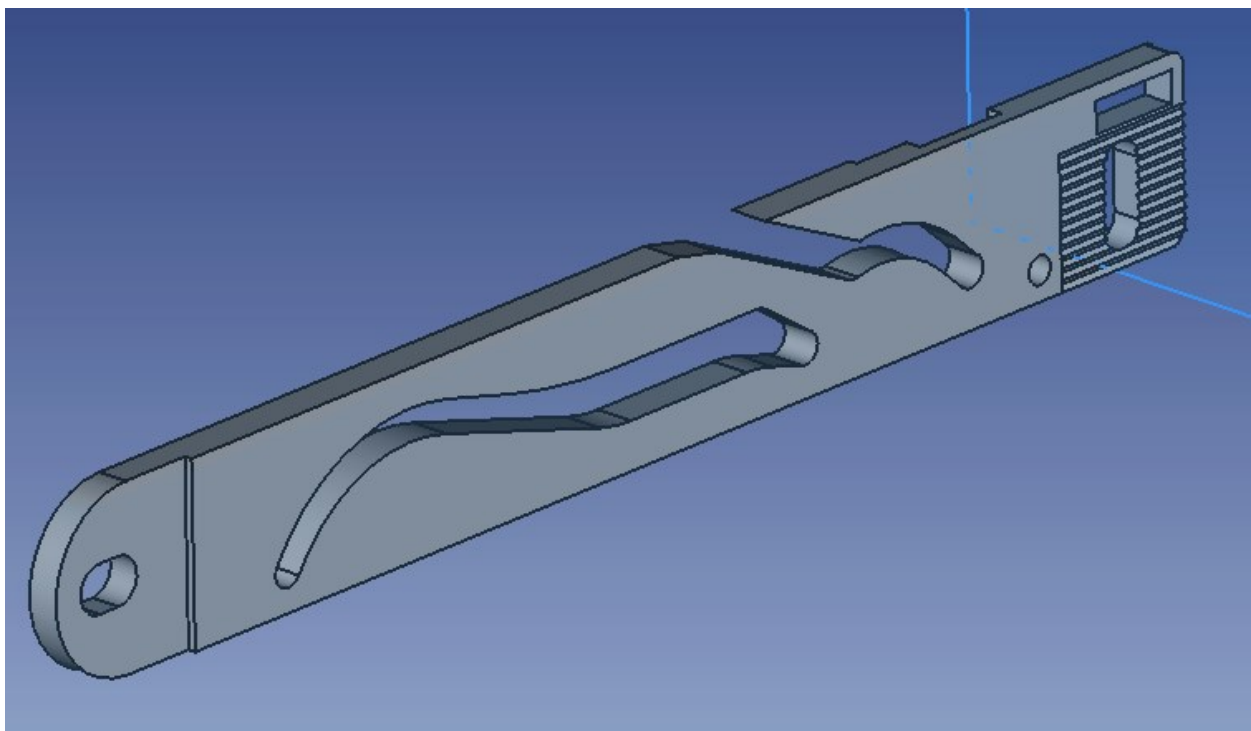


**Slika 18. Vodilica krovnog prozora**

Vodilica je komplicirane izvedbe s mnogo utora i krivulja kompleksne geometrije gabaritnih mjera 180 mm x 23 mm x 5 mm. Sa slike se može zaključiti da je ovakav oblik vrlo teško i dugotrajno izraditi obradom odvajanjem čestica i da je ovakav otpresak idealan za izradu tehonogijom MIM. Na slikama 19 i 20 vidimo predmet konstruiran u CAD programu.



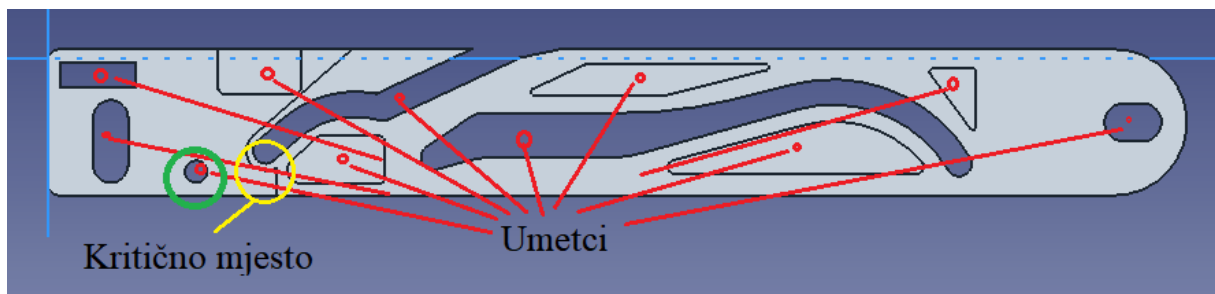
**Slika 19. Vodilica krovnog prozora konstruirana u CAD programu (prednji pogled)**



**Slika 20. Vodilica krovnog prozora konstruirana u CAD programu (stražnji pogled)**

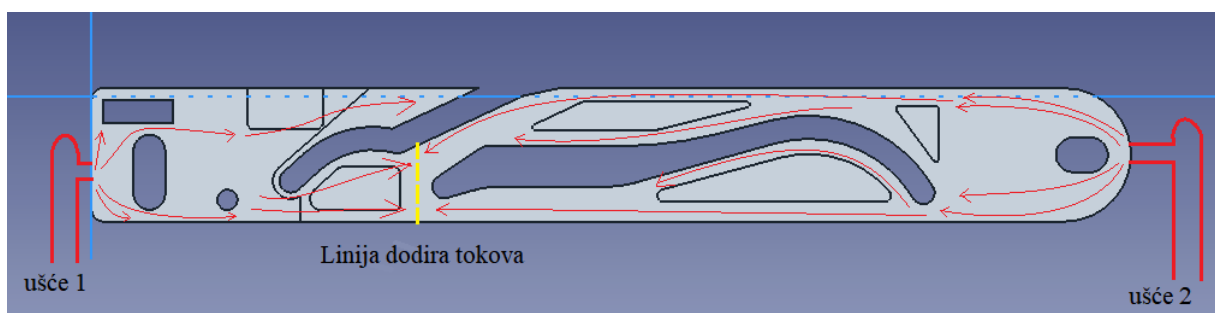
Iz izometrijskih pogleda se može zaključiti kako bi se dobio željeni oblik, moraju se koristiti umetci raznih geometrija. Debljine stijenke su nejednake, pa i o tome treba voditi računa kada se postavlja ušće. Na slici 21 može se vidjeti nacrt prednjeg pogleda u kojem su naznačena sva mjesta u koje treba staviti umetak. Kako mjesta nisu jednake dubine, treba koristiti razne vrste umetaka koji će se nalaziti u obje kalupne šupljine. Nadalje, žutim kružićem može se uočiti problematično mjesto kod kojeg uslijed savojnog opterećenja može doći do koncentracije

naprezanja pa čak i do puknuća. U provrt zaokružen zelenom bojom potrebno je naknadno urezati unutarnji navoj.



**Slika 21. Nacrt vodilice s pozicijom umetaka i kritičnim mjestom**

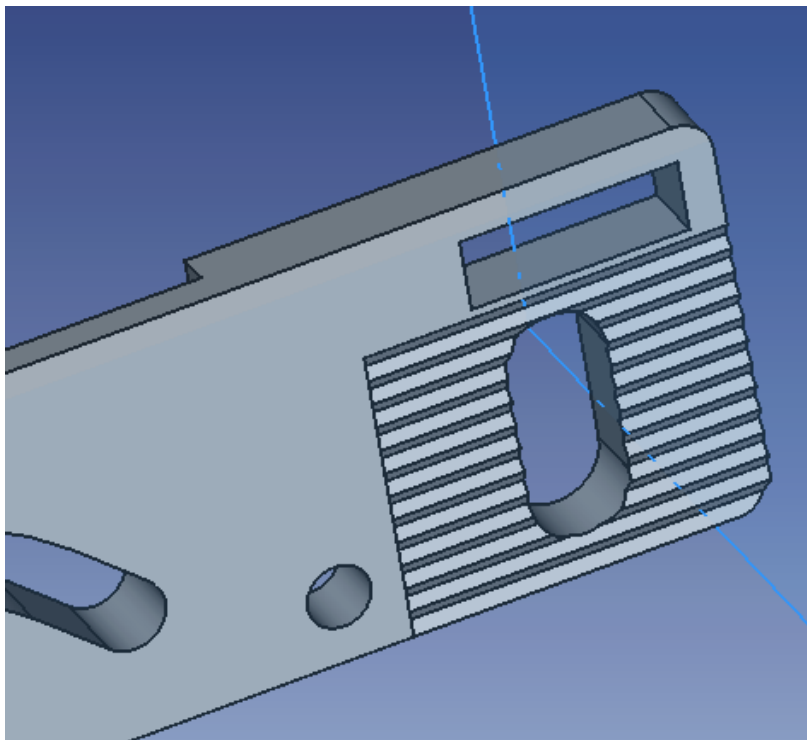
Odabiranje mjesta ušća kalupa također je otežano zbog poluotvorenog tipa konstrukcije vodilice. Ukoliko se odabire jedno ušće, tok sirovine biti će otežan na kritičnom mjestu i kalupna šupljina neće biti ispunjena. Stoga se u ovom slučaju mora uzeti u obzir korištenje dva ušća sa nejednakim tokom sirovine, s ciljem da dva toka sirovine ne dolaze u dodir na kritičnom mjestu.



**Slika 22. Prikaz pozicija ušća, linija tokova sirovine i linija dodira tokova sirovine**

Na slici 22 prikazana su dva ušća koja su odabrana kako bi se postigao pravocrtan tok sirovine. Pozicija ušća 2 na zakrivljenoj liniji nije idealna, no mora se napraviti kompromis s obzirom da druge pozicije predstavljaju problem toka sirovine oko umetaka. Linija dodira tokova (žuta isprekidana linija) postavlja se na najširem lokalnom mjestu debljine 5 mm i udaljene jednako od bližnjih umetaka kako ne bi došlo do neželjenih posljedica koncentracija naprezanja.

Na slici 23 prikazan je detalj na vodilici krovnog prozora na koji nasjeda drugi dio konstrukcije krovnog prozora. Ovaj detalj sprječava pomak vodilice nakon postavljanja položaja. Udubine detalja su trokutnog oblika širine 1,5 mm i dubine manje od 1 mm, što je teško ostvarivo obradom odvajanjem česticama, te je još jedan od razloga proizvodnje ovog konstrukcijskog dijela injekcijskim prešanjem metala.



**Slika 23. Prikaz detalja vodilice krovnog prozora**

Na slici 24 se može uočiti primjer takve vodilice koja je puknula.



**Slika 24. Slika vodilice s puknućem na kritičnom mjestu**

Zbog konstrukcije poluotvorenog tipa, velikog omjera duljine i debljine predmeta i nagle promjene debljine stijenke, naprezanja se koncentriraju u presjek vrata i bilo kakvim većim naprežanjem od onoga što je proizvođač preporučio dolazi do povećanog intenziteta naprezanja. Kako bi se poboljšala konstrukcija ovog strojnog dijela i uklonio očiti nedostatak, potrebno je konstruirati vodilicu u kojoj je glavna značajka klizna krivulja i u kojem se uzima u obzir zatvoreni oblik kritičnog mjesta.

## **7. ZAKLJUČAK**

Injekcijsko prešanje metala postaje jedno od glavnih grana proizvodnje relativno malih strojnih dijelova komplicirane geometrije zbog svojih odličnih postizivih svojstava i mogućnost održavanja oblika nakon sinteriranja. Kao rezultat ovih pogodnosti MIM proces postaje široko prihvaćen kao standardna tehnologija proizvodnje velikih serija strojnih dijelova. Daljnjim razvojem moguće je dobiti preciznije i kvalitetnije proizvode zahtjevnih značajki.

U praktičnom dijelu pokazan je konkretan primjer iz automobilske industrije i njegovo oblikovanje te postupci potrebni da se ostvari injekcijskim prešanjem. Konstrukcija primjerka jest problematična i nedovoljno razvijena, što je potrebno riješiti sa sljedećom inačicom proizvoda.

## LITERATURA

- [1] Čatić I., Johannaber F., Injekcijsko prešanje polimera i ostalih materijala, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2004.
- [2] <https://maziva.shop/injekcijsko-presanje/>
- [3] Ćorić D., Posebni metalni materijali – III Dio, Fakultet Strojarsva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [4] Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala,  
[http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/pregled\\_razvoja\\_mat\\_hrv.pdf](http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/pregled_razvoja_mat_hrv.pdf)
- [5] <https://drive.google.com/file/d/0B2F4ujbNbyvSRWNNUnNNaERnbzg/view?resourcekey=0-nYegcrxblJUfEfHQQ2IVuQ>
- [6] Aleksandrov Fabijanić T., Razvoj referentnih pločica tvrdoća po Vickersu postupkom metalurgije praha, Doktorski rad, 2014.
- [7] <https://www.schunk-group.com/mobility/en/technologies/metal-injection-molding>
- [8] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/powder-metallurgy-market>
- [9] <https://www.npr.co.jp/english/products/products03.html>
- [10] <https://www.npr.co.jp/english/products/products02.html#pagetitle01>
- [11] <https://www.epma.com/metal-injection-moulding>
- [12] <https://www.iqsdirectory.com/articles/metal-injection-molding.html>



## **PRILOZI**

I. CD-R disc