

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Технологија производње наоружања

Број индекса: 514/2014

Филип М. Савић

Примена металургија праха за производњу делова

дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Недић Богдан, редовни професор - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

РЕЗИМЕ

Овај рад је базиран на технологији производње делова од материјала у прашкастом облику, односно металугрији прахова. Приказане су различите методе производње, материјали и особине материјала. Посебно је анализиран МИМ (инјекционо бризгање метала) поступак. На конкретном примеру производње дела приказане су све фазе у производњи, са посебним освртом на синтеровање. Такође, дата је и анализа механичких особина на конкретном примеру. Коначно, представљене су машине које се користе у производњи, као и производи добијени МИМ технологијом.

Кључне речи: МИМ технологија, бризгање, синтеровање, МИМ машине.

SUMMARY

This work is based on the technology of producing parts from powdered material or powder metallurgy. The paper contains various methods of production, materials and material properties. The MIM (metal injection moulding) production process is specifically analyzed. All stages of production are given on the concrete case of production, with a special review on sintering process. The analysis of mechanical properties on the concrete case is also given. Finally, there are presented machines used in MIM process and products obtained by MIM technology.

Key words: MIM technology, moulding, sintering process, MIM machines.

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
Катедра за: ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО
Предмет: Технологија производње наоружања

ДИПЛОМСКИ РАД

са темом:

ПРИМЕНА МЕТАЛУРГИЈА ПРАХА ЗА ПРОИЗВОДЊУ ДЕЛОВА

За кандидата: Савић Филип број индекса: 526/2014

У оквиру дипломског рада потребно је прикупити и систематизовати податке о технологијама заснованим на металургији праха. Потребно је описати технологију инјекционог бризгања металних прахова и остале поступке израде делова, са акцентом на поступке где се користи синтеровање. Детаљно описати прахове намењене за технологије добијања делова металургијом праха и понашање честица праха при изради делова инјекционим бризгањем металних прахова (МІМ технологија). У посебном делу рада дати примере примене МІМ технологије и машине које се користе за овај процес производње делова.

Препоручена литература:

1. Б. Ђурковић, Д. Ђурковић, Металургија ретких метала, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 1991.
2. Д. Вилотић, Технологија инјекционог пресовања полимера, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2007.
3. Д. Божић, М. Митков, З. Вујовић, Металургија праха, МБГ, Београд, 1998.

У Крагујевцу,
Август, 2018.

Ментор:
Проф. др Богдан Недић

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
2. ИНЈЕКЦИОНО БРИЗГАЊЕ ПРАХОВА	2
3. ПОСТУПЦИ СА СИНТЕРОВАЊЕМ.....	5
3.1. Конвенционално пресовање у калупу.....	5
3.2. Хладно изостатичко пресовање – СІР	7
3.3. Сабијање ваљањем.....	8
4. ПОСТУПЦИ ОБЛИКОВАЊА ПРАХА СА ИНТЕГРИСАНИМ СИНТЕРОВАЊЕМ	9
4.1. Ковање праха.....	9
4.2. Вруће изостатичко пресовање	9
4.3. Инјекционо обликовање у получврстом стању	11
5. ММС – КОМПОЗИТИ СА МЕТАЛНОМ МАТРИЦОМ И ПОЈАВА МІМ ПРОИЗВОДЊЕ.....	13
5.1. Поступци у чврстом стању	14
5.2. Металургија праха	15
5.3. Поступци у растопљеном стању.....	16
5.4. Инфилтрација метала без притиска (Pressureless Metal Infiltration).....	17
5.5. Поступак наношења честица распршивањем	19
5.6. Очвршћивање и микроструктура	20
5.7. Инјекционо бризгање метала (Metal Injection Moulding – MiM).....	21
6. РІМ ПРАХОВИ	25
6.1. Димензије и расподела честица.....	25
6.2. Облици и грађа честица	27
6.3. Узајамно трење и течење честица.....	27
6.4. Густина праха.....	28
7. ПОНАШАЊЕ ЧЕСТИЦА МАТЕРИЈАЛА ТОКОМ МІМ ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ	31
7.1. Карактеристике металног праха.....	33
7.2. Састав везива.....	34
7.3. Однос праха и везива.....	34
7.4. Метални прах	35
7.5. Величина честица	36
7.6. Облик честица.....	36
7.7. Расподела по величини честица	36
7.8. Везивни материјали	37
7.9. Секундарно везиво.....	38
7.10. МІМ материјали и њихова својства	40
7.11. Оптимизација параметара.....	43
7.12. Анализа металног праха SS316L	44
7.13. Синтеровање комада	48
7.13.1. Кинематика синтеровања	48
7.13.2. Додатни поступци након синтеровања	51
7.14. Фаза попуњавања и деловања накнадног притиска на конкретном производу уз примену нумеричке симулације.....	52
7.15. Фазе МІМ производње на конкретном примеру – производња металног носача	58
7.16. Анализа механичких својстава прашкастих материјала на узорку.....	68
8. ПРИМЕНА МІМ-А	70
8.1. МІМ производи.....	70
9. МАШИНЕ КОЈЕ СЕ КОРИСТЕ ТОКОМ МІМ ПРОЦЕСА	73
10. ЗАКЉУЧАК	76
ЛИТЕРАТУРА.....	77

1. УВОД

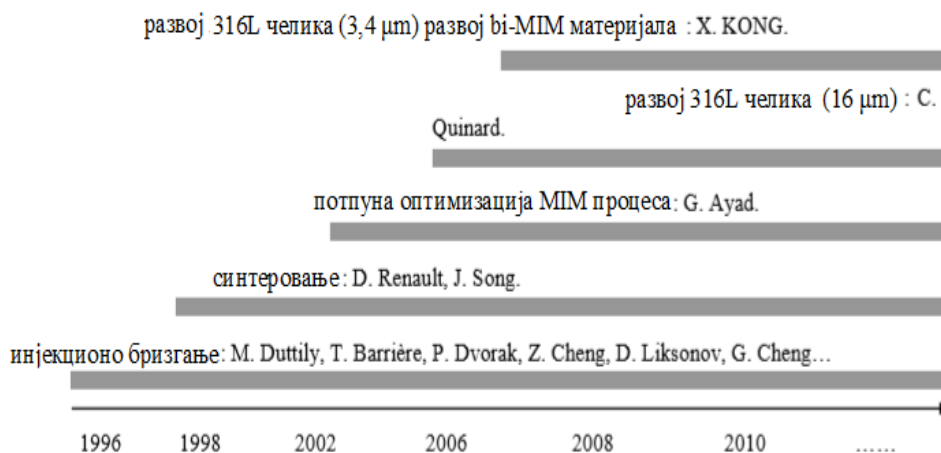
Металургија праха је појам који је све чешће присутан као поступак којим се добијају најразличитији облици са најразличитијим особинама. Развој овог поступка је донео револуционарне промене у ефикасности и начину производње. Овај облик производње је погодан за увођење у масовну производњу делова који су углавном малих димензија. Поред технологије бризгања пластике, развила се идеја о коришћењу металних сировина у прашкастом облику, ради производње свих оних делова који се могу производити бризгањем пластике. Ови начини производње делова од праха углавном захтевају синтеровање као следећи корак у производњи. Идеја за развој оваког поступка јавила се при првој употреби полимерних композита. Прашкасти материјали који се користе за бризгање метала су композити и се састоје од метала, везива и осталих компонената који олакшавају начин производње и побољшавају особине. Управо је то разлог постојања додатних поступака, којим се уклањају додатни - помоћни материјали из обликованог дела након вађења из калупа. Последица тога и постојање микро-порозности, па је делом ограничена производња делова инјекционим бризгањем метала (МІМ поступком). Као резултат свих наведених предности, МІМ поступак постаје широко прихваћен као стандардни поступак за бројне индустријске секторе, као што су производња делова за машинство, медицину, аутомобилску индустрију, телекомуникације, оптику итд.

Тема овог рада је металургија прахова која обухвата све фазе обликовања, од сировине у облику праха до коначног производа, као и машине и алате који се користе у производњи. У другом поглављу дата је историја развоја инјекционог бризгања и појава РМ прахова. У трећем поглављу описани су поступци израде производа од прахова са синтеровањем као посебном фазом. У четвртном поглављу описани су поступци са синтеровањем као међуфазом. У петом поглављу рада описани су поступци који су претходили МІМ поступку, као што је прва употреба композита. У шестом делу дате су особине и начин производње РМ прахова. Седми део је посвећен МІМ поступку производње, тј. фазама у производњи и понашању материјала током производње. У осмом делу описана је употреба МІМ поступка, а у деветом су кратко описане неке од машина које се користе у МІМ производњи.

2. ИНЈЕКЦИОНО БРИЗГАЊЕ ПРАХОВА

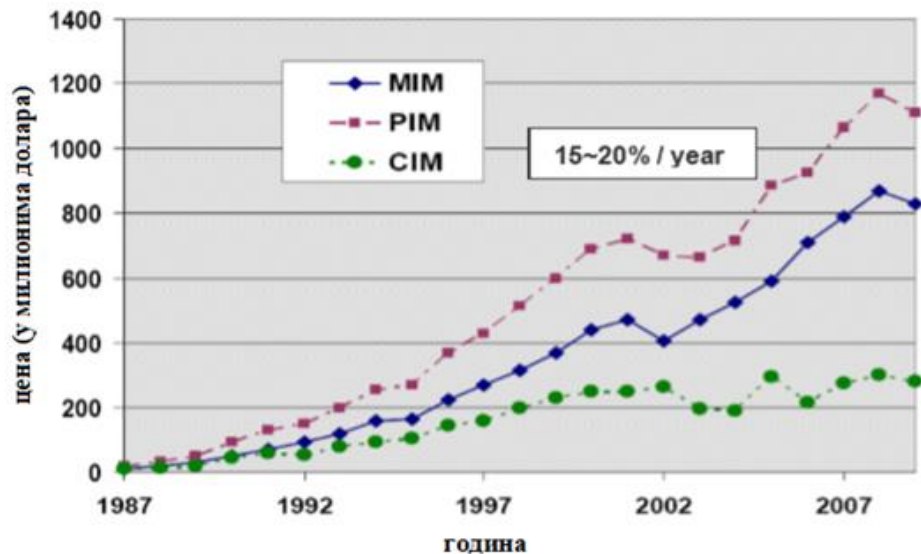
Различити поступци производње су развијени на бази металургије праха, као што су бризгање метала или керамике (МІМ и СІМ технологија), вруће изостатичко пресовање (НІР), вруће пресовање, врућа екструзија, распршивање итд. За све ове поступке допринео је развој индустрије праха, који има могућност прераде различитих напредних материјала у сложене облике, баш као у процесима бризгања пластике.

РМ технологија (en. Powder Metallurgy) је први пут кориштена 1930-тих година, за бризгање керамичких материјала који су се користила као изолација за неке делове у аутомобилској индустрији. Процес је показао боља својства од ливења па се улагало у даљи развој оваквог поступка. Овај процес је ушао у масовну производњу захваљујући способности производње сложених облика које је немогуће добити другим технологијама, нарочито за врло мале компоненте у великим серијама. На слици 1. приказан је развој технологија инјекционог бризгања метала током времена, од 1996. године.



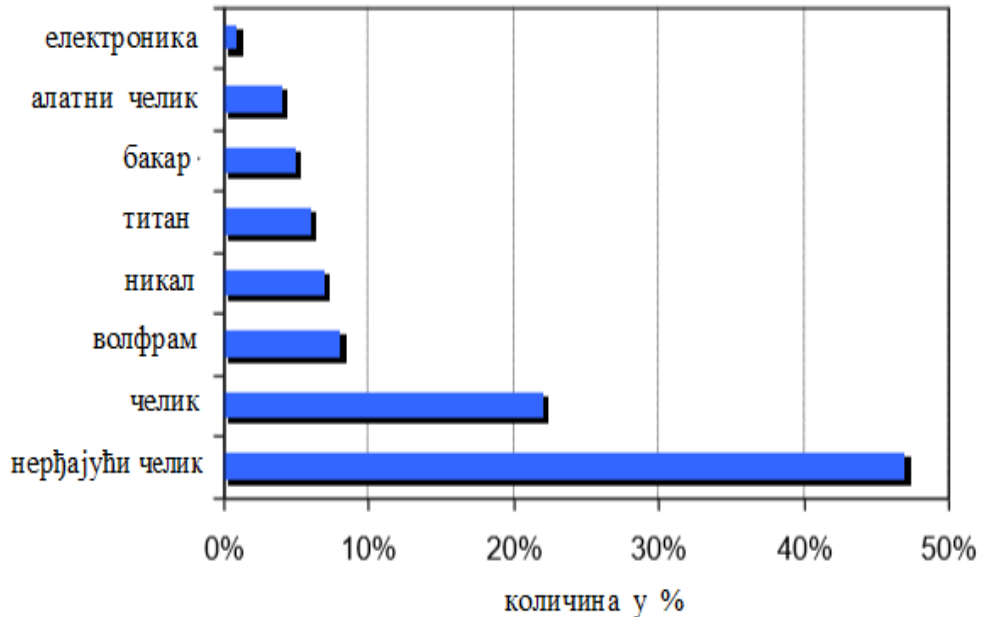
Слика 1. Хронологија развоја инјекционог бризгања метала [1]

У поређењу са металима, керамика је у домену металургије праха мање заступљена. На слици 2. се може видети прогресиван развој различитих технологија бризгања прахова током времена, као и пораст од 20% у приходима по години. Пошто је МІМ доминантнији начин производње у РІМ-у, велика пажња је усмерена на разумевање свих промена које се дешавају током МІМ процеса производње.



Слика 2. Развој технологија металургије праха [2]

Када је реч о МИМ процесу, током времена употребљавани су различити материјали са различитим својствима за производњу металног праха, док се није дошло до најоптималнијег решења, које подразумева и квалитет и економичност. Тако се формирала и табела најзаступљенијих метала у МИМ праховима.



Слика 3. Глобално коришћење металних прахова у МИМ процесима [1]

Прахови за РИМ производњу могу бити најразличитијих димензија и својстава, зависно од производње и начина употребе. Карактеристике праха ће се одразити на касније карактеристике финалног производа, па је важно контролисати састав праха током

целог процеса производње. У току процеса производње карактеристике честица праха се мењају и те промене се морају пратити и контролисати за добијање што бољих особина. Обично се у РМ производњи прах прерађује у виду гранулата који се користе као сировина за многе машине. Ти гранулати такође могу имати најразличитије облике и димензије у зависности од намене.

У металургији праха постоје многи начини производње, а најчешћи начини производње употребом прахова приказани су на слици 4. На слици се могу видети и поступци који не захтевају синтеровање као посебну фазу обраде.



Слика 4. Шема поступака у металургији прахова [3]

Синтеровање се јавља код већине поступака, а подразумева обраду полупроизвода топлотом у међуфази, ради добијања што бољих физичких и хемијских особина производа.

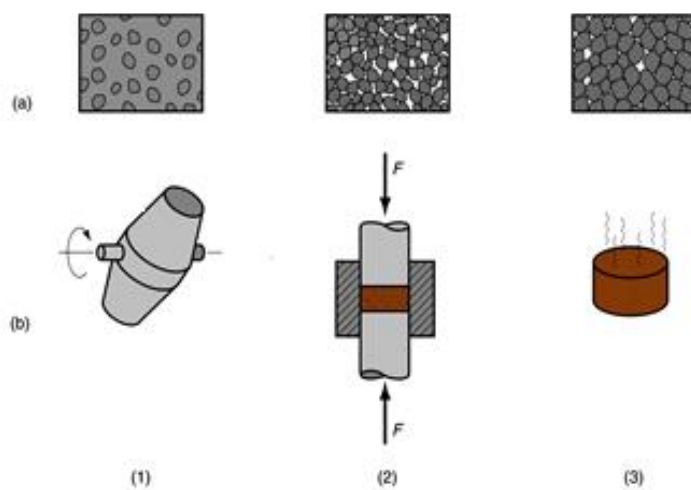
3. ПОСТУПЦИ СА СИНТЕРОВАЊЕМ

3.1. Конвенционално пресовање у калупу

По набавци прахова, код конвенционалног поступка РМ (пресовање а потом синтеровање), спроводе се три корака:

- мешање-формирање хомогене мешавине прахова (мешавина обухвата прашове различите величине зрна и прашове различитих хемијских својстава),
- паковање-збијање мешавине прахова уз обликовање задате геометрије,
- синтеровање-загревање компактираног комада до температуре испод топљења како би се успоставиле круте везе честица и тиме очврснуо комад.

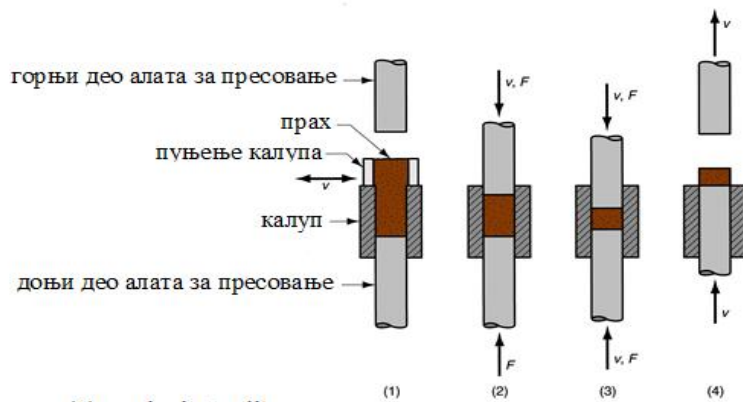
По потреби, обављају се додатне операције којима се повећава тачност, густина или неко друго својство. На слици 5. дата је шема пресовања у калупу и промена структуре честица приликом пресовања. На слици 6. приказани су делови пресе за пресовање плоче.



Слика 5. Конвенционално пресовање прахова у калупу (а-стање честица; б-операције: (1) мешање (2) пресовање (3) синтеровање) [3]

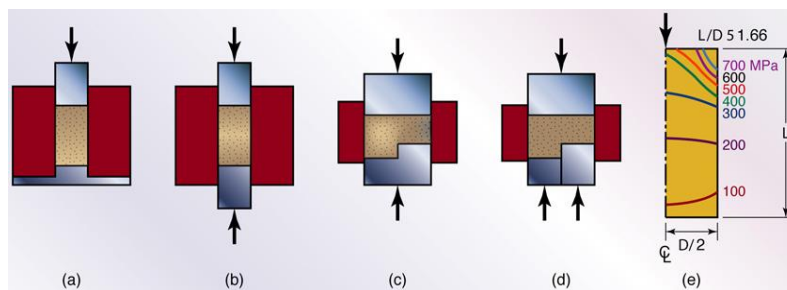
Код пресовања се под високим притиском прах разбија и обликује се жељена геометрија:

- код конвенционалне операције пресовања насправне пресе збијају прах који се налази у калупу,
- комад се након пресовања назива „зелени комад“, при чему се са „зелени“ наглашава како поступак није довршен,
- чврстоћа зеленог комада је довољна да би се њиме могло руковати, али је далеко мања од оне која се постиже након синтеровања.



Слика 6. Алати и поступци за пресовање плоче (1) пуњење калупа са прахом аутоматизованом хранилицом; (2) почетак пресовања; (3) крај пресовања (4) избацивање комада) [3]

Густина металног праха зависи од материјала и начина пресовања. Запажене су значајне разлике код једностраног деловања пресе и двостраног деловања пресе на прах. Углавном је пожељна већа густина производа, али постоје и случајеви када се захтева мања густина и другачија својства. На следећој слици приказане су изобаре у комаду након пресовања са једностраним деловањем пресе. На слици 7. је дата расподела притисака у калупу приликом пресовања, а на слици 8. приказана је механичка преса за пресовање прахова.



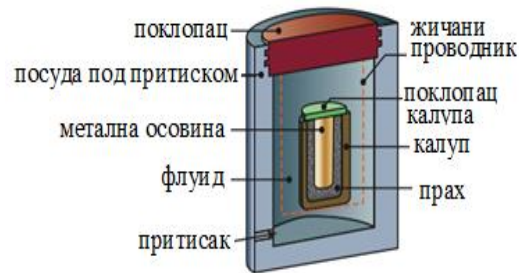
Слика 7. Шема пресовања са расподелом притисака [3]



Слика 8. Механичка преса за прах [1]

3.2. Хладно изостатичко пресовање – CIP

Код хладног изостатичког пресовања (en. Cold Isostatic Pressing), прах се пресује деловањем притиска флуида од 400 МПа до 1 ГПа. На слици 9. приказана је шема CIP поступка.



Слика 9. CIP поступак [3]

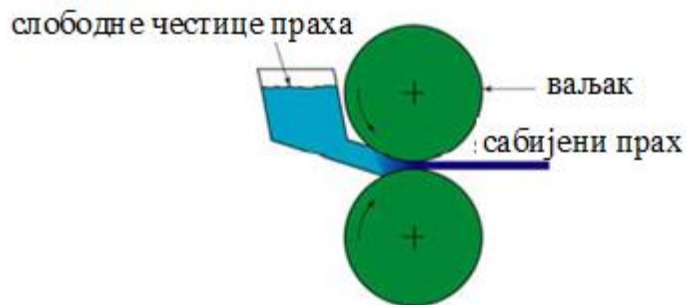
Код овог поступка се металним прахом пуни простор између крутог металног језгра и зида калупа, који је од еластичног материјала (гуме). По пуњењу, гумени калуп се спушта у флуид који се након тога излаже дејству притиска. Такав поступак се примењује код израде цеви од металног праха. Шема израде цеви овим поступком приказана је на слици 10.



Слика 10. Израда цеви CIP поступком [3]

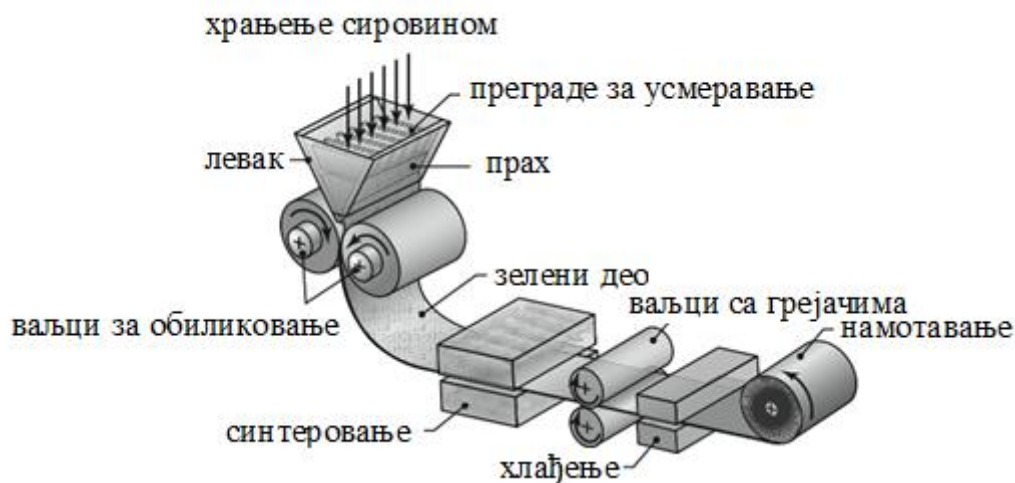
3.3. Сабијање ваљањем

Поступак сабијања ваљањем примењује се за израду зелених трака. На тај начин се израђују траке од легура за меке магнете. Честице праха пролазе кроз систем ваљака са грејачима који их сабијају формирајући танке нити (слика 11.).



Слика 11. Пресовање ваљањем [3]

Након овог поступка следи синтеровање у пећи. Намена преграда за усмеравање је равномерно распоређивање праха по целој ширини пресоване траке. На слици 12. приказан је процес производње трака пресовањем.



Слика 12. Циклуси при пресовању ваљањем [4]

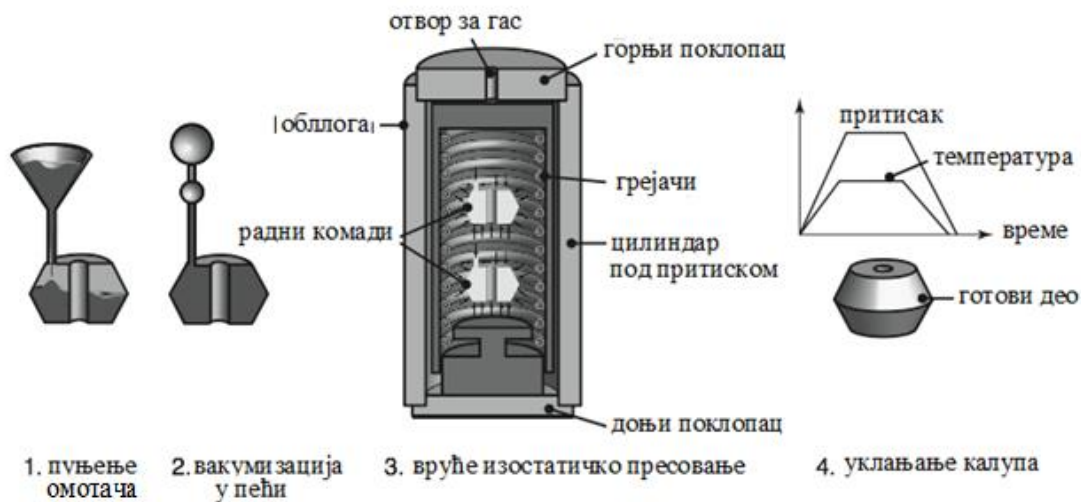
4. ПОСТУПЦИ ОБЛИКОВАЊА ПРАХА СА ИНТЕГРИСАНИМ СИНТЕРОВАЊЕМ

4.1. Ковање праха

Поступку ковања праха - PF (en. Powder Forging) претходи израда зеленог комада конвенционалним пресовањем у калупу. Након тога следи топло ковање у затвореном калупу како би се довољном деформацијом метала готово потпуно елиминисале поре. Поступак се може применити на метале који се топло кују. Примена је ограничена на производњу средњих до великих делова у великим количинама, нпр. аутомобилска индустрија.

4.2. Вруће изостатичко пресовање

Код врућег изостатичког пресовања - HIP (en Hot Isostatic Pressing) обједињене су операције пресовања и синтеровања. Шема врућег изостатичког пресовања дата је на следећој слици.

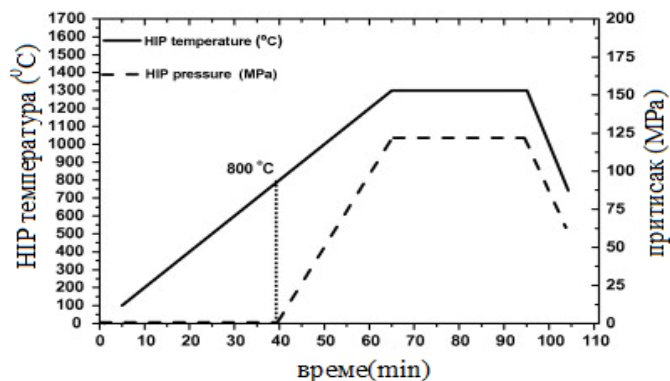


Слика 13. Фазе процеса [3]

У HIP поступцима се користе омотачи (en. envelope) одређеног облика, који се након операције врућег изостатичког пресовања уклањају. Омотачи се израђују:

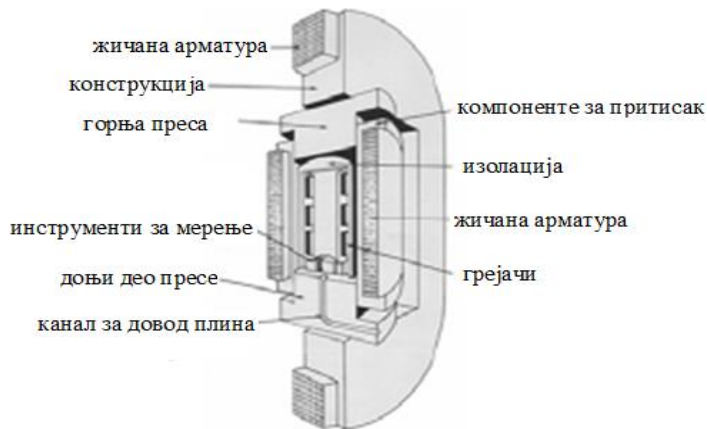
- од металног лима (код једноставних облика),
- од стакла (код сложених облика).

Код врућег изостатичког пресовања прах се пресује и загрева. Током процеса притисак се може мењати од ниског вакуума до 2000 Вага, а температура од температуре околине до 2200 °С. На слици 14. приказан је график параметара HIP поступка, и то температуре, притисака и времена.



Слика 14. График притиска и температуре код HIP поступка [1]

Како би пећ у којој се спроводи HIP поступак могла издржати високе притиске, она је радијално и аксијално ојачана сноповима жица. На слици 15. дат је приказ пећи која се користи за спровођење HIP поступка, као и њени основни делови.



Слика 15. Пећ за спровођење HIP поступка [1]

Поступак HIP се примењује за:

- уклањање порозности одливака,
- регенерацију делова,
- дифузионо спајање различитих метала те метала и керамике.

Предности НІР поступка су у томе што се могу делови израђивати у коначном или готово коначном облику и комади сложених геометрија из тешко топивих метала (при високим температурама и притисцима доведени су у пластично стање).

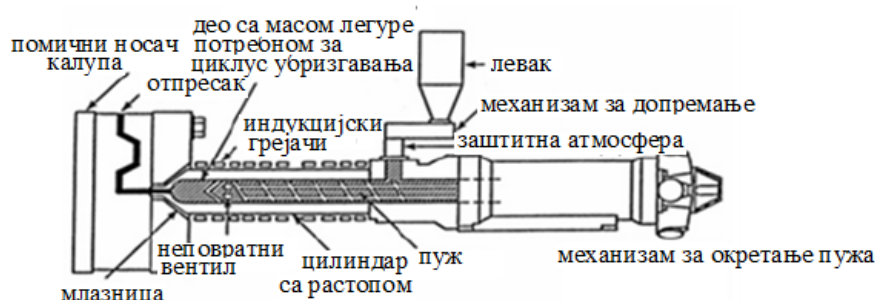
4.3. Инјекционо обликовање у получврстом стању

Од неколико инјекционих поступака обликовања у получврстом стању (engl. Semi-Solid Injection Moulding) најпознатији је Thixomoulding – поступак пресовања из тестастог стања, која обједињује елементе ливења и инјекционог пресовања полимера. Овај поступак је најпре испитан и уведен за Mg легуре, а могу се још обликовати Al и Zn легуре. За разлику од МІМ поступка овде се не користи везиво за метални прах и није потребно синтеровање.

Фазе поступка обликовања у получврстом стању су:

- мешање – у овој фази магнетно и хидродинамичко мешање легуре на границама фаза омогућава структуру без дендрита,
- загревање – у другој фази метални полупроизвод се индукцијски греје. Кад постигне тестасто стање он садржи једнаке количине растопа и крутих делова,
- обликовање – у трећој фази се с тим тестастим материјалом формира у одговарајућем калупу готови део.

На слици 16. приказана је машина за поступак обликовања у получврстом стању и њени основни делови.



Слика 16. Машина за поступак получврстог обликовања [4]

Техничке и економске предности овог поступка омогућавају производњу врло компликованих и разноликих производа из подручја компјутерских компонената, мобилних телефона, разних оптичких апарата и камера, аутомобилне и авио-индустрије. Бројне су предности овог поступка:

- повећана тачност и искористивост материјала у односу на ливење под притиском и прецизно ливење,
- даје лагане, чврсте и жилаве производе, а при употреби легура магнезијума остварује добру изолацију од радио-фреквенцијских таласа,

- даје производе високог квалитета израђене на готову меру са уским толеранцијала и смањеним стегањем материјала, смањеним заосталим напонима и деформацијама производа,
- омогућује производњу танких зидова до 0,5 mm дебљине,
- даје високу поновљивост и код комплексних облика.

Поред ових поступака производње употребом прахова, постоје и многи други поступци чији број стално расте захваљујући добрим особинама које дају овакви производи. У РМ технологији се све више употребљавају метали као основа за прах са изузетно добрим механичким својствима. Овој технологији претходиле су технологије употребе метала у формирању различитих композита, као комада са превлаком итд. Након тога метал у композитима постаје присутан у све мањим конадима, док се није развила металургија праха и МПМ технологија.

5. ММС – КОМПОЗИТИ СА МЕТАЛНОМ МАТРИЦОМ И ПОЈАВА МІМ ПРОИЗВОДЊЕ

Композити са металном матрицом су све више предмети инжењерског интереса зато што боље подносе рад при високим температурама од њихових основних метала и могу се обликовати тако да се добије већа чврстоћа, крутост, топлотна проводљивост, отпорност на абразију и димензијска стабилност. У табели 1. дата је упоредна анализа различитих поступака металургије праха по особинама производа и типу.

карактеристика	конвенционално пресовање и синтеровање	МІМ	НІР	РІ
количина производње	>5000 (А)	>500 (С)	1...1000 (Е)	>10000 (А)
сложеност облика (А,В,С)	С	А	В	С
маса-величина, kg	<2,3 (С)	<0,12 (D)	0,23...2250 (А)	<0,23 (С)
димензионе толеранције	±0,025 (А)	±0,075 (С)	±0,635 (Е)	±0,038 (В)
густина	D	В	А	А
механичка својства	80...90% од кованих	90...95% од кованих	већа него код кованих	иста као код кованих
трошкови, \$/kg	1,1...11 (А)	2,2...22 (С)	>220 (Е)	2,2...11 (В)

Табела 1. Упоредна анализа поступака металургије праха (А-одлично; В-врло добро; С-добро; D-довољно; Е-лоше) [1]

У ММС-у матрица је углавном легура, ређе чисти метал, која се меша са високолегираним угљеничним, металним или керамичким материјалима. Ови додаци имају улогу механичке и хемијске заштите.

Насупрот полимерним композитима, ови материјали су незапаљиви и нимало нису осетљиви на органске разређиваче. Додаци могу чинити од 10 до 60% овог композита.

Додаци могу бити у облику:

- континуираних влакана (угљеник, силицијум-карбид, бор, алуминијум-оксид, метали високе тачке топљења),

- дисконтинуираних влакана (силицијум-карбид, честица силицијум-карбида и алуминијум-оксида, титанијум диборида и угљеника).

У табели 17. приказани су најчешћи додаци за очвршћивање који се користе у металургији прахова.

додаци за очвршћивање композита	
континуирана влакна	дисконтинуирана влакна
C, SiC, B, Al ₂ O ₃ , метали високе тачке топљења	честице SiC и Al ₂ O ₃ , TiB ₂ , влакна од Al ₂ O ₃

Табела 17. Типични додаци за очвршћивање [1]

Предност ових производа је у томе што су најистакнутије карактеристике метала видљиве у различитим облицима, метална матрица даје металну природу композиту у смислу топлотне и електричне проводљивости, производних процеса и интеракције са околином.

Процеси производње ММС-а деле се на примарне и секундарне групе. Примарни део производње обухвата процесе којим се синтерују композити од металне матрице и ојачивача. Притом је укључена уградња ојачивача у матрицу у одговарајућој количини и на одговарајућа места и развој одговарајућих веза међу елементима.

Секундарни део производње подразумева додатну прераду примарног композита у коначни део. У неким случајевима оба ступња се одвијају истовремено у зависности од коначног производа и поступака производње.

Избор поступака за производњу композитног материјала зависи од механичких и хемијских особина матрице и ојачивача, дужини и величини влакана, слагању влакана и жељеном размештању влакана, величини, облику и расподели честица.

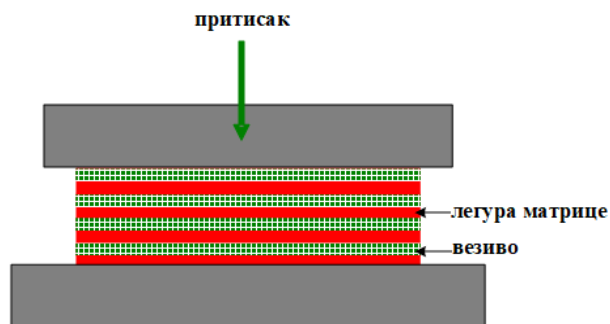
Многи материјали матрице и ојачивача нису компатабилни што се тиче приањања и такви се материјали не могу прерадити у композите без промене контактне површине међу њима. Код неких композита повезаност матрице и додатака је слаба и мора се појачати. Код композита произведених од реактивних састојака треба избећи прекомерну активност на међуграници, која може ослабити својства материјала. Тај проблем обично се решава или површинском обрадом, или превлаком, или променом састава легуре матрице.

5.1. Поступци у чврстом стању

Ови поступци за формирање композита се одвијају при нижој температури с могућношћу добре контроле термодинамике и кинематике граничних површина. Две главне групе поступака у чврстом стању су:

- спајање материјала дифузијом,
- вештачка синтеза (срашћивање).

Овим поступцима претходи наношење материјала матрице на влакно. Дифузијско спајање одвија се при повишеној температури и притиску. На слици 18. приказана је шема спајања материјала процесом дифузије.



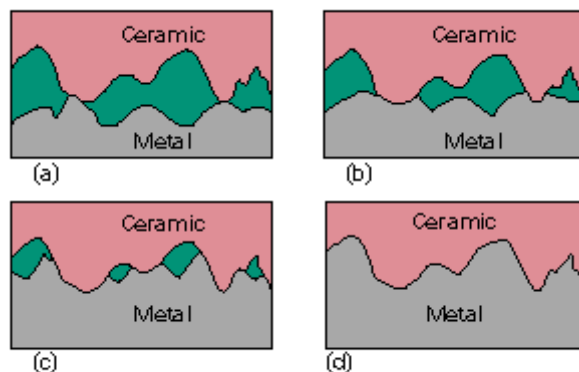
Слика 18. Шема спајања материјала дифузијом [5]

Проблем код овог поступка се може јавити ако дифузија материјала пређе границу која угрожава међуповршину, где се могу јавити крхка подручја. Један од начина за ограничавање времена дифузије је истискивање слоја влакана и матрице кроз алат. Повишене температуре се користе како би се побољшало течење материјала, али се мора избећи прекомерно загревање које би могло подстаћи хемијски напад на влакна.

Главни недостатак овог поступка је што захтева врло чисте површине које се спајају. То обично тражи претходно чишћење материјала и вакумирање. Овим поступком се сједињују Al/B композити.

5.2. Металургија праха

Овим поступком се остварује повезивање праха са честицама, плочицама или влакнима ојачаних низом корака. Ово мешање омогућавају материјали који се називају везивима. Керамичке честице које треба да осигурају високу чврстоћу композита су реда величине 5 μm у просеку, док је величина праха легуре матрице (алуминијум или магнезијум) од 20 до 40 μm у просеку. Разлика у величини честица омогућава стварање мреже малих керамичких честица око већих зрна матрице. Тако настају микроструктурно нехомогена подручја. Даље, стварањем мреже настаје порозност које се мора попунити растапањем материјала током топлог пресовања (слика 19.)



Слика 19. Спајање материјала по фазама (а-велика порозност између материјала који се спајају; б,с-постепено смањивање порозности синтеровањем; д-уклањање порозности након синтеровања) [5]

Ако полазни прах лако оксидира, врло фини оксидни слојеви се таложе на граничним површинама, смањујући значајно ударну жилавост изворног материјала. Превентивни поступци који се примењују су:

- просејавање честица,
- спајање честица са фазом за ојачавање са или без везива,
- топљење и завршно сједињавање истискивањем, ковањем, ваљањем или неком другом топлом обрадом.

ММС делови произведени РМ технологијом одликују се високом квалитетом и својствима као што су чврстоћа и крутост.

5.3. Поступци у растопљеном стању

За што боље повезивање металне матрице и влакана пожељно је да растоп матрице тече у међупросторе влакана да би се осигурало потпуно покривање влакана. За такав поступак користе се дубоке каде које значајно олакшавају производњу, а које се употребљавају у индустрији. Нпр. алуминијумски делови у ММС производњи се штите превлаком титановог диборида. Вlakна с превлаком се затим провлаче кроз каду са растопљеним алуминијумом. Продирање растопљеног алуминијума између влакана осигурава једнако раздвајање влакана од матрице, тј. константну дебљину слоја. Превлака на влакну, као што је титанов диборид, помаже заштиту влакана од хемијске реакције при повишеним температурама. Алуминијумски композити се ојачавају честицама. Најпознатији поступци су:

- ливење у калупу,
- ливење мешањем,
- ливење под притиском,
- ливење у получврстом стању.

- Ливење у калупу најчешћи је од свих ливачких поступака за производњу велике количине делова уз најнижу цену.

- Ливење мешањем је слично класичном поступку код алуминијумских легура, али уз благо мешање растопа ради осигурања равномерне расподеле нпр. SiC честица. Стална контрола температуре растопа потребна је ради избегавања прегрејавања и накнадног стварања карбида.

- Ливење под притиском подразумева полагање порозног керамичког материјала у прегрејани калуп, који ће се касније испунити растопом метала. Помоћу притиска растопљени метал улази у керамички предоблик и настаје чврст композит. Поступак смањује утршак материјала и енергије, производећи делове на коначну меру и нуди могућност селективног ојачавања.

- Ливење у получврстом стању је поступак сличан ливењу мешањем, с разликом што се честице додатака мешају у метал који је у получврстом стању. За мешање је потребна већа сила од класичне методе ливења мешањем.

5.4. Инфилтрација метала без притиска (Pressureless Metal Infiltration)

Овај поступак је предвиђен за инфилтрацију честица које се налазе уроњене у матрицу. Обично се користи за инфилтрацију алуминијума у масу керамичких честица за ојачавање.

Та инфилтрација је праћена стварањем јединствене површинске превлаке на честицама које служе за ојачање. Превлака омогућује потпуно хидрирање честица и повољне особине за течење растопа, важна обележја за даљу употребу у ливењу.

Изостанак хидрирања може узроковати подебљање и нестабилност, јер композит садржи честице без превлаке.

Типичан удео додатака за ојачавање је 40 до 50% , а остатак је алуминијумска легура матрице. Концентрат се примењује за масовну производњу ливењем. Ливаонице које користе овакав концентрат могу га саме разредити јефтиним алуминијумом. Разређен композит припремљен за ливење обично садржи 10 до 30% керамичких честица, зависно о захтевима и начину производње. На тај начин се легура матрице и додаци могу варирати и потпуно контролисати. Овако се производе дискови за кочење код аутомобила. Технологије које користе керамичку матрицу су заштићене низом патената. У свету постоји више од 2700 патената из те области. На слици 20. приказани су начини производње и употребе ММС композита у различите сврхе.



Слика 20. ММС производња инфилтрацијом без притиска [5]

Значајна примена поступка инфилтрације без притиска је у производњи делова за паковање, подлоге и помочни елементи за електронске компоненте од SiCp/Al композита. Притом су типични захтеви:

- мали коефицијент топлотног ширења (да би се смањила механичка напрежања усмерена на електронски уређај током склапања и рада),
- висока топлотна проводљивост (ради смањења деформација),
- мала густина за минималну тежину.

За разлику од класичних алуминијумских легура, композити имају, због облика и удела честица SiC, знатно смањен коефицијент топлотног ширења и већи моду еластичности, са мало или без утицаја на топлотну проводљивост и густину. Због могућности мењања механичких и топлотних својстава, поступак инфилтрације без притиска пружа и низ других предности у смањењу цене и повећању поузданости у односу на класичне методе израде компоненти:

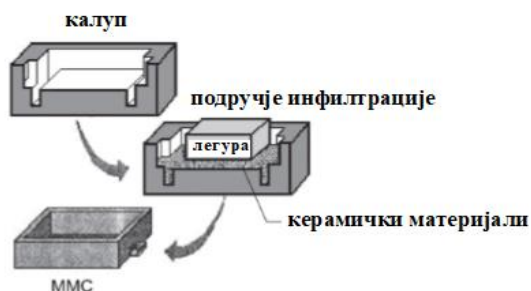
- могућност израде сложених делова у завршни или готово завршни облик,
- обликовање рубова ласерским снопом или заваривањем,
- компатабилност са различитим превлакама,
- могућност *in situ* повезивања чиме се избегавају грешке у структури.

Специфична крутост (моду еластичности подељен са густином) SiC/Al композита може бити већа за 3,2 пута од оне неојачаног челика, алуминијумских и титанијумских легура. Та својства, повезана са топлотном проводљивошћу и малим коефицијентом топлотног ширења, чине ММС процесе идеалним решењем за компоненте које захтевају велику крутост и димензијску стабилност, као што су:

- аутомобилске кочнице,
- компоненте које се користе у оптици,
- делови рачунара.

Алуминијумски метални композити ојачани крупнијим честицама SiC показују изванредну отпорност на хабање, а они са честицама Al_2O_3 су потенцијални материјали за примену у производњама где се тражи велика чврстоћа и жилавост.

Композити Al_2O_3/Al су крути и чвршћи од изворне легуре и задржавају добру ударну жилавост. На слици 21. дата је шема производње компонената у електроници.



Слика 21. Шема производње електронских компонената [5]

5.5. Поступак наношења честица распршивањем

Овај поступак укључује атомизацију растопа и распршивање капљица растопљеног метала на подлогу и очвршћивање получврстих капљица на подлози. У поступку распршивања метална легура се топи и излива у загрејану посуду. Растоп тече кроз излаз на дну посуде и према планском распршивачу.

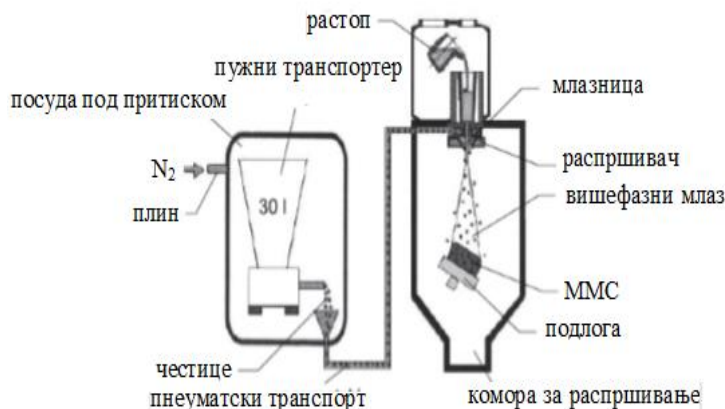
Плински млаз велике брзине разлаже метал у ситне капљице које се снажно убрзавају према подлози. На подлози се капљице згушњавају и стварају слој приближно једнаке дебљине и коначног облика, за разлику од металургије праха, где се поступак одвија у међуфазама. Брзина очвршћивања није тако велика и има две важне предности:

- равномерна производња,
- равномерно укључивање додатака за ојачање у матрицу легуре.

ММС инготи се лију додавањем честица за очвршћавање – угљеник, Al_2O_3 , SiC у метални млаз. Потребна је пажљива контрола услова дозирања да би се осигурала равномерна расподела честица. На следећој слици шематски је приказан уређај за распршивање. Мешање и згушњавање две компоненте овим начином назива се распршивање композита са металном матрицом.

Материјал има металну матрицу у којој су додате друге компоненте у облику честица. Квалитет материјала се може прилагодити потребама примене, као нпр. од крхког до жилавог и то врстом, количином, обликом и расподелом честица за ојачавање.

Главна намена производње ММС-а је побољшање отпорности на хабање, отпорности на повишене температуре и побољшање модула еластичности, посебно алуминијумских и бакарних легура, а у последње време и суперлегура. Шема наношења честица распршивањем приказана је на слици 22.



Слика 22. Шема поступка распршивања [5]

5.6. Очвршћивање и микроструктура

На величину зрна композита добијених овим технологијама може утицати удаљеност између честица, ако је пораст зрна ограничен сударањем честицама.

Код метала осетљивих на пораст зрна као што је магнезијум, коначна величина зрна каткад је превелика, што погоршава механичка својства. Због тога се при развоју низа инжењерских легура користио поступак брзог очвршћивања за постизање микроструктуре која побољшава високотемпературна својства и отпорност на корозију. Микроструктура ових легура истиче се уједначеним саставом, уситњеним микросастојцима и задржаним метастабилним фазама. Велико уситњење ливене структуре постиже се брзим хлађењем или брзим растом дендрида током очвршћавања. Повећана уједначеност састава постигнута је краћим дифузијским путем између подручја микросегрегација. Примена поступака брзог очвршћивања код композита са керамичким материјалима и металном матрицом подразумева употребу високочврстих и високотемпературних легура као материјала матрице. На слици 23. приказан је поступак брзог очвршћивања код производње трака.

Постоје три начина за коришћење брзог очвршћивања у производњи композита:

- атомизација,
- производња трака,
- производња металних листића.



Слика 23. Поступак брзог очвршћивања (RSP) [5]

Последњи начин очвршћивања је најперспективнији, јер довољно велика брзина очвршћивања омогућује добијање листића дебљине око 40-60 μm . Листићи добијени овим начином широки су и дугачки 6 до 8 mm. Листићи се могу сјединити у композитни производ без даљне промене величине. Траке, насупрт томе, захтевају даљу обраду ради смањења њихове величине, што може довести до оштећења и оксидације.

При атомизацији, велика брзина очвршћивања се може постићи ако су атомизиране честице врло мале. Нажалост, велика површина честица резултира великим уделом површинских оксида, који су штетни за ударну жилавост. Добијање висококвалитетног металног праха поступком атомизације замењено је предлеганим ММС уз знатну уштеду у цени полазног материјала. Оптимални притисак у комори са растопом код ове производње осигурава равномерну расподелу материјала, Нпр. за SiC/Mg композитни растоп оптималан притисак је отприлике 27 kPa уз употребу отвора реда величине 1,3 mm. Уз те параметре керамичке честице SiC су равномерно распоређене унутар материјала.

5.7. Инјекционо бризгање метала (Metal Injection Moulding – MiM)

Инјекционо бризгање праха је поступак познат под крилатицом PIM – Powder Injection Molding. Код овог поступка сједињене су предности различитих технологија. Од класичне РМ преузета је могућност вишеструког легирања мешањем и пресовањем најразличитијих прахова, као и могућност производње делова од неливљивих или високорастопних метала и њихових легура.

Од прераде полимера користи се могућност израде производа сложеног облика овим поступком.

Инјекционо бризгање метала или MiM технологија користи се за производњу делова комплексних облика, који у већини случајевна не захтевају накнадну обраду. MiM технологија је спој класичне металургије прашкастих материјала и технологије инјекционог песовања пластике. Принцип технологије инјекционог пресовања пластике омогућава обликовање компоненте и остваривање комплексности облика, док синтеровање омогућава постизање одговарајућих механичких својстава производа. MiM процес се састоји од четири основне фазе:

- мешање и гранулација,
- инјекционо бризгање,
- издвајање везива,
- синтеровање.



Слика 24. Шема MIM процеса [7]

MiM процес почиње мешањем металног праха у хомогену смесу која се у MiM технологији зове „feedstock“. Обично је величина честица у распону 0,1-20 μm , а количински удео металног праха се креће од 60% до 65%. Након што се у фази мешања и гранулације постигне feedstock са одређеним хомогеним својствима у облику пелета, следи фаза инјекционог бризгања. У овој фази се гранулирани feedstock загрева до температуре топљења, а потом се инјектира у затворени калуп. Када се калупна шупљина испуни до одређеног процента, најчешће 95-99% - следи фаза деловања накнадног притиска. Након што компонента довољно очврсне, врши се отварање калупа и изbacивање. Профилисана компонента која се добија назива се „зелени део“. Након изbacивања зеленог дела из калупа следи фаза издвајања везива. Везиво треба да се издвоји као флуид-течност или пара, без утицаја на форму и облик дела. Након што се везиво потпуно издвоји добија се порозна компонента, која се у MIM технологији назива „смеђи део“. После издвајања везива следи синтеровање као завршни корак. Током поступка синтеровања компоненте су изложене високим температурама, што доводи по повећања густине. Компоненте се током фазе синтеровања скупљају за око 15%. Густина материјала компоненте је близу апсолутне теоријске, око 95%, а искориштеност материјала је готово 100%, док постоји и регранулација материјала уколико је било неуспешно обликовање током производње. Највећи значај се придаје фази инјектирања, јер се најчешће грешке јављају због погрешно постављених параметара у овој фази. Грешке које се појаве не могу се отклонити у наредним фазама процеса које следе.

Упоређујући својства производа израђених МИМ поступком са производом израђеним поступком ливења или ковања, МИМ поступак је идеалан за производњу сложених делова. Инјекционо брызгање метала се у протеклој деценији показало као конкурентни начин производње за мале и прецизне производе, који би били скупи за производњу другим методама.

МИМ поступак обједињује сложеност облика и структурне предности метала. Мешавина праха и везива која се убризгава у калуп мора бити хомогена. Прахови за МИМ су углавном сферичног облика и много ситнији од оних за конвенционално сабијање у хладном калупу:

- МИМ прашкови(10 до 20 μm),
- конвенционални прах(50 до 150 μm).

Прашкasti материјали добијају се поступком познатим под именом металургија праха - . powder metallurgy (PM).

Металургија праха је технолошки поступак помоћу којег се производе чврсти метални делови сједињавањем честица прашка једног или више метала. РМ претвара честице прашка специфичне величине и облика у чврсте, прецизне и високо квалитетне производе. Два основна недостатка РМ поступка су :

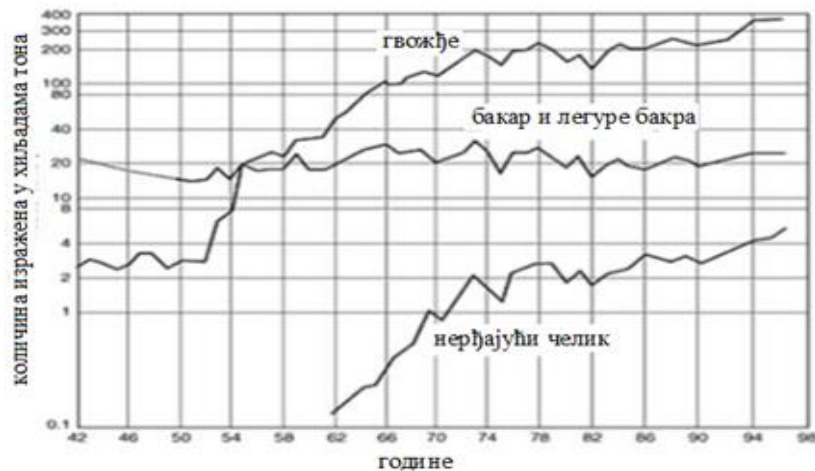
- релативно висока цена производа дигијених металургијом праха,
- појава порозности која се умањује различитим поступцима.

И поред тих недостатака овај поступак има врло велику примену у аутомобилској индустрији на коју одлази између 60 и 70% укупне РМ производње (слика 25).



Слика 25. Употреба РМ производа по индустријским гранама у САД-у и Канади [8]

На слици 26. се могу видети материјали који су се користили у РМ производњи, као и пораст заступљености производње од нерђајућег челика од 60-их година па на даље.



Слика 26. Производња РМ производа према врсти материјала у САД-у и Канади [1]

Производња РМ производа састоји се од:

- производње праха (атомизација),
- бризгања или пресовања,
- срашћивања и повезивања.

Осим поступка атомизације (највећи удео у преоизводњи) прах се производи:

- хемијским поступцима,
- електролизом.

Честица праха је дефинисана као најмања и више недељива јединица. Углавном се у РМ користе честице веће од честица чађи (0,01 до 1 μm), али мање од зрнаца песка (0,1 до 3 mm). Многи метални прашови имају димензије честица од 25 до 200 μm .

температура у материјалу, °C	100-200
температура млазнице, °C	80-200
температура калупа, °C	20-100
брзина ротације пужа, радијан у минути	35-70
инјекциони притисак, МПа	0,1-130
притисак паковања, МПа	0-10
време пуњења, s	0,2-3
време паковања, s	2-60
време хлађења, s	18-45
време циклуса, s	8-360

Табела 2. Параметри МИМ процеса [3]

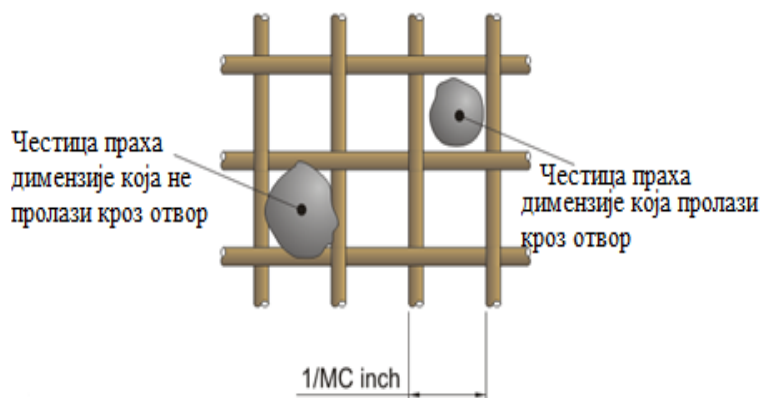
6. PИM ПРАХОВИ

Прах – фино уситњене круте честице. Инжењерски прахови обухватају метале и керамике. Геометријска својства су:

- димензије и расподела честица,
- облик и унутрашња грађа честица,
- површина честица.

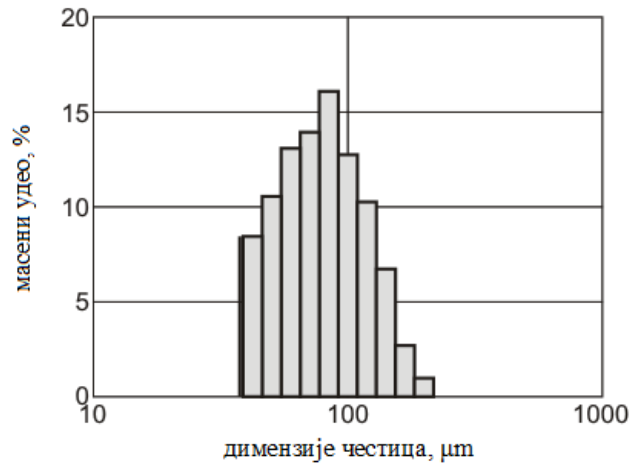
6.1. Димензије и расподела честица

При одређивању димензија и расподела честица, прах се просејава кроз серију сита различитих димензија квадратних отвора. „Број *mesh-a*“, *MC* (en. mesh count – број отвора) описује број отвора сита по инчу (1 инч = 25,4 mm). Према томе, са *MC* = 100 означава сито које има 100 отвора по инчу, односно $100 \times 100 = 10\,000$ отвора по квадратном инчу. У *SI* јединицама је то 4 отвора/mm, односно 16 отвора/mm². Што је већи *MC* то су ситнији отвори сита и кроз њих ће пропадати ситније честице. Производе се прахови димензија честица $10-6 \div 0,1$ mm. На слици 27. приказана је шема просејавања PИM прахова.

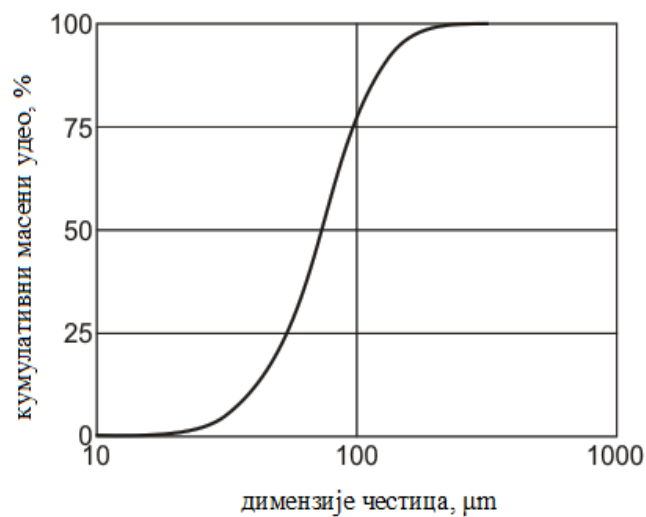


Слика 27. Честице праха и сито за сортирање [7]

У металургији прахова најпожељније су димензије честица реда 100 μm због повољних физичких и хемијских особина. Такође, вискозност честица и њихово слагање при пресовању имају веома велику улогу. На сликама 27. и 28. дат је однос димензија честица и масеног удела у композиту.



Слика 28. Однос димензија честица према масеном уделу у композиту [9]



Слика 29. Зависност димензија од кумулативног удела у композиту [9]

6.2. Облици и грађа честица

Облици и грађа честица у великој мери зависе од технологије њихове производње. Постоје најразличитији облици и димензије честица са различитим механичним особинама (слика 30).



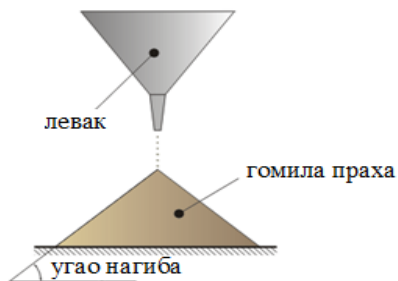
Слика 30. Честице праха [7]

Технолошка својства праха:

- способност течења – зависи од величине и облика честица и додатних везива, а од способности течења зависи ефикасност попуњавања калупа,
- способност сабијања – зависи од величине и облика честица, а од прахова са већим способностима сабијања се добијају производи веће густине и чврстоће,
- способност синтеровања – показатељ је повећавања чврстоће веза међу честицама прха, смањења порозности и повећања густине производа при синтеровању.

6.3. Узајамно трење и течење честица

Узајамно трење честица може се утврдити према углу нагиба гомиле праха која се формира при изливању праха кроз уски левак. Већи углови указују на веће узајамно трење честица. Шема одређивања трења међу честицама дата је на слици 31.



Слика 31. Одређивање узајамног трења честица [4]

Закључци при одређивању узајамног трења:

- мање димензије честица формирају мањи угао-имају веће узајамно трење
- честице праха сферног облика имају најмања узајамна трења
- са одступањем облика честица од сферног расту њихова узајамна трења

6.4. Густина праха

Треба разликовати:

- Стварну густину – масу нето запремине честица праха. Нето запремина би се могла добити топљењем /скрућивањем праха у чврсту супстанцу без пора.
- Запреминску густину – масу бруто запремине насутих честица праха. Бруто запремина је већа од нето запремине због присутности празних простора између честица, па је заперминска густина мања од стварне густине.

Фактор паковања добија се поделом запреминске густине са стварном густином (која је већа од запреминске).

фактор паковања = запреминска густина / стварна густина <1

Према томе, фактор паковања је увек мањи од 1.

- типичне су вредности фактора паковања прахова пре компактирања 0,5 - 0,7,
- када су у праху присутне честице различитих величина, ситније честице се уклапају у међупросторе које формирају веће честице повећавајући тиме фактор паковања,
- фактор паковања се може повећати вибрирањем праха, што доводи до већег слегања,
- притисак сабијања праха у великој мери повећава фактор паковања услед прераспоређивања и деформисања честица.

Порозност – однос запреминска пора (празних простора) према бруто запремини.
порозност + фактор паковања = 1.

Одређивање порозности компликује присутност пора у самим честицама. Када су честице без пора горња једнакост је тачна.

Прахови материјала који се користе у РИМ су скупљи од комадних материјала, јер се за добијање прахова морају улагати додатне енергије.

У спровођењу процедуре РИМ прах користи другачији хемијски састав.

1. Елементарни – садрже само један хемијски елемент и користе се када је потребно постићи високу чистоћу производа. Уобичајни су елементарни прахови од:

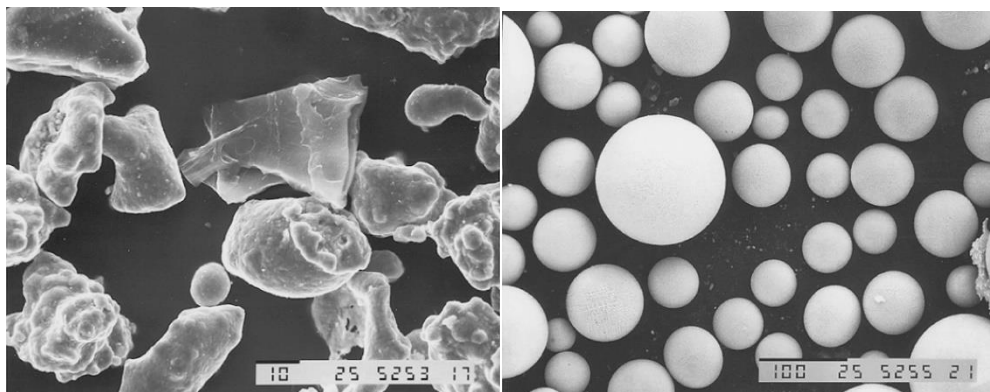
- гвожђа,
- алуминијума и
- бакра.

2. Смесе – за добијање специјалних легура, које је тешко добити на конвенционалне начине. Мешају се честице више елементарних прахова. Пример су алатни челици.

3. Предлегирани прахови – састав честица праха одговара по саставу легури коју је тешко добити мешањем честица више елементарних прахова. Уобичајени су предлегирани прахови од:

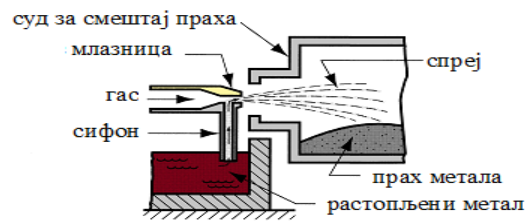
- нерђајућег челика,
- одређене легуре бакра и
- брзорезни алатни челици .

На слици 32. се могу видети значајне разлике у структури и паковању честица различитих материјала добијених истим поступком.



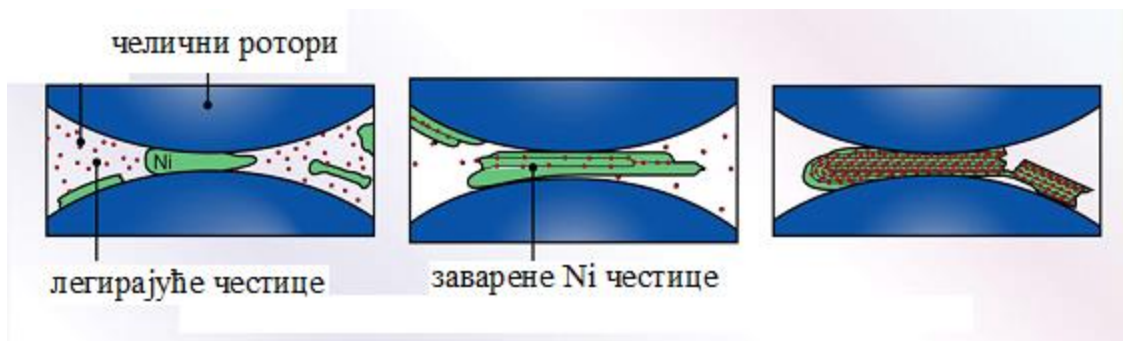
Слика 32. Честице праха Fe добијеног атомизацијом и Ni праха суперлегууре добијеног атомизацијом ротирајуће електроде [3]

Поступак за добијање сличних честица атомизацијом приказан је на слици 33.



Слика 33. Поступак атомизације [6]

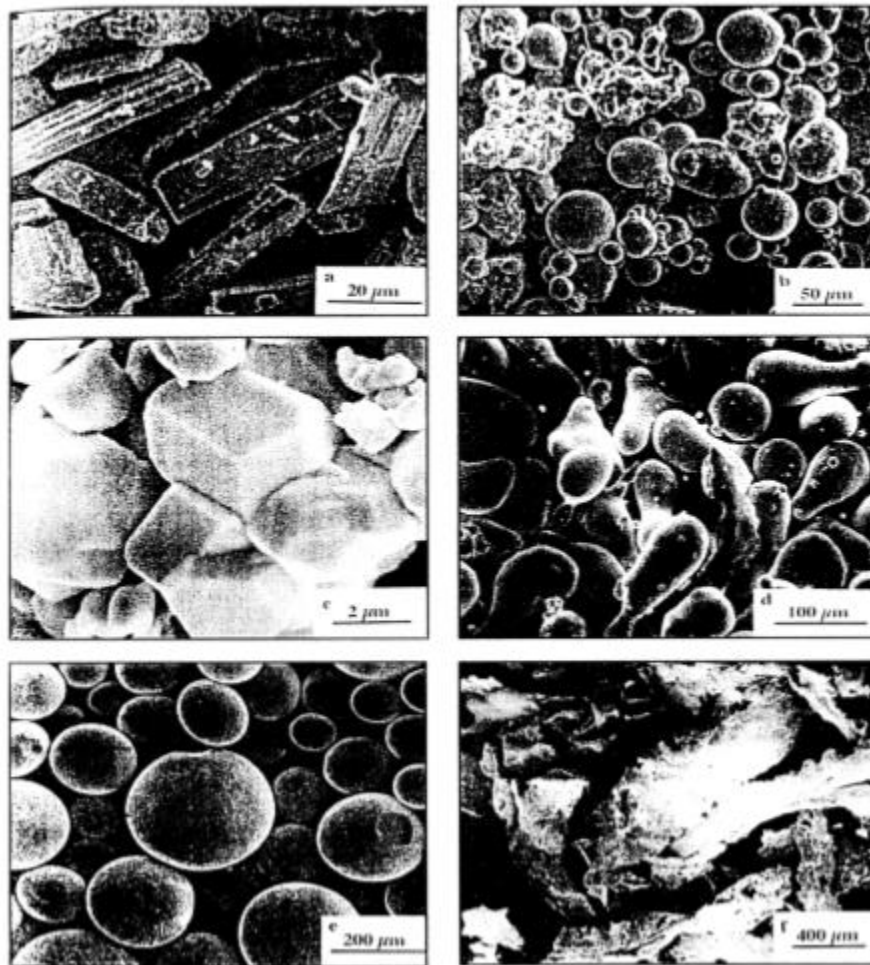
На слици 34. приказано је механичко легирање крупнијих честица никла са ситнијим честицама. Честице никла пролазе између челичних кугли и пресују је. Истовремено се додају легирајуће честице које се утискују у њихову површину. Током времена, услед накнадне обраде, ломљења и заваривања додатне ситније честице се равномерно распоређују у крупнијим честицама никла.



Слика 34. Механичко легирање честица никла [5]

7. ПОНАШАЊЕ ЧЕСТИЦА МАТЕРИЈАЛА ТОКОМ МІМ ПРОЦЕСА ПРОИЗВОДЊЕ

У зависности од поступка производње, материјала, облика и величине – честице показују различите особине током процеса производње. Мења се физичка и хемијска структура честица, а нарочито њихова повезаност у компоненти. Када је о томе реч, углавном је код свих поступака циљ што боље повезивање честица, што повољнији начин везивања честица различитих материјала који сачињавају композитну масу. На тај начин се добијају тражене особине и већа густина делова. На слици 35. дат је приказ различитих облика и величине честица праха.



Слика 35. Величине честица праха [1]

Инјекционо бризгање метала је производни процес који укључује дозирање металних или керамичких прахова који се понашају као пластика, тако да се мешају са полимерним

везивом стварајући сировину. Услед велике количине везива у почетном материјалу (до 40 % запремине), МІМ отпресак је подвргнут великом смањењу запремине (чак до 20% линеарног скупљања) током синтеровања.

Димензијске толеранције стога нису тако добре као код конвенционалних поступака ковања у калупу. Сложене и геометријски захтевне компоненте којима је производња у прошлости била дуготрајна и скупа, знатно је напредовала новим МІМ поступком. Тиме је постигнута лакша и јефтинија производња. На слици 36. приказана је аутоматизована линија за МІМ производњу. МІМ побољшава квалитет производа, смањује време производње и постиже се уштеда трошкова до 50%. Опште карактеристике МІМ-а јесу:

- велики број материјала који се може бризгати (нисколегирани и нерђајући челици, легуре бакра и цинка, бронза, чисти никал, легуре за електротехнику, W-Cu композити и други материјали),
- поступак је ограничен на релативно мале производе врло сложеног облика за средње и велике количине,
- скупљи од конвенционалних поступака,
- проблеми са избором везивног средства.

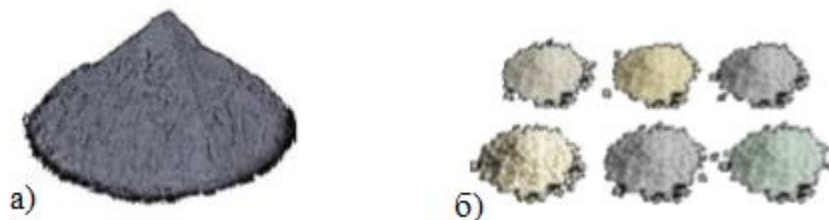
Карактеристика	Прецизни лив	МІМ
минимална величина пречника отвора, mm	2	0,4
минимална дебљина зида, mm	2	<1
максимална дебљина зида, mm	неограничена	5
толеранција код димензије 14 mm	$\pm 0,2$ mm	$\pm 0,06$ mm
храпавост површине, μ m	5	4
минимална дубина слепог отвора, mm	2	20

Табела 3. Упоредивање могућности обликовања између МІМ поступка и прецизног лива [1]



Слика 36. Аутоматизована линија за инјекционо бризгање металних прахова [8]

Мешањем металних и керамичких прахова са органским везивима, „рецепт“ у процесу производње је кључни корак да се осигура квалитетан производ. Како би се добила погодна смеша која одговара завршним захтевима и толеранцијала производа, постоји металургија која ствара органска влакна која би омогућила најпогоднији производ. На слици 37. приказане су компоненте за производњу гранулата – честице праха и органска везива.



Слика 37. Компоненте за производњу гранулата – честице праха (а) и органска везива (б)
[4]

Састав органских влакана омогућава металном или керамичком праху да се понаша попут пластичних. Након обликовања, везива се лако уклањају и немају штетан утицај на коначни производ. Квалитет производа зависи од искуства, знања произвођача, од сировине и квалитета алата.

Цео МИМ процес се заснива на својствима и саставу сировине. Сировина која се користи састоји се од две базне компоненте – везива и металног праха. Обе компоненте пружају своју јединствену функцију у производном процесу. Сировина је обично у облику пелета сличних гранулама које се користе у производњи пластике. С обзиром на то да сировина сама игра централну улогу у процесу МИМ-а, карактеристике сировине у сваком кораку производње су значајне и зато се прате. Карактеристике сировине зависе од пет главних фактора:

- карактеристике металног праха,
- састав везива,
- однос праха/везива,
- метода мешања и повезивања,
- технологија палетирања.

7.1. Карактеристике металног праха

Прах је појам који обухвата групу финих честица. Особине металног праха су производ свих особина које имају честице које сачињавају прах. Карактеристике честица ће утицати на сваки корак МИМ процеса. На пример, величина и облик честица ће утицати на трење између честица, густину паковања при палетирању итд. Ове карактеристике ће

утицати и на процес бризгања, лакоћу обликовања и хабања алата. Тип метала и квалитет ће такође играти одређену улогу када доспе у калуп, јер ће утицати на тежину сировине.

7.2. Састав везива

Друга компонента за сировину је везиво. Иако је везиво једнократни елемент током процеса МИМ-а, његове карактеристике ће имати круцијалан значај током целе производње. Везиво је састављено од најмање два различита материјала. Материјал који сачињава везиво утиче на тачку топљења везива и течење материјала. Према везиву се подешавају температура рада и проток бризгања. За успешно обликовање, материјал везива мора имати одређену вискозност да би попунио шупљине калупа без критичних подручја. Однос компоненти везива ће такође утицати на особине везива. Неке готове сировине садрже адитиве у везиву који помажу при обликовању и бризгању.

7.3. Однос праха и везива

Однос између количине праха и везива у сировинама ће утицати на њене перформансе. Да би имали успешан процес калупирања, две компоненте требају имати одговарајућу пропорцију. Превише праха изазваће проблеме са задржавањем облика, као и трење на опреми за бризгање и абразивне процесе. На слици 38. дат је приказ најчешћег облика и величине гранулата за МИМ производњу.



Слика 38. Гранулати сировине за МИМ производњу [1]

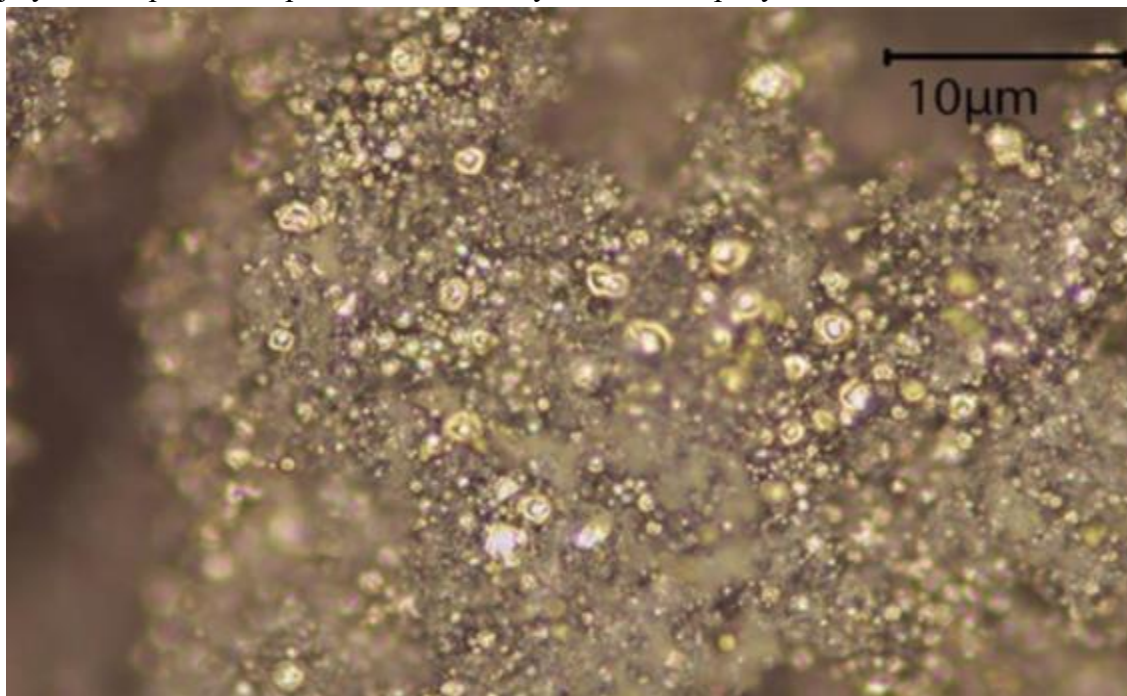
7.4. Метални прах

Особине металног праха који је део сировине за МИМ процесе одређују механичке особине финалног производа. Произведени МИМ део показује слична својства као и метал од ког се прави прах. У принципу, било који метални прах се може користити за МИМ производњу ако испуњава одређене критеријуме. Величина честица праха мора да буде мала, да се добро меша са полимерима, да има одређену густину након синтеровања и да не омета процес уклањања везива након синтеровања. На пример, магнезијум и алуминијум имају ниску температуру топљења и јако се оксидишу током синтеровања. Најчешће се користе легуре од нерђајућег челика, алатног челика, бакра, цементних карбида, титана и других ватросталних метала.

Карактеристике металног праха се обично приказују описивањем појединачних честица. Карактеристике праха се могу ограничити на неколико главних карактеристика:

- величина честица,
- расподела величина честица,
- облик честица.

Збир ових особина резултира густином паковања. Густина паковања говори о томе колико чврсто се честице пакују када сачињавају целину. Коришћење праха са великом густином паковања је од суштинског значаја за процес МИМ-а. Метални прах са високом густином паковања резултираће бољим синтеровањем са мање скупљања. Честице које се могу густо паковати такође имају бенефите због међусобног трења. Трење између честица праха помаже да се одржи бризгани облик након уклањања везива. На слици 39. приказане дат је увећан приказ микрочестица метала у металном праху.



Слика 39. Приказ сировине за МИМ бризгање – сјајне честице су честице метала [1]

7.5. Величина честица

У теорији, величина честица може бити већа од $45\mu\text{m}$, али идеална величина честица за većину легура је мања од $22\mu\text{m}$ у пречнику. Пожељне су што мање честице, јер ће повећати густину паковања и повећати хомогеност материјала. Неки материјали, као што су цементиран карбиди, могу имати честице мање од $5\mu\text{m}$. Прах са малом величином честица такође даје глатке површине, као и мање абразиво над машином. Једини разлог за одабир праха са већом величином честица су мањи трошкови за сировину. Међутим, веће честице могу изазвати проблеме у процесу производње током бризгања.

7.6. Облик честица

Облик честица има велики утицај на успешност МИМ процеса. Честице добијају облик у зависности од производних метода. Сферичан облик је пожељан из бројних разлога. Кугличаст облик је повољан јер брже истиче из алата за бризгање. Сферичне честице се добро слажу са везивним материјалом и равномерно се распоређују, што даје добру хомогеност материјала. Метални прахови са неправилним облицима честица се такође користе у МИМ производњи. Показало се да честице које имају неправилан облик помажу да део након уклања везива задржи структуру коју је добио у калупу. Кугличасте честице имају велику додирну површину са другим честицама, између којих се јавља трење које помаже да део задржи облик. Међучестично трење се може повећати смањењем димензија честица, јер ће се остварити већи контакт међу честицама. Сферичан облик омогућава велику густину паковања и формира чврсту форму са материјалом везива.

7.7. Расподела по величини честица

Прах који се користи за МИМ процесе садржи честице које нису исте величине. Ово варирање у величини честица може бити врло значајно. Величина честица се обележава ознакама D10, D50 и D90. За пример је узет метални прах одређене врсте. Ознака D10 има вредност величине честица $4,6\mu\text{m}$. Десет процената честица је величине мање од $4,6\mu\text{m}$. Ознака D50 описује средњу величину честица. Другим речима, 50% честица су испод величине $11\mu\text{m}$. Вредност D90 је величина која обухвата 90% честица, а то значи да је само 10% честица изнад ове величине (табела 4).

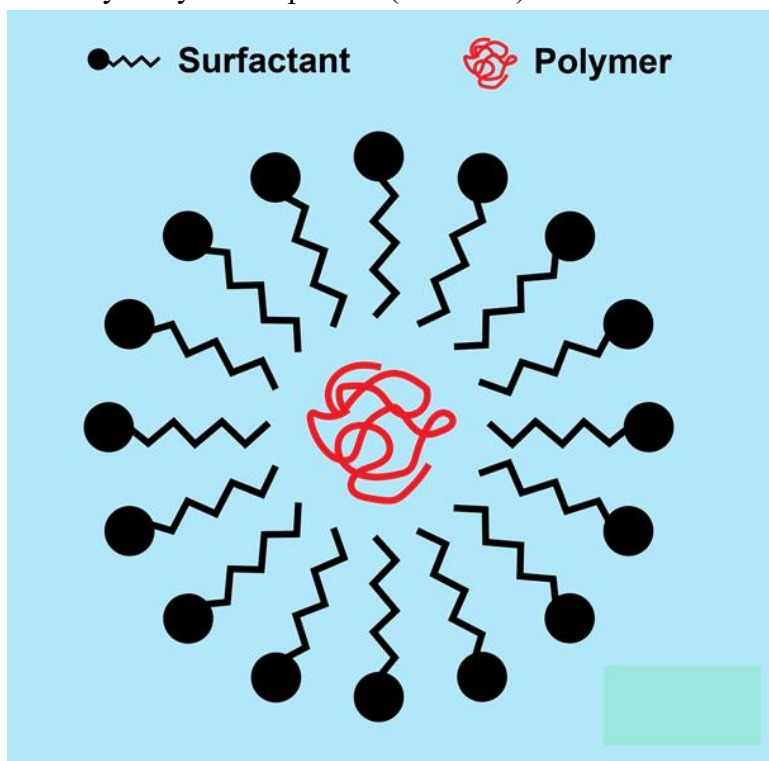
материјал	састав	D10	D50	D90
нерђајући челик	Fe/Cr/Ni/Mo	4,6	11	18
нерђајући челик	Fe/Cr/Ni/Cu	4,8	20,7	50,9

Табела 4. Расподела честица по величини за различите материјале [1]

7.8. Везивни материјали

Друга компонента сировине за МІМ процесе је сировина. Док метални прах који је присутан у сировини обезбеђује формирање одређене структуре завршног модела, везивни материјал неће бити присутан у делу на крају процеса. Основна улога везива је да обезбеди стварање такве мешавине са металом која се може лако обликовати. Материјал за везивање игра веома важну улогу и успешност целокупног МІМ процеса зависи од перформанаса везива.

Везиво се састоји од неколико различитих материјала, који имају јединствену функцију. Обично се МІМ везиво састоји од три главне компоненте – полимер, пуниоци и елементи који формирају заштитну опну на површини (слика 40).



Слика 40. Заштитна опна на површини материјала [8]

Од ове три компоненте, полимер и пуниоци чине већи део састава. Материјал за пуњење је обично нека врста воска или материјал који је сличан воску. Полимер и восак су обично у истим пропорцијама у везиву. Иако је пожељна добра повезаност компоненти, потпуно мешање није. Разлике између компоненти су у молекулској тежини и хемијској структури, температури топљења итд. Разлике у температури топљења између компоненти је главна особина која омогућава селективно уклањање компоненти током МІМ процеса. Воскови имају ниске температуре топљења ($< 100^{\circ}\text{C}$), док полимери имају вишу температуру топљења ($> 100^{\circ}\text{C}$). То подразумева да је фаза уклањања воска прва током процеса уклањања везива. Услови при којима се уклања везиво не смеју бити такви да се модел

деградира. Зато се одвијају постепено и зато се употребљавају различите компоненте. Процес уклањања полимера се одвија после уклањања воска, а непосредно пре синтеровања. Иако постоји бесконачан број пуниоца и полимера, само ограничен број истих је добра комбинација за материјал везива. Компоненте везива морају имати својства која су компатибилна једна са другима и дају функционалну целину. Компоненте везива се морају добро мешати са металним прахом и водом. Приближавајући састав везива са практичне стране, најважнији критеријум за селекцију материјала се заснива на расположивим методама за уклањање и стварање прашкастог материјала са металом.

7.9. Секундарно везиво

Улога секундарног везива је да обезбеди конструкциону чврстоћу формираном МИМ делу током процеса уклањања везива и раног синтеровања. Због ове улоге се често назива „окосница“. Секундарно везиво се скоро увек прави од полимера. То је „кичмени полимер“ који има највишу температуру топљења од свих компоненти везива. Полимерна компонента везива је најзахтевнија за уклањање.

Најчешће кориштени везивни полимери су полиетилен и полипропилен (табела 5).

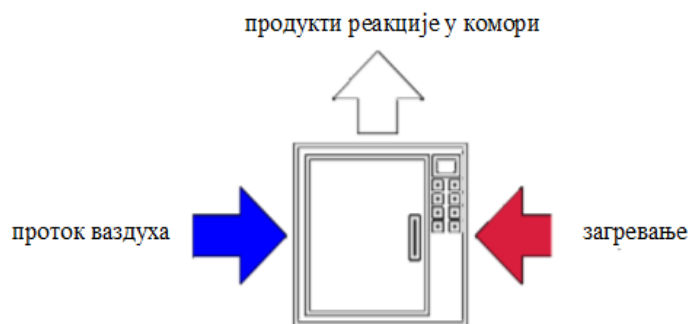
материјал	формула	тачка топљења	густина паковања
полиетилен	$(C_2H_4)_n$	115–135 °C	0.88–0.96 g/cm ³
полипропилен	$(C_3H_6)_n$	160 °C	946 kg/m ³

Табела 5. Основна својства полиетилена и полипропилена [1]

Ови материјали носе идеална својства, јер могу пружити чврстоћу структуре а истовремено се могу лако уклонити. Имају ниску температуру топљења и малу вискозност, што омогућава ефикасно обликовање. Такође се добро мешају са водом и другим везивним материјалима, па и прахом. Дужина њиховог полимерног ланца је мала и због тога се распадају са релативно малим променама запремине што умањује могућност компликација током процеса уклањања везива и синтеровања. Полиетилен и полипропилен су такође два полимера која се највише производе у оквиру пластичних материјала, што их чини јефтиним компонентама за везиво. Они такође штите производ од продирања угљеника током завршне фазе уклањања везива. На слици 41. приказан је процес постепеног уклањања везива из материјала дела и промена запремине током различитих фаза.

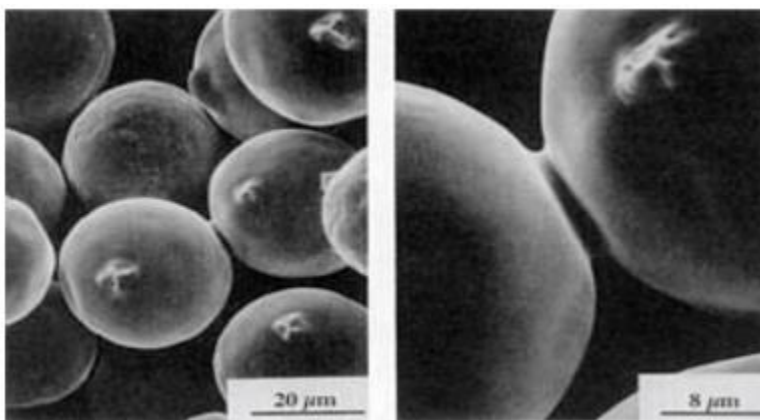


Слика 41. Постепено уклањање везива током MIM процеса [9]



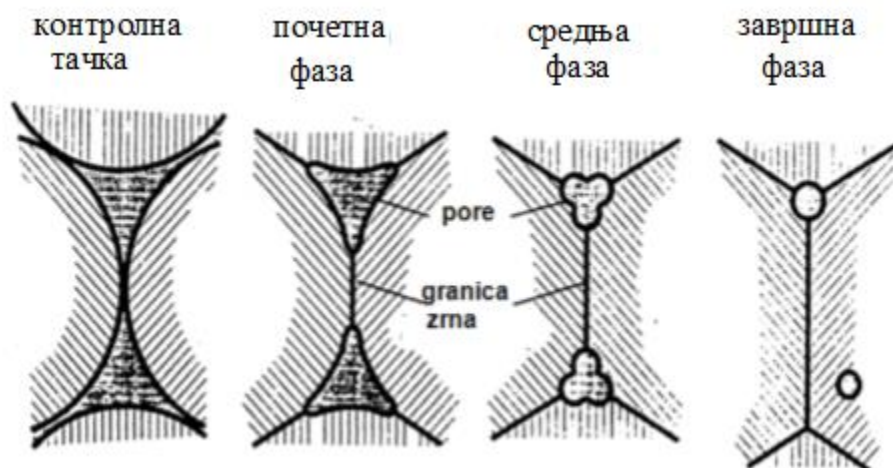
Слика 42. Пећ која садржи „зелене компоненте“ [9]

Синтеровање у контролисаним условима је последња фаза процеса којој се подвргава „смеђа компонента“. Спајање честица може уследити при температури испод температуре топљења у чврстом стању дифузијом атома. Веза међу честицама остварује се стварањем „врата“ на месту контакта (слика 43).



Слика 43. Процес „срашћивања“ приликом синтеровања Ni честица величине величине 22 μm при 1030°C у трајању од 30 min [1]

Честице срашћују кретањем атома који смањују високу површинску енергију честица. Што су честице мање, имају вишу површинску енергију, те срашћују брже. Код металних прашкова то је дифузија атома кроз површину честице на месту контакта. Будући да је дифузија температурни процес, функција је температуре и времена. Следећа слика шематски приказује различите фазе процеса спајања. С временом честице срашћују, поре се смањују и обликују се границе зрна (слика 44).



Слика 44. Фазе процеса срашћивања током синтеровања [1]

Контролисано и равномерно скупљање компоненти је до 20% у завршној фази, све до њихове задате величине облика и толеранцијских параметара. Даље, делови могу бити топлотно обрађени, полирани, обложени или заварени. Међутим, многи начини производње не захтевају скупе секундарне операције.

За МИМ поступак се не може рећи да има најбоље решење у односу на друге производне технологије, али нуди решења за делове који су у прошлости били прескупи за производњу. МИМ поступак се користи за производњу компонената у годишњим количинама од 1000 и више, а ако је део посебно скуп и сложен, МИМ би и даље био исплатив за количине од 500 и више комада.

7.10. МИМ материјали и њихова својства

Основни МИМ материјали су гвожђе као темељ, никал и угљеник као легирајући елементи.

- нелегирани и нисколегирани челици,
- брзорезни челици,
- неерђајући челици,
- никал,
- гвожђе,
- бакар,
- керамика.

Међутим, могу се користити материјали са карактеристикама које су супериорније у односу на стандардне материјале. То су :

- материјали отпорни на хабање,
- материјали постојани на високим температурама,
- материјали са магнетним својствима.

Нудећи широку палету материјала, ови производи се разликују према геометријској слободи конструисања, врло високој прецизности и подобности за производњу у великим количинама. Међутим, у току је развој нових материјала. Воде се испитивања која ће довести по повећања густине која ће бити 100% од густине која је задата. За сада је то до 95% задане густине. То би омогућило примену ММ технологије и за производњу делова великих димензија.

Има неколико корака у ММ производњи: мешање праха од метала са органским везивом (припрема сировине), када се изврши обликовање инјекционим бризгањем, тада се везиво уклања и коначно се порозни део синтерује да би добио већу густину и одговарајуће механичке особине.

Међутим, однос праха и везива на почетку од фундаменталног је значаја за ММ процес. Однос Φ одређен је следећом формулом:

$$\Phi = \frac{\frac{W_p}{\rho_p}}{\frac{W_p}{\rho_p} + \frac{W_b}{\rho_b}}$$

Теоријска густина сировине дата је изразом:

$$\rho = \Phi \rho_p + (1-\Phi) \rho_b$$

где су ρ_p и ρ_b теоријска густина металног праха и везива.

Густина материјала праха дата је изразом:

$$\Phi = \frac{\rho_p}{\rho_p (1 - \Phi) + \rho_b \Phi}$$

Одавде је густина везива:

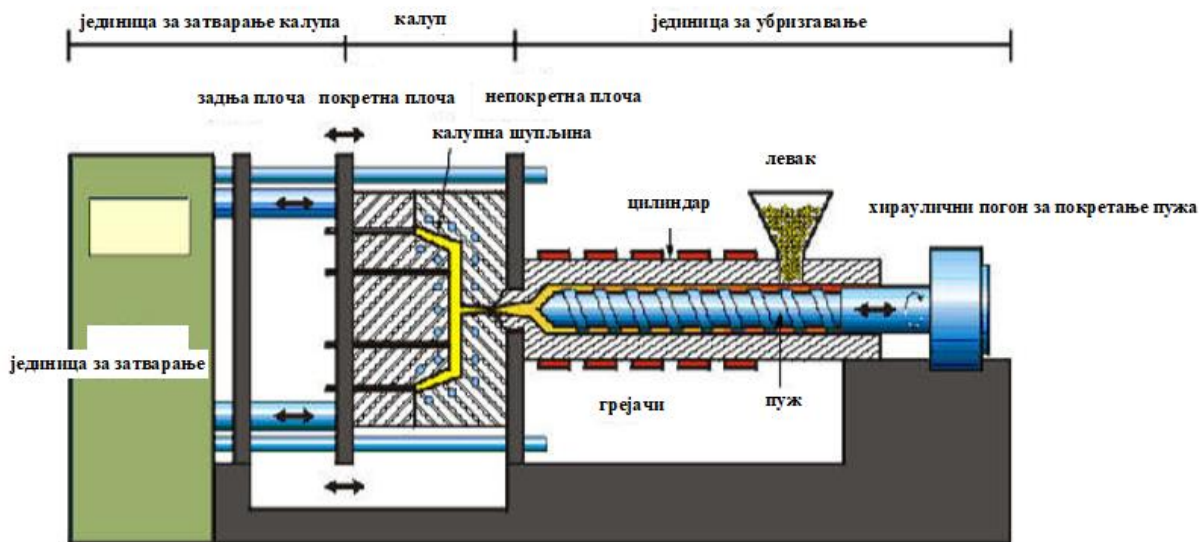
$$W = 1 - W_p$$

На слици 45. дат је шематски приказ промене структуре и облика гранулата приликом бризгања. Око 50% дужине пужа служи за уношење гранулата у систем за бризгање, 40% за дејство дробљење гранулата и 10% за ход припремљене смеше за убризгавање у калуп. Током свих фаза у процесу врши се мешање и сједињавање сировине.



Слика 45. Шематски приказ промене структуре сировине при бризгању [5]

Основни делови машине за бризгање су јединица за затварање калупа, калуп и јединица за убризгавање.



Слика 46. Шема машине за бризгање [4]

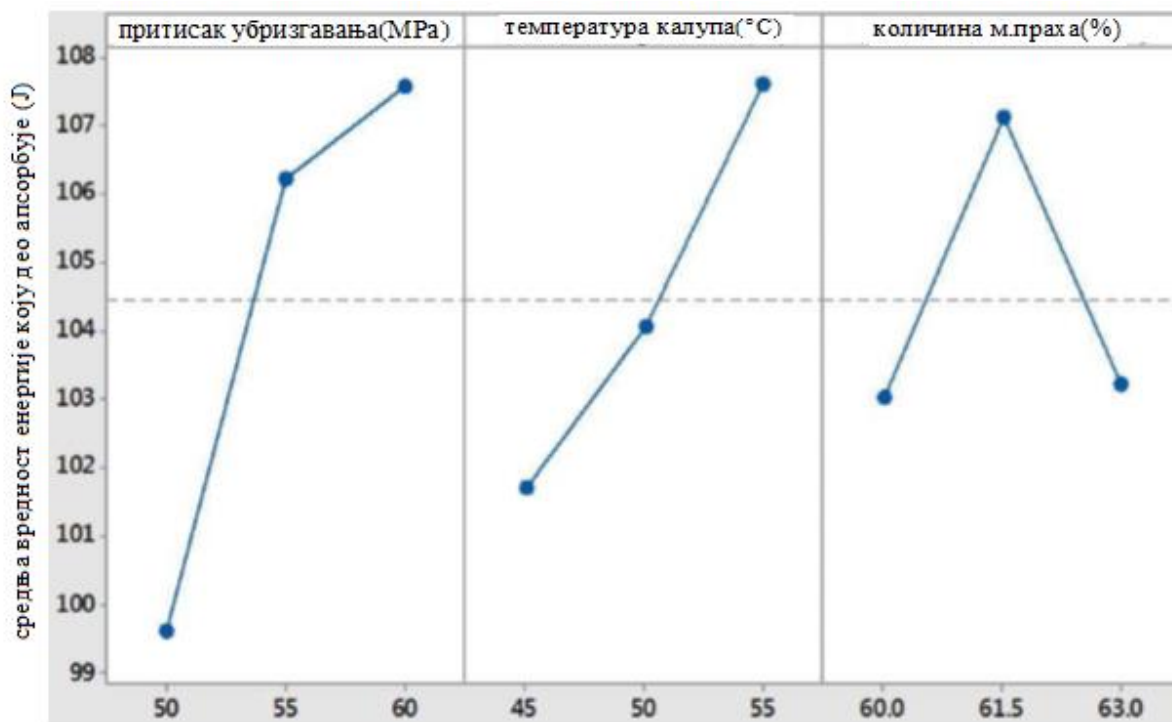
7.11. Оптимизација параметара

Оптимизација параметара има за циљ побољшање карактеристика крајњег производа. Смањење времена циклуса је занемарљив приоритет у односу на квалитет производа. Од већег значаја је конфигурација калупа и температура у калупу, јер представља основу да даљи МИМ процес. Исто важи и за корак бризгања, који има изненађујуће велики утицај на механичке особине крајњег производа.

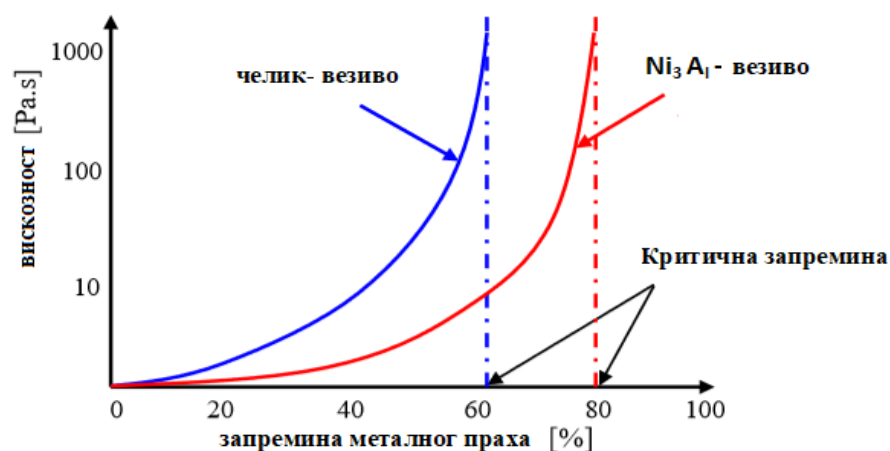
Пример који показује како начин МИМ производње може утицати на карактеристике је истраживачки рад на тему „Оптимизација параметара процеса бризгања за ударну жилавост синтерованих делова“, који су спровели научници Pashauri и Md. Namiuddin. У раду је наглашено како се ударна жилавост МИМ делова може побољшати само оптимизацијом параметара за обликовање. Истраживање показује да су најважнији фактори :

- притисак ињектирања,
- температура калупа,
- количина м.праха(%)

На слици 47. приказан је утицај различитих параметара на особине производа (ударну жилавост)



Слика 47. Утицај различитих параметара производње на ударну жилавост [1]



Слика 48. Дијаграм зависности запреминског удела металног праха у сировини и вискозности сировине за различите саставе [1]

У близини критичне запремине метала у сировини за производњу, јавља се нагло повећање вискозности, а самим тим и проблеми током процеса бризгања. Запремински удео метала мора увек бити испод критичне вредности (слика 48).

7.12. Анализа металног праха SS316L

Да би се направио радни материјал, нерђајући челик са ознаком SS316L је помешан са везивом које садржи полиетилен гликол (PEG) , полиметил метакрилат (PMMA) и стеаринску киселину (SA). Мешањем ових компонената се добија хомогена смеша за бризгање, која се у МИМ технологији зове „feedstock“. Главна предност коришћења PMMA/PEG везива је што се може уклонити за веома кратко време.

У табели 6. приказан је процентуални удео сваког елемента и теријска густина.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.018	0.55	1.5	0.031	0.017	16.9	11.6	2.2	balance

Табела 6. Хемијски састав SS316L праха [1]

елемент	процентуална концентрација	теоријска густина
C	0.018	2.267
Si	0.55	2.33
Mn	1.5	7.47
P	0.031	1.823
S	0.017	1.96
Cr	16.9	7.14
Ni	11.6	8.9
Mo	2.2	10.28
Fe	67.184	7.874
SS 316 L	100	7.88146

Табела 7. Процентуална концентрација и теоријска густина елемената праха [1]

Особине везивног материјала дате су у табели 8.

материјал	произвођач	тачка топљења(°C)	тачка кључања(°C)	густина (грам/кубик)
Polymethyl Methacrylate (PMMA)	Vetec	157.77	200	1.19
Polyethylene Glycol(PEG)	Rankem	35-40	250	1.22
Stearic acid(SA)	Fischer Scientific	70.1	383	0.94

Табела 8. Особине везивног материјала [1]

Метални прах и везивни материјал мешају се 90 минута при одговарајућој пропорцији и условима за контролу тежине и температуре. Метални прах, РММА, РЕГ и стеаринска киселина се појединачно мере а затим мешају. Мешање се спроводи на температури од 160°C и при 40 обртаја у минути, да би се постигла хомогеност материјала. После темељног мешања, смеша се суши на ваздуху два сата, а затим у пећи на температури 50°C у трајању од једног часа. После тога, сировина се хлади на температури околине, а затим гранулира и постаје „feedstock“.

Након бризгања следи процес уклањања везива. За овај процес се користи техника растварача и термичког уклањања везива. У првом кораку, користи се растварач да се уклони РЕГ из зеленог дела. Зелени делови се потапају у воду у којој се мешају при температури 60°C. Процес траје око 6 сати. Узорци се затим суше у пећи на температури 50°C да би се уклонила вода, а затим се хладе. Други корак је термичко уклањање РММА и стеаринске киселине. Узорци се ураћају у прах алуминијума који се налази у глиненој посуди. Алуминијум спречава промену димензија узорка. Уклањање везива термичким путем изводи се у три фазе. При томе се даје карактеристичан однос раста температуре у зависности од времена, а изражава се у °C/min. Та температура која је потребна за уклањање везива је 350 °C и остварује се из три корака постепеним загревањем. Прво се узорак загрева до температуре од 200 °C у односу 2.5°C/min. Потом се загрева до температуре 350°C у односу 1°C/min. Након тога се одржава константна температура 2

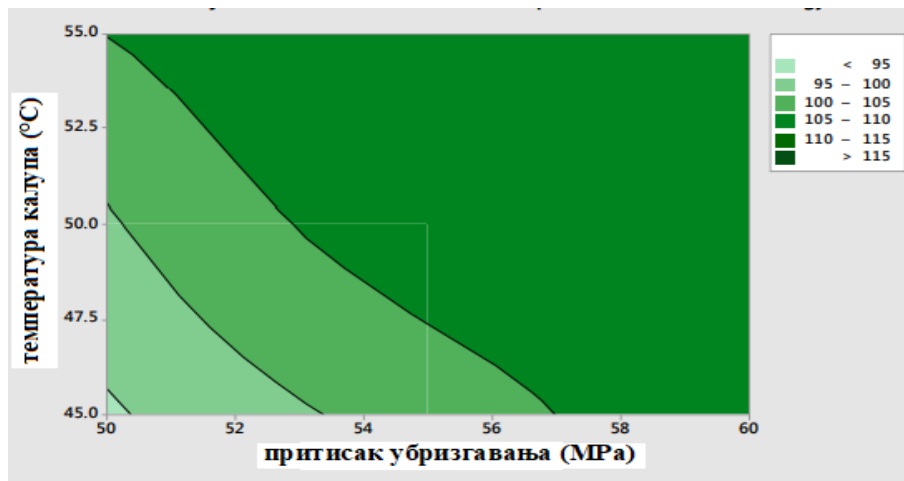
сата ради уклањања полимера. Смеђи део се хлади до температуре околине од 27°C брзином 1°C/min.

Након уклањања везива смеђи део се прво излаже процесу пресинтеровања, а након тога следи процес синтеровања. Максимална температура у процесу пресинтеровања је 900°C. При загревању, однос је 3°C/min. Овај однос се одржава око 60 минута. Након тога се хлади у односу 5°C/min. Пресинтеровани део се потом синтерује у жареној пећи. Синтеровање се спроводи у вакуму на температури 1360°C. Циклус се састоји од три фазе- прво се узорак загреје до 1360°C у односу 10°C/min, а затим се држи на тој температури 90 min. На крају се хлади до температуре околине (27°C) брзином од 15°C/min. У табели 9. приказани су основни параметри процеса бризгања у различитим фазама производње.

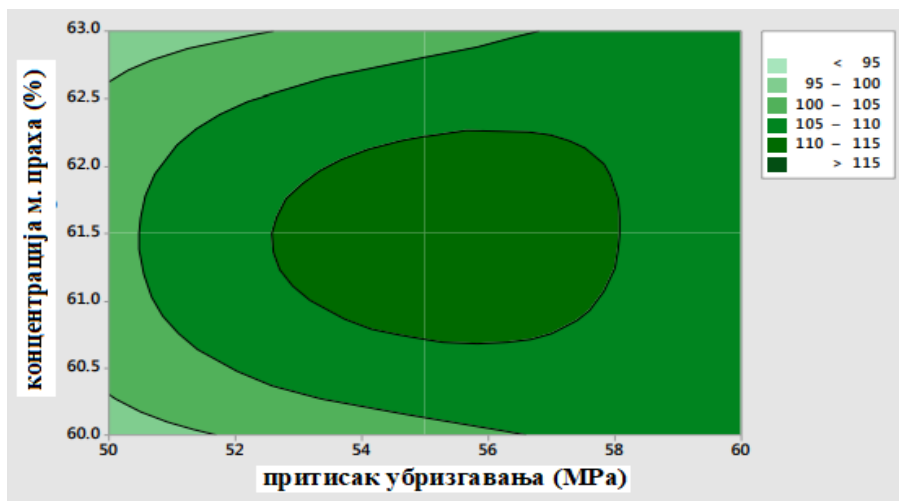
фактор који се контролише		фаза 1	фаза 2	фаза 3
притисак убризгавања (МПа)	P_i	50	60	70
температура убризгавања (°C)	T_i	140	150	160
температура у калупу (°C)	T_m	45	50	55
накнадни притисак (МПа)	P_h	65	70	75
брзина убризгавања (cm/s)	v_i	5	10	15
количина металног праха (%)	ϕ	60	61.5	63
време накнадног притиска (s)	t_h	5	10	15
време хлађења (s)	t_c	5	8	11

Табела 9. Промена параметара у различитим фазама процеса [1]

Иако сваки од ових фактора утиче на механичке особине коначног дела, није исти ниво утицаја на поменуте особине. Нпр. највећи утицај на ударну жилавост дела има притисак убризгавања, а најмањи утицај време накнадног притиска. Оптимална вредност сваког фактора подразумева најбољу комбинацију ових фактора (слика 49 и 50).



Слика 49. Ефекат температуре калупа и притиска убризгавања на ударну жилавост [1]



Слика 50. Криве карактеристичних зона ударне жилавости [1]

Иако сваки од ових фактора утиче на механичке особине коначног дела, није исти ниво утицаја на поменуте особине. Нпр. највећи утицај на ударну жилавост дела има притисак убризгавања, а најмањи утицај време накнадног притиска. Оптимална вредност сваког фактора подразумева најбољу комбинацију ових фактора. Ниво утицаја основних фактора је дат у табели 10.

Фактори	Ниво утицаја на ударну жилавост
P_i	1
T_i	6
T_m	2
P_h	5
v_i	3
φ	4
t_h	8
t_c	7

Табела 10. Ниво утицаја различитих фактора на ударну жилавост производа [1]

На основу слике 49 и 50, закључује се да је најоптималнији однос фактора дат у табели 11.

фактор који се контролише	симбол	вредност
притисак убризгавања (МПа)	P_i	60
температура убризгавања (°C)	T_i	170
температура у калупу (°C)	T_m	55
накладни притисак (МПа)	P_h	75
брзина убризгавања (ccm/s)	v_i	5
количина металног праха (%)	ϕ	61.5
време накладног притиска (s)	t_h	5
време хлађења (s)	t_c	5

Табела 11. Однос фактора за највећу ударну жилавост [1]

7.13. Синтеровање комада

До синтеровања и спајања зрна долази услед смањивања површинске енергије честица праха, те збоггибања атома при високим температурама у зони додира честица. До смањивања волумена комада током синтеровања долази услед смањивања димензија пора. Што је време синтеровања дуже, прах постаје све чвршће металуршки везан, док не постигне својства упоредива са својствима ливених или кованих материјала истог хемијског састава. Фазе операције синтеровања приказане су на слици 51.



Слика 51. График циклуса током синтеровања и пресинтеровања у четири фазе за нерђајући челик [5]

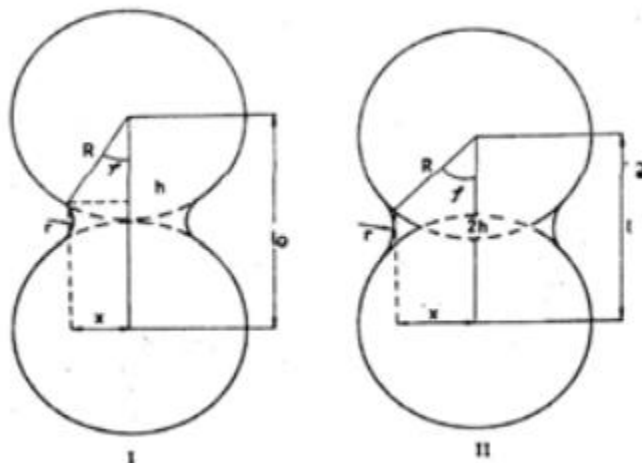
7.13.1. Кинематика синтеровања

Модел синтеровања међу првима је проучавао Ј. И. Френкелј. Он је утврдио да за синтеровање две кугле механизмом вискозног тока важи следећа зависност:

$$x^2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{\gamma}{\eta} \cdot R \cdot t$$

Где је: x -полупречник површине додира између две кугле; γ -површински напон; η -коэффициент вискозности; t -време;

На слици 52. шематски је приказан модел постепеног прирастања две честице и смањења растојања између њихових центара.

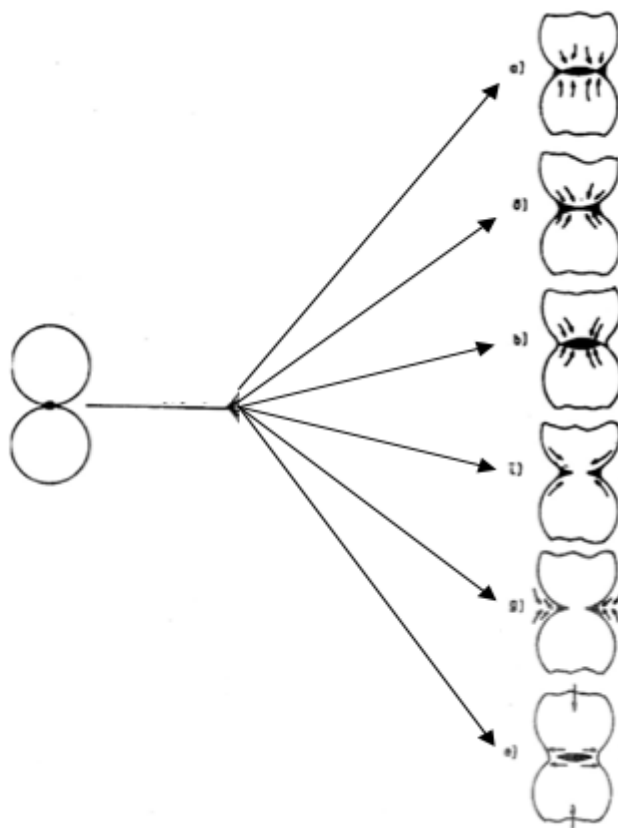


Слика 52. Модел прирастања две честице: I-растојање између центара сфера се не мења; II-растојање између центара сфера се смањује [5]

У области виших температура, када су дифузиона покретљивост атома и напон пара материјала довољно велики, раст површине контакта може да буде последица пет механизма:

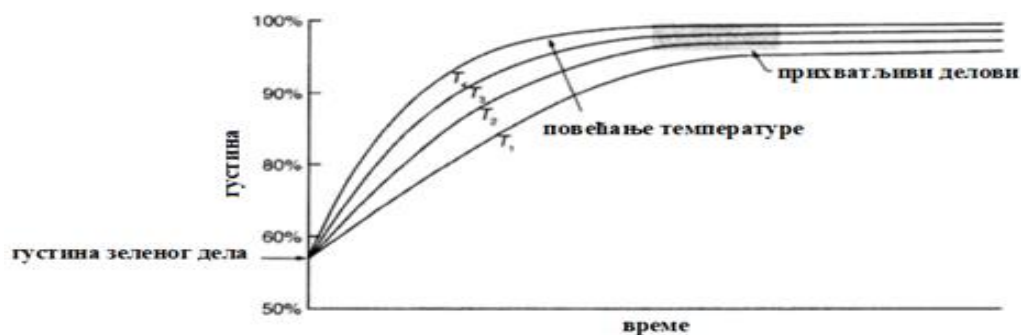
- вискозни ток – површина контакта се повећава и центри сфера се приближавају услед усмереног транспорта атома из запремине сфера у контактни врат,
- запреминска дифузија – контактна површина се повећава при приближавању центара сфера,
- запреминска дифузија – при расту површине врата не долази до приближавања центара сфера,
- површинска дифузија – дифузија атома по површини са испупчених делова сфера у контактни врат; раст површине контакта није праћен приближавањем центара сфера,
- испаравање – кондензација; транспорт масе одиграва се кроз гасну фазу; при расту контактне површине не долази до приближавања центара сфера.

На слици 53. приказана је шема постепеног срашћивања две честице са свим међуфазама које је јављају у том процесу и приликом синтеровања. На слике се види да процес срашћивања и повезивања компонената почиње и пре процеса синтеровања.



Слика 53. Шема синтеровања две сферичне честице по фазама (а-вискозни ток; б-запреминска дифузија; в-запреминска дифузија; г-површинска дифузија; д-испаривање-кондензација; е-синтеровање под притиском) [5]

Температура и притисак су два кључна параметра процеса синтеровања. Променом температуре и притисака мењају се и особине материјала који се синтерује. На слици 54. је дијаграм који показује зависност између температуре и густине делова, тј. повећањем температуре обраде и времена дејства те температуре, повећава се и густина обрађеног дела.

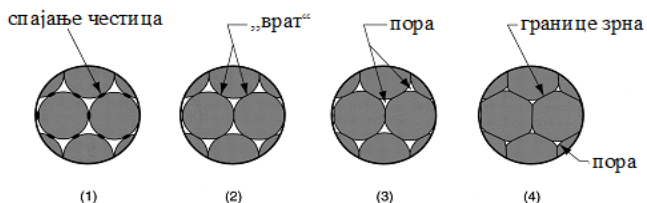


Слика 54. Зависност густине од температуре и времена синтеровања за различите вредности температура [1]

У табели 12. дати су параметри процеса синтеровања (температура и време обраде).

материјал	температура ($^{\circ}\text{C}$)	време (min)
бакар, месинг, бронза	760-900	10-45
челик и челични графит	1000-1150	8-45
никал	1000-1150	30-45
нерђајући челик	1100-1290	30-60
легуре Al, Ni и Co	1200-1300	120-150
ферит	1200-1500	10-600
карбиди	1430-1500	20-30
молибден	2050	120
волфрам	2350	480

Табела 12. Температура и потребно време за синтеровање различитих метала [1]



Слика 55. (1) иницирано је спајање честица у тачкама додира (2) тачке додира прерастају у „врат“ (3) смањују се димензије пора међу честицама (4) у зонама врата формирају се границе зрна [1]

7.13.2. Додатни поступци након синтеровања

Додатне операције након синтеровања комада могу бити:

- механичке,
- дифузионе.

У механичке операције спадају:

- додатно пресовање (en. repressing) – синтеровани се комад пресује у затвореном калупу како би му се повећала густина и побољшала својства,

- димензионисање (en. sizing) - синтеровани комад се пресује како би се уклониле деформације настале након хлађења комада претходно загрејаног до високе температуре синтеровања, чиме се постиже задата тачност мера ,
- фино ковање (en. coining) – у зони површине комада се утискују одређени детаљи,
- обрада резањем – израда детаља комада који нису могли бити обликовани, нпр. завојнице.

Порозност је јединствено и нераздвојиво својство комада произведених поступцима РИМ. Постојање пора се може искористити како би се добили специјални производи испуњавањем пора дифузијом уља, полимера или метала. У дифузионе операције спадају:

- импрегнација – испуњавање пора уљем или неким другим флуидом који испуњава поре синтерованог комада:
- уљем се испуњавају поре узајамно покретних делова (зупчаници и лежајеви) и тиме смањују трење и трошење,
- полимером у растопљеном стању се испуњавају поре како би при смањивању комад постао непропустан.

Инфилтрација је испуњавање пора комада додатним металом(легуром) при чему:

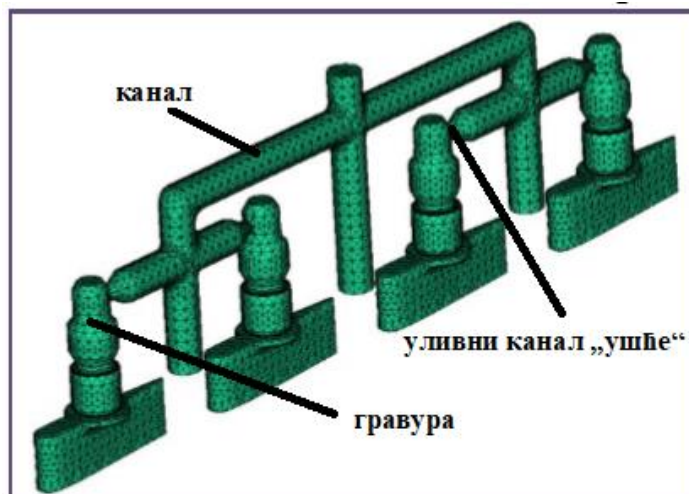
- температура топљења додатних метала којима се пуне поре мора бити нижа од температура основног метала синтерованог комада,
- при високој температури додатни метал се капиларно увлачи у поре синтерованог комада са којим се налази у додиру,
- постигнута грађа је након инфилтрације релативно непорозна и веће је густине, чврстоће и жилавости.

7.14. Фаза попуњавања и деловања накнадног притиска на конкретном производу уз примену нумеричке симулације

За анализу фазе попуњавања калупа неопходно је дефинисати улазне податке, као што су:

- облик и димензије компоненте,
- параметри рада машине,
- својства материјала алата,
- параметри процеса.

При одређивању геометрије неопходно је дефинисати мрежу коначних елемената. Она обухвата све структуре које се формирају у калупу при бризгању. Мрежа коначних елемената приказана је на слици 56.



Слика 56. Мрежа коначних елемената [5]

За описивање и анализу пуњења потребно је описивање основне карактеристике МИМ материјала, а то је његова вискозност. Вискозност је унутрашњи отпор течности и игра веома важну улогу у процесу бризгања. Вискозност зависи од:

- врсте материјала
- температуре
- брзине смицања

Вискозност која се јавља између сва слоја има одређену брзину смицања. За одређивање брзине смицања неопходно је познавати растојање између та два слоја и вредност силе вискозности. Шема за одређивање брзине вискозности дата је на слици 57.



$$\text{брзина смицања } (\dot{\gamma}) = \frac{v \text{ (m/s)}}{L \text{ (m)}} = \dots 1/s$$

Слика 57. Шема смицања и брзина смицања [10]

За описивање вискозности у зависности од температуре и брзине смицања најчешће се користи модел другог реда:

$$I_n(\eta) = A + BI_n(\gamma) + CT + D[I_n(\gamma)]^2 + EI_n(\gamma)T + FT^2, \text{ где су:}$$

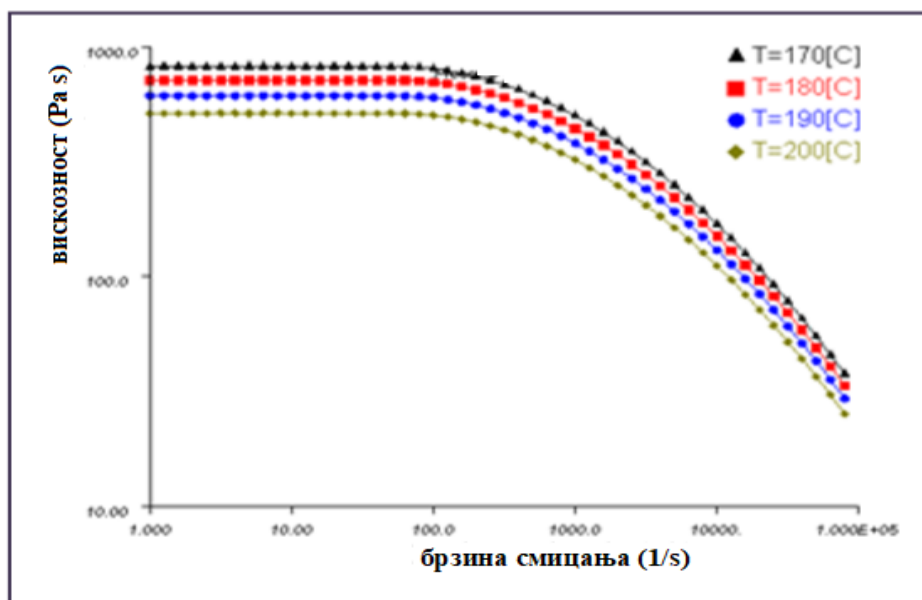
η -вискозност; γ -брзина смицања; T-температура; A,B,C,D,F – коефицијенти вискозности;

Материјал који се испитује носи ознаку BASF CATAMOLD 310N. Везиво је базирано на полиацеталу са полиетиленом, чији је састав након синтеровања:

Fe,C	0,20-0,50%
Cr	24-26%
Ni	19-22%
Si	0,75-1,30
Nb	1,2-1,5%
Mn	<1,5%
остали	< 2,0%

Табела. Састав материјала BASF CATAMOLD 310N [1]

Карактеристике вискозности за распон температура од 170 до 190 °C приказане су на следећем дијаграму, а добијене експерименталним путем.

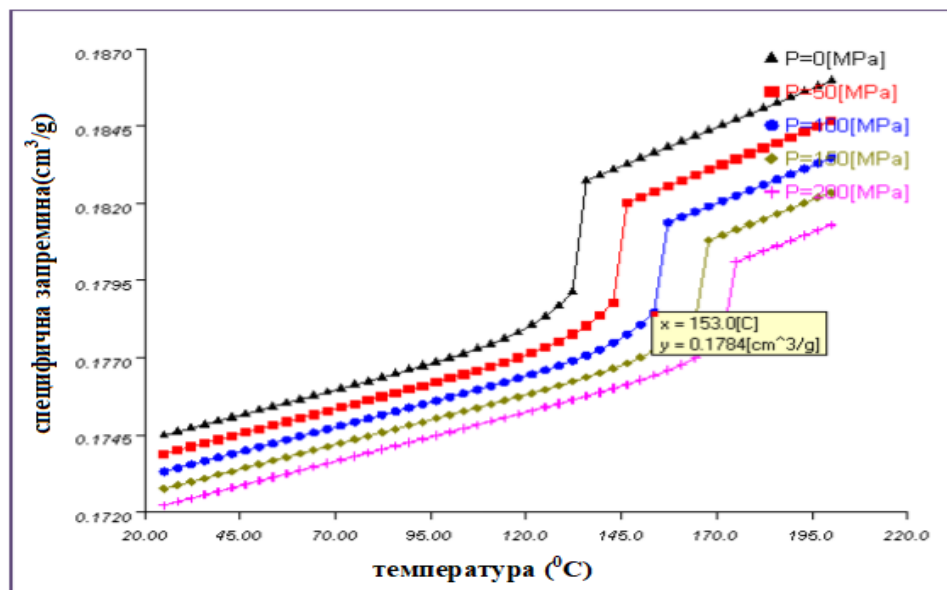


Слика 58. Вискозност у функцији температуре и брзине смицања [5]

Да би се описао процес формирања дела, неопходно је описати понашање запремине у зависности од притиска и температуре. Промена запремине у зависности од притиска и температуре дата је следећим изразом:

$$V(T, P) = V_0(T) \left[1 - C I_n \left(1 + \frac{P}{B(T)} \right) \right] + V_t(T, P), \text{ где су:}$$

$V(T, P)$ – специфична запремина на температури T и притиску P ; V_0 – специфична запремина на нула притиску; T – температура; P – притисак; $C=0.0894$ – константа; B – осетљивост материјала на притисак;

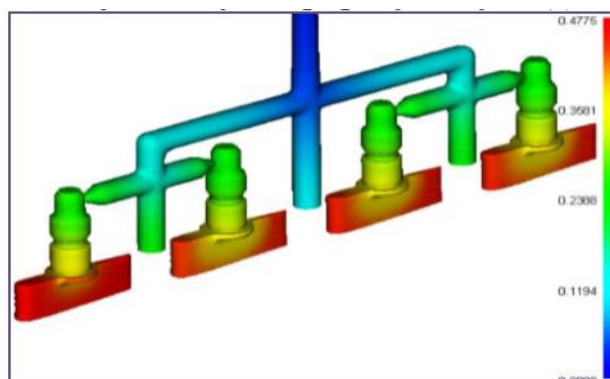


Слика 59. Зависност специфичне запремине од температуре за различите вредности притисака [5]

Након успешног дефинисања почетних услова, неопходно је анализирати расподелу температура унутар калупа, расподелу притисака и време попуњавања калупа.

Време инјектирања је време које је потребно да се калупна шупљина испуни у потпуности. Пожељно је да процес траје што краће, најчешће до једне секунде. Дуже време попуњавања захтева мању брзину бризгања, а резултира бржем очвршћавању feedstock-а са повећањем вискозности. Краће време инјектирања захтева веће брзине инјектирања, које захтевају дуже одржавање температуре feedstock-а. Веће брзине инјектирања побољшавају производност а такође и продужење циклуса производње. Веће брзине инјектирања резултирају и већим брзинама смицања.

Када је реч о времену попуњавања калупне шупљине, компоненте се не попуњавају истовремено и постоје подручја отежаног течења материјала (слика 60).



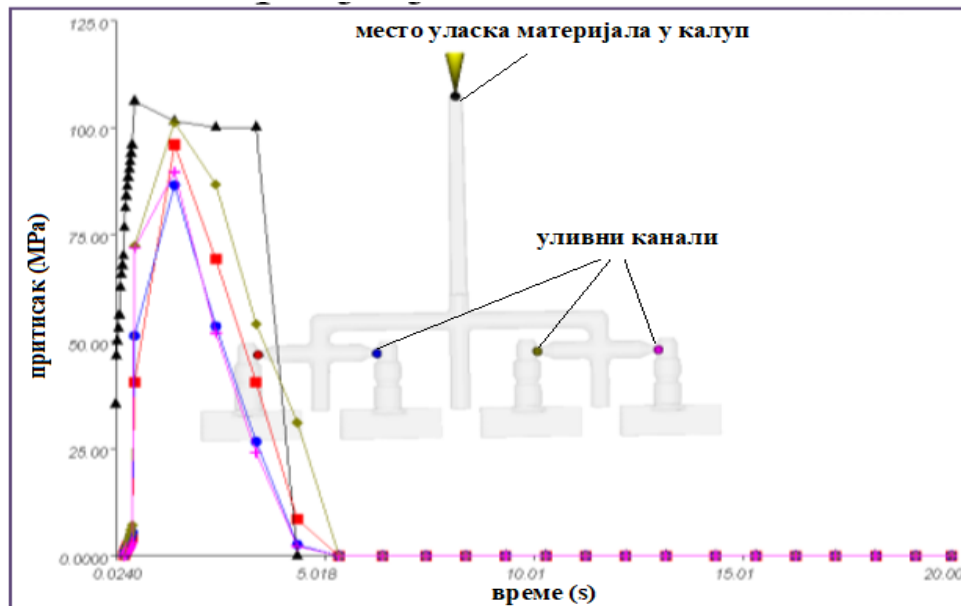
Слика 60. Разлике у времену попуњавања делова калупа (s) са легендом [5]

Поред времена попуњавања друго важно својство понашања материјала је расподела температурног поља. На следећој слици приказана је расподела температура на крају попуњавања калупа. Изузетно вруће зоне указују на повишено смицање, јављају се на карактеристичним местима и око уливног канала. Хладна места указују на отежано попуњавање. Веће температуре јављају се при вишим брзинама инјектирања због краћег времена попуњавања. Веће температуре јављају се и због повећаног трења између честица металног праха, које се повећава при већим брзинама инјектирања. Будући да се feedstock брже хлади у подручјима ближе контакту са унутрашњим деловима калупа, температура спољашње површине је нижа од температуре у унутрашњости дела. Када се заврши фаза попуњавања, наступа фаза накнадног притиска. У тој фази се у калупну шупљину инјектира нова количина материјала веће температуре, која уноси нову количину топлоте у калупну шупљину, чиме се одржава виша температура у појединим подручјима. Деловањем накнадног притиска и одржавањем температурног поља спречава се прерано очвршћивање улазног канала (слика 61).



Слика 61. Расподела температуре на крају процеса пуњења калупа ($^{\circ}\text{C}$) [5]

Притисак у калупу делује на крају фазе пуњења и у периоду накнадног дејства. Максимални притисак се увек јавља на месту убризгавања материјала у калуп. Већина машина за инјекционо бризгање није опремљена сензорима за праћење притиска и то је основни проблем код ове методе. Веће вредности и дуже време деловања притиска узрокује отежано избацивање из калупа, као и заостала напрезања у том делу. Поред тога, постоји и разлика у притиску у уливним каналима који су исте конфигурације, што објашњава понекад другачија својства различитих делова и оштећења. На слици 62. приказана је различита вредност притисака за различита места у малуту, тј. неједнака расподела притисака у калупу, због које се јављају накнадни проблемни и потреба за додатном обрадом комада.



Слика 62. Расподела притисака у различитим деловима калупа [5]

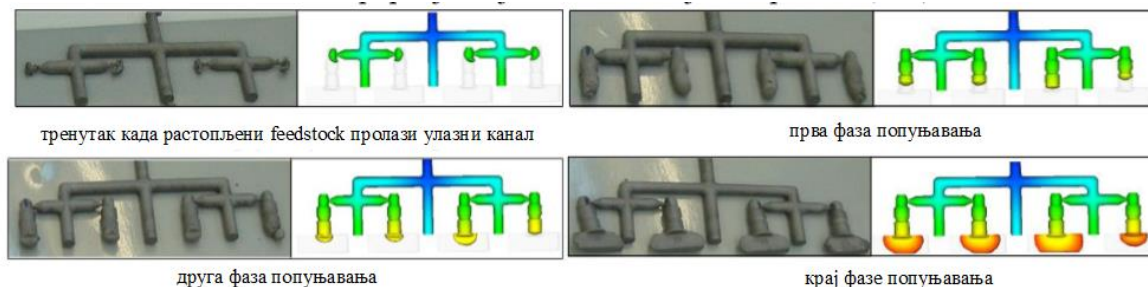
Експеримент инјекционог пресовања метала је рађен на машини ARBURG 320C. Параметри рада машине дати су у табели 12.

параметри	јединица	ниво 1	ниво 2	ниво 3
температура алата	$^{\circ}\text{C}$	110	120	130
брзина ињектирања	cm^3/s	5	10	15
накнадни притисак	bar	900	1000	1100

Табела 12. Улазни подаци процеса [5]

Остали подаци:

- температура feedstock-a - 195°C ,
- време ињектирања – 20s,
- време деловања накнадног притиска - 20s,
- време хлађења - 20s,
- температура околине - 20°C .

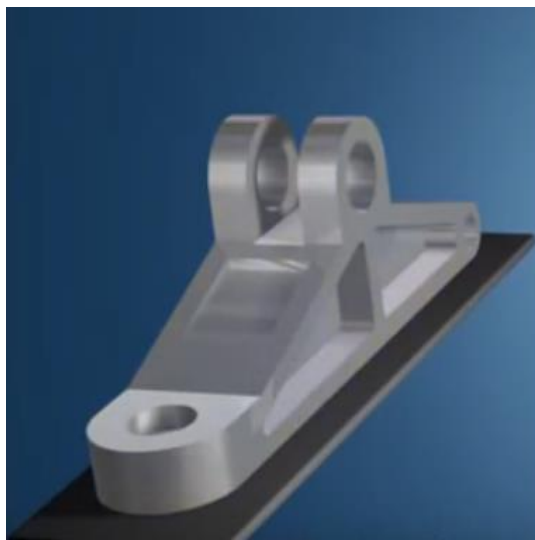


Слика 63. Фазе пуњења калуна [5]

На основу анализе утврђено је да већа брзина инјектирања повећава отпоре течењу, а тиме и потребан притисак, док мања брзина даје растопљеном материјалу више времена за очвршћавање, што смањује попречни пресек разводних канала и повећава вискозност, што поново доводи до потребе за већим притисцима. Решење је оптимална брзина која треба да буде довољно мала да смањи хидродинамичке отпоре течењу, а довољно велика да спречи прекомерно хлађење и очвршћавање и пораст притиска.

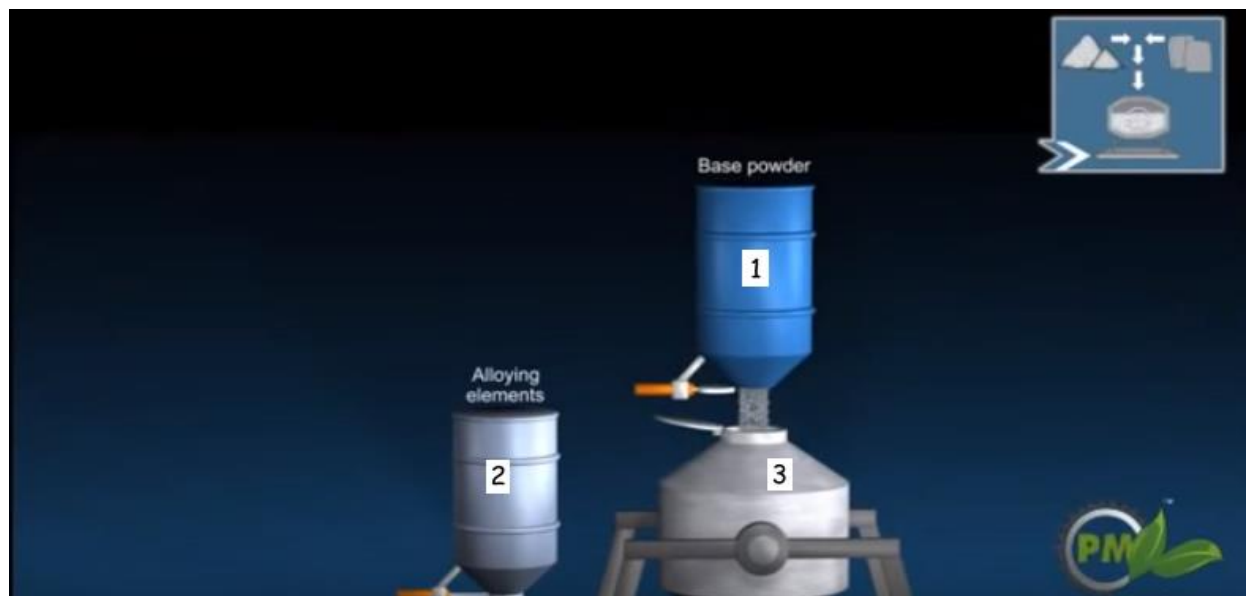
7.15. Фазе МІМ производње на контретном примеру – производња металног носача

У овом делу рада биће приказане све фазе МІМ поступка које постоје при производњи металног носача. У питању је стандардни МІМ поступак са синтеровањем и аутоматизована производња. Метални носачи произведени на овај начин показали су изузетно добре особине уз веома брз и ефикасан начин производње. На слици 64. дат је приказ финалног производа добијеног инјекционим бризгањем метала.

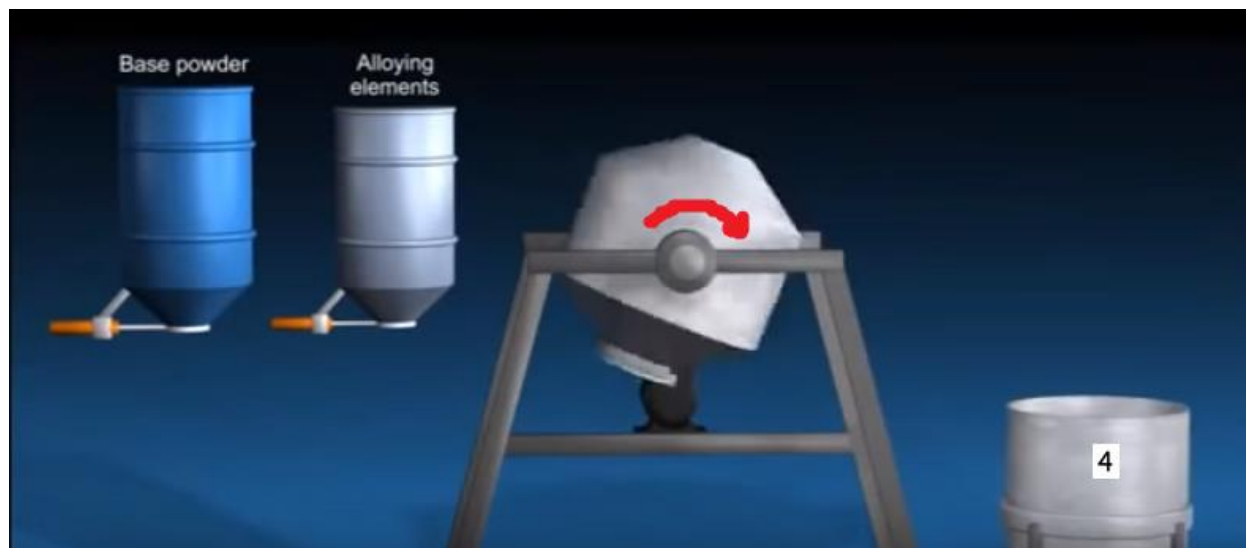


Слика 64. Приказ финалног производа [11]

Припрема смеше за бризгање је почетна и изузетно значајна фаза у производњи, јер особине производа у првом реду зависе од особина материјала који се обликује. У овој предфази је потребно поступно сјединити све компоненте у тестасту масу за бризгање. Прво се мешају метални прах и легирајући елементи у суду за мешање. Шема поступка приказана је на сликама 65. и 66.



Слика 65. Припрема смеше за бризгање (1-прашката база метала; 2-легирајући елементи; 3-суд за мешање) [11]



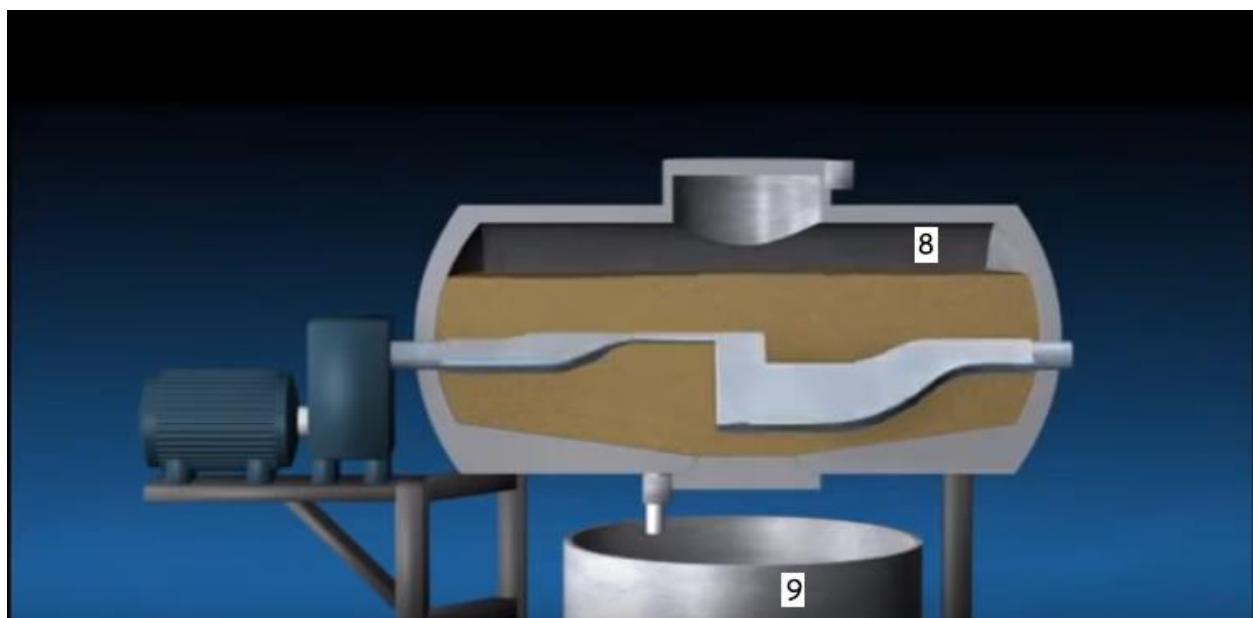
Слика 66. Мешање и сједињавање праха и легирајућих елемената (4-суд у који се сипа садржина) [11]

Након овог поступка, у суд за мешање се додају везива и пуниоци. Ове додатне компоненте ће са металним прахом формирати тестастку масу погодну за бризгање и обликовање. Шема овог поступка је дата на слици 67.



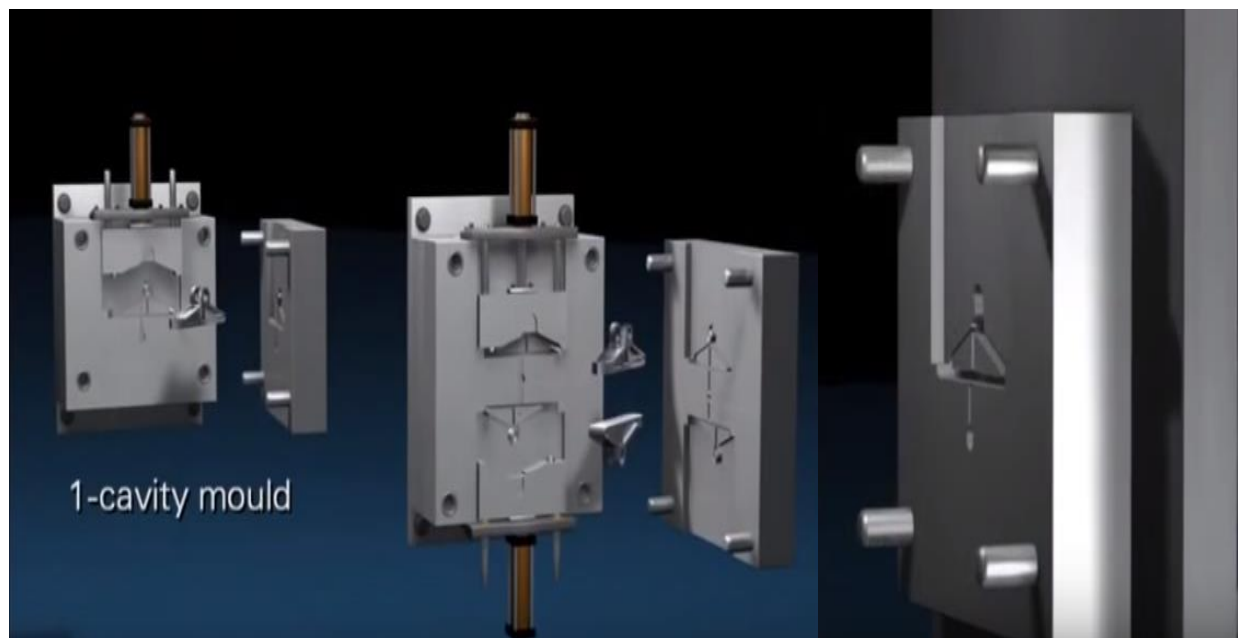
Слика 67. Процес сједињавања масе уз додавање полимера и пуниоца(5-смеша из суда 4; 5-суд са полимером; 6-суд са пуниоцем; 8-суд у коме се врши сједињавање компонената)
[11]

Суд у коме се врши сједињавање масе састоји се од коморе у којој се мешају компоненте, лопатице која меша или блендера, и електромотора који даје обртни момент. Мешање се одвија у контролисаним условима, а брзина обртања блендера треба да буде прилагођена стварању тестасте масе уједначеног састава у свим деловима запремине. На слици 60. приказана је шема рада мешалице која припрема масу за бризгање.



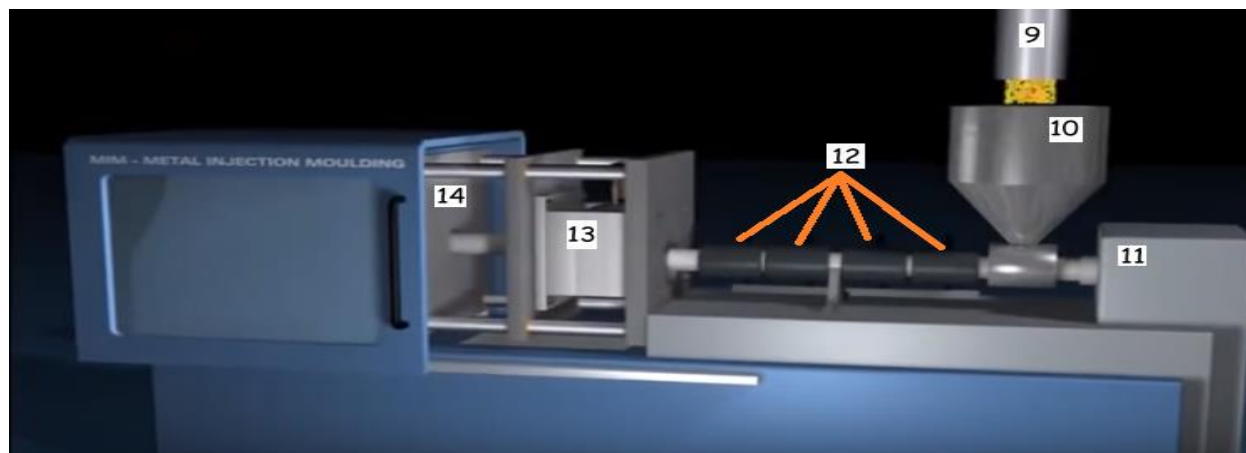
Слика 68. Процес сједињавања масе мешањем и гњечењем (9-суд у који се сипа смеша за бризгање) [11]

Калуп се углавном израђује од нерђајућег челика. Калуп даје облик и форму тестастој маси. Позиција и облик уливног канала је од изузетног значаја. Поред тога, веома велику улогу има величина толеранција. На слици 69. приказан је облик калупа за производњу металног носача. Део који се извади из калупа носи назив „зелени део“.



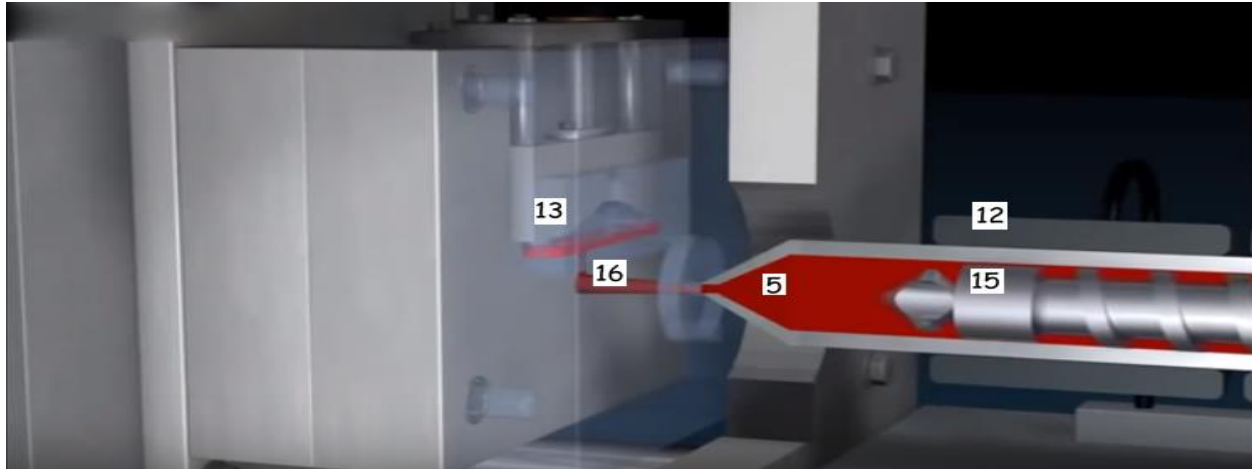
Слика 69. Калуп за бризгање [11]

Машина за инјекционо бризгање метала садржи уливни левак, у који се сипају гранулати, јединицу за бризгање, калуп, јединицу за затварање калупа и електромотор који даје ротацију пужу за бризгање. Овакав материјал захтева одговарајуће услове, температуру и притисак убризгавања у калуп.



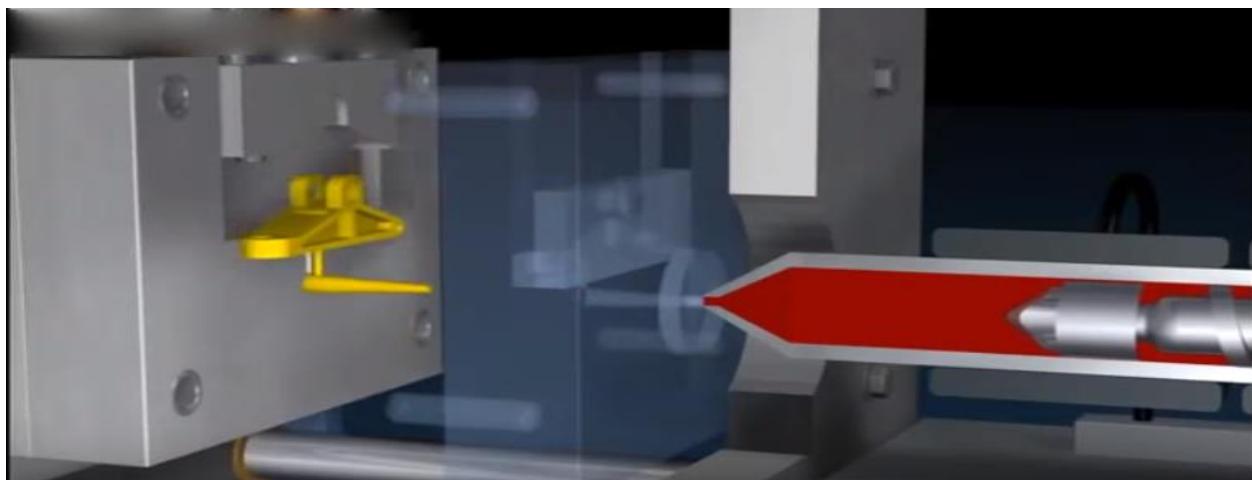
Слика 70. Приказ машине за инјекционо бризгање метала (10-уливни левак; 11-мотор који даје ротацију пужу за бризгање; 12-прстенови грејача; 13-дводелни калуп; 14-покретне плоче) [11]

Када је реч о фази када се маса убризгава у калуп, веома је важан параметар притисак убризгавања, који у великој мери утиче на ударну жилавост комада. Параметре треба подесити тако да густина материјала у калупу након убризгавања буде што је могуће већа. Осим овога, температура калупа је такође битан фактор. Овај калуп има четири главна дела – две плоче које се затварају и два дела унутар њих, од којих се један креће нормално на правац кретања носача, а други служи за избацивање готовог комада из калупа. На слици 71. дат је приказ периода када се попуњава калуп.



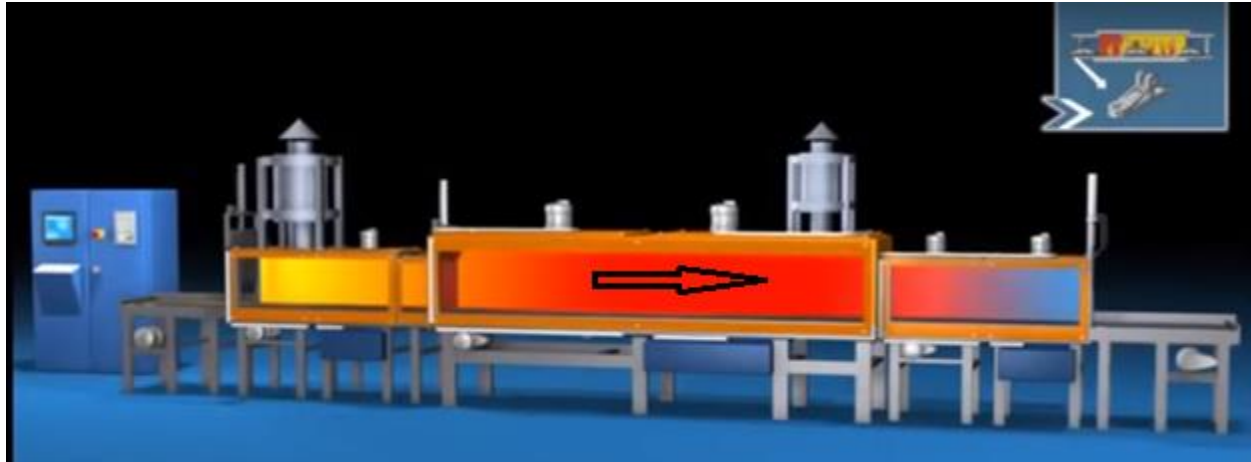
Слика 71. Процес убризгавања масе у калуп (15-пуњ за инјекционо брзгање; 16-уливни канал) [11]

Када се калуп попуни и маса која се налази у калупу очврсне, отпресак се избацује из калупа уз помоћ покретног дела унутар калупа који се креће у истом правцу као и носач. Тренутак избацивања из калупа дат је на слици 72. На слици се види да се уливни канал и разводни канал после очвршћивања у калупу налазе на отпреску и да се морају уклонити пре синтеровања.



Слика 72. Део излази из калупа [11]

Након вађења из калупа, део пролази кроз линију за уклањање везива и синтеровање. На слици 73. приказане су различитим бојама температурне разлике у појединим зонама ове линије. Први део линије је намењен за уклањање полимерног везива који је до сада имао улогу да омогући што боље обликовање металног праха. Уклањање везива се дешава на температурама које су ниже од температуре синтеровања. Након уклањања везива порозност металног носача је изузетно велика. На слици 74. приказан је тренутак уласка дела у комору за уклањање везива.

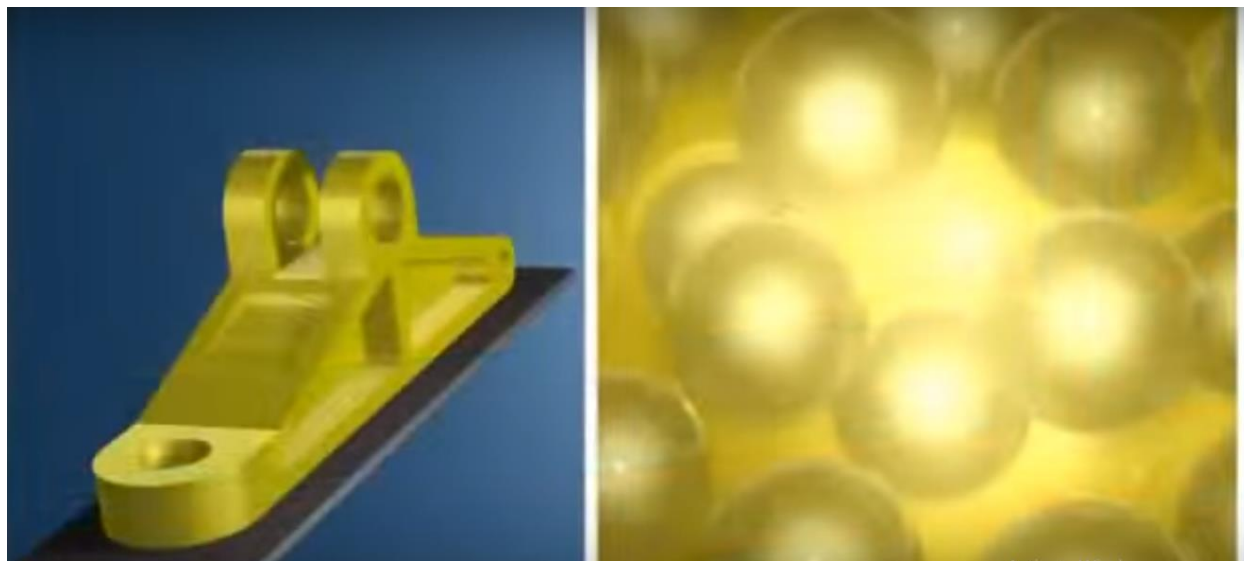


Слика 73. Апаратура за уклањање везива и синтеровање [11]



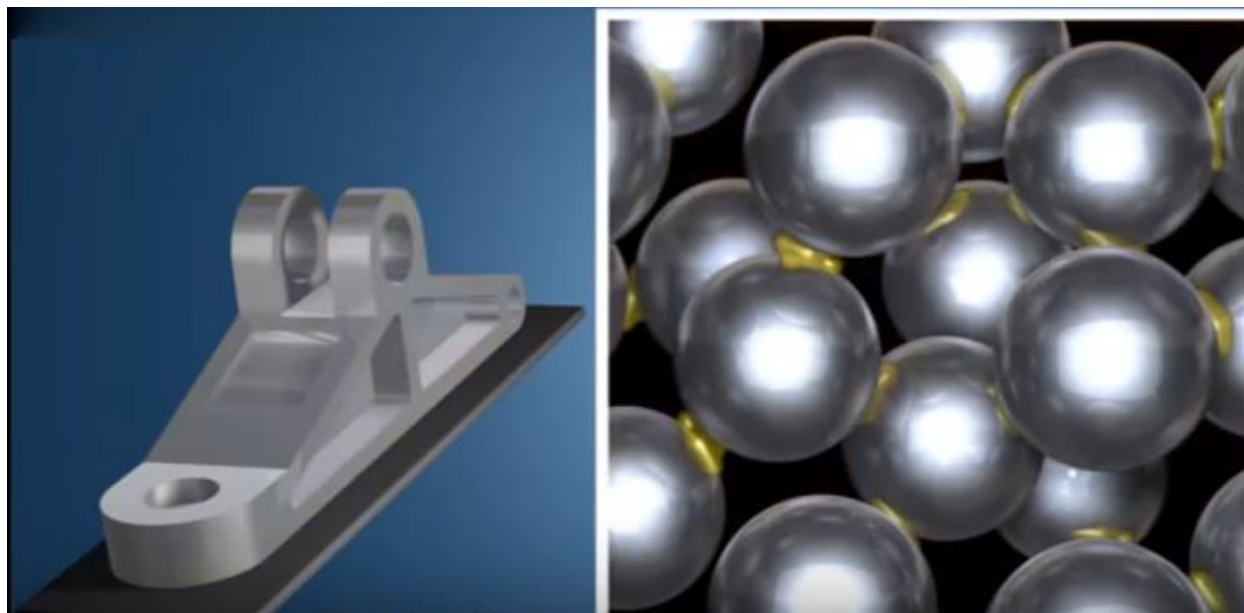
Слика 74. Тренутак уласка дела у комору за уклањање везива [11]

На слици 75. приказан је „зелени део“ и шема његове структуре. Кугличасти елементи структуре представљају честице метала, а жутом бојом су означене честице полимера које су око честица метала. На слици се види да су велика растојања између честица метала и таква структура је неповољна са становишта механичких особина дела, због чега се и назива „зелени део“. У овој фази производње, метални производ има највећу запремину.



Слика 75. Део и структура дела пре уклањања везива [11]

Након уклањања полимерног везива, зелени део постаје „смеђи део“. Производ у овој фази се одликује великом порозношћу, јер је уклоњено везиво а растојања између честица метала су иста, стварајући микро-шупљине. Структура и облик смеђег дела је приказана на слици 76.



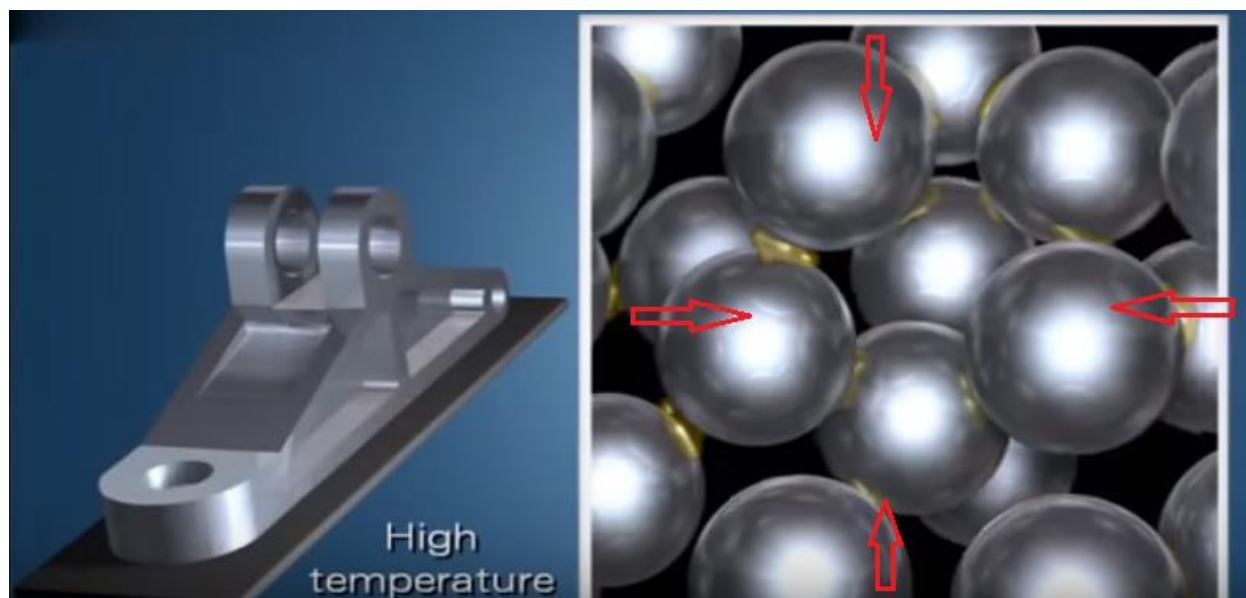
Слика 76. Део и структура дела након уклањања везива [11]

На слици 77. приказан је тренутак уласка смеђег дела у комору за синтеровање на аутоматизованој линији. Бојом је означена разлика у температури.



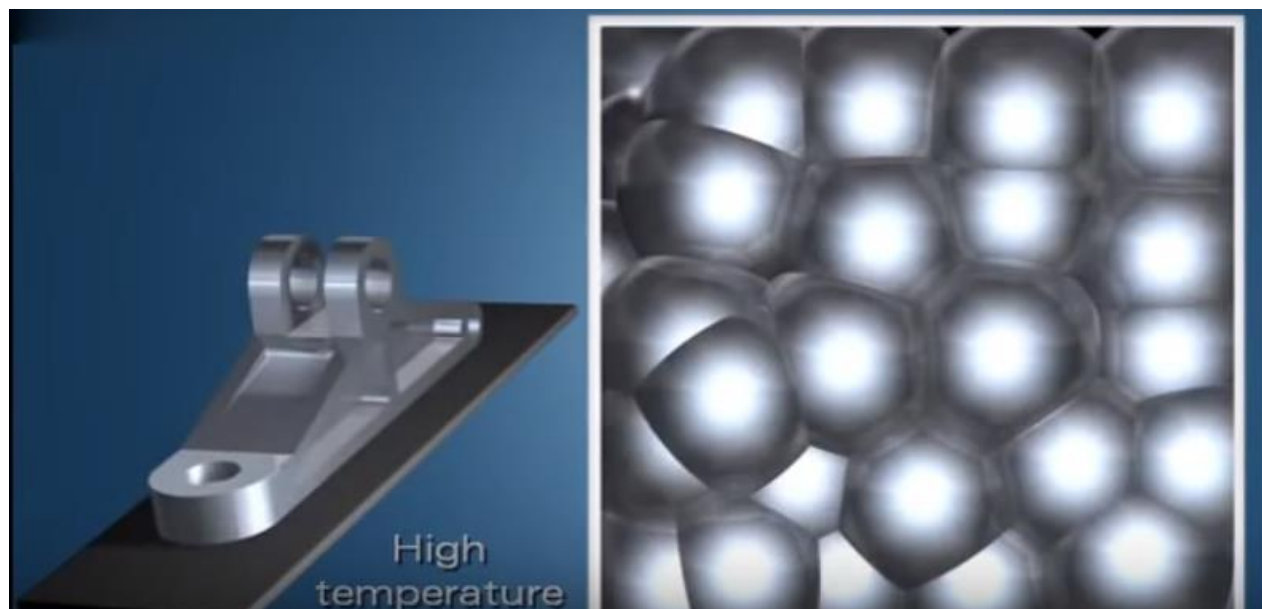
Слика 77. Улазак у комору са високом температуром за синтеровање [11]

Када део доспе у комору за синтеровање, честице метала услед високе температуре и дејства притиска смањују међусобна растојања и повећавају контактну површину. Синтеровање се одвија у строго контролисаним условима у циљу што већег смањења порозности материјала. На слици 78. приказане су честице метала које се постепено приближавају током процеса синтеровања. Такође, могу се приметити остаци везивног материјала који се постепено губи.



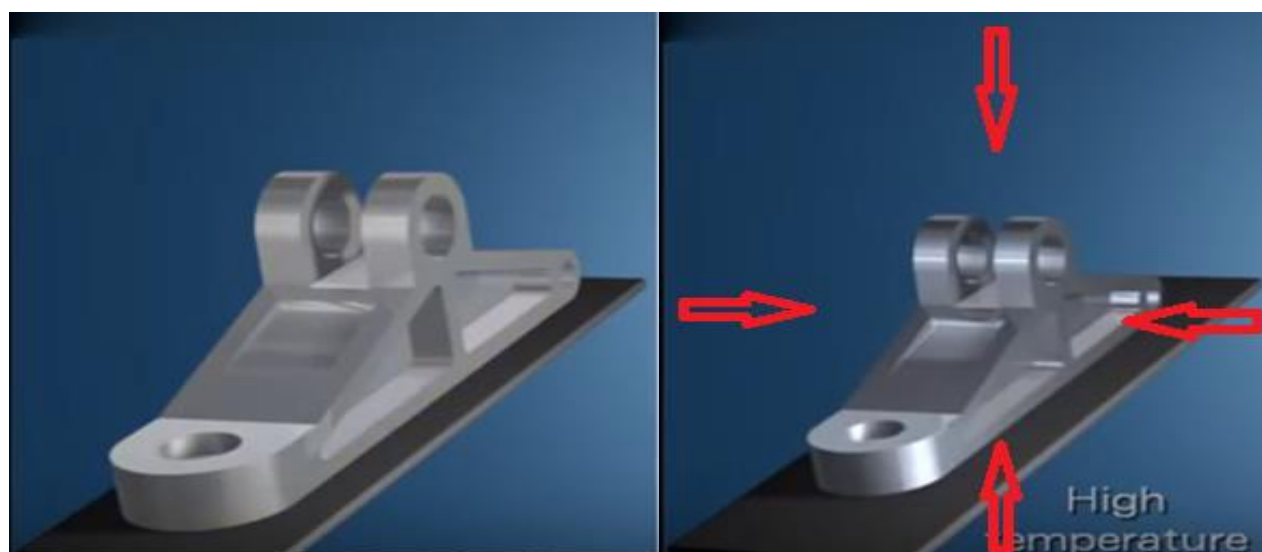
Слика 78. Постепено смањивање порозности приликом синтеровања [11]

Након синтеровања, смеђи део постаје „метални део“. То је део на највећем густини и најмањом запремином у овом производном процесу. На слици 79. приказан је метални део и шема структуре тог дела. Честице металног праха су срасле и максимално смањиле порозност. Поред тога, на слици се примећује да нема више остатака везива у структури материјала.



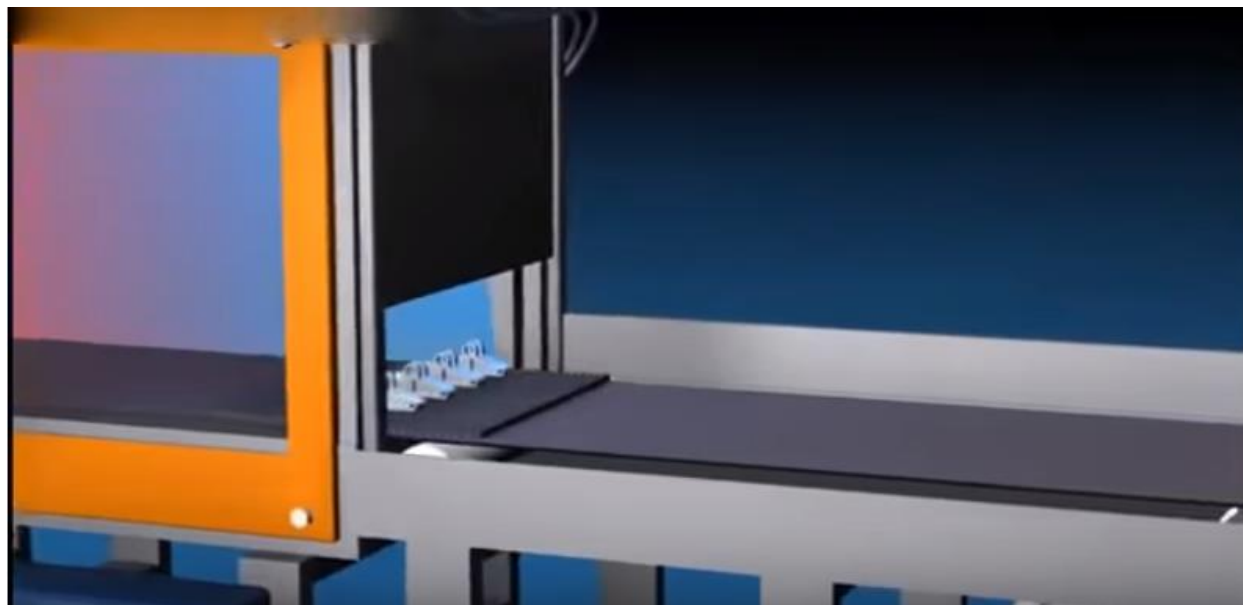
Слика 79. Изглед дела и структуре након синтеровања на високој температури [11]

Услед повећања густине, запремина дела се видно смањује. На слици 80. са леве стране је приказан део након вађења из калупа, а са десне део након синтеровања. Примећује се да је запремина дела видно смањена.



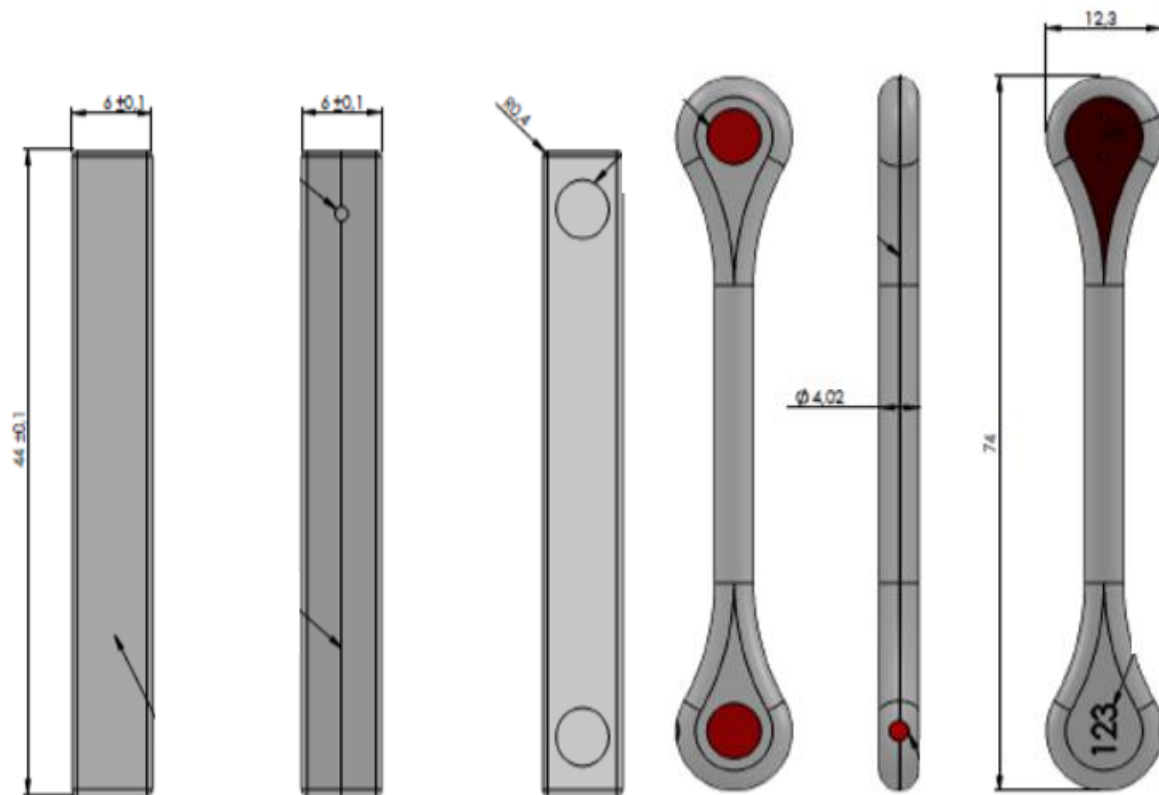
Слика 80. Смањена запремина дела након синтеровања [11]

На слици 81. приказан је тренутак када синтеровани делови напуштају комору за синтеровање. Плавом бојом је означена зона са нижом температуром на излазу из коморе. овакав начин производње је високо аутоматизован и примењен у многим земљама, међу којима највеће интересовање показује Кина.



Слика 81. Делови напуштају комору за синтеровање [11]

7.16. Анализа механичких својстава прашкастих материјала на узорку



Слика 82. Узорци који се испитују [3]

Испитују се два облика епрувета – правоугаона служи за испитивање ударне жилавости, а друга епрувета, која се најчешће назива „dog bone“ епруветом, служи за испитивање тврдоће. Епрувете су израђене од истог материјала, челика 4140.

Материјал 4140 је ознака за 42CrMo_4 – нисколегирани челик. Сировина је у облику гранула која је спремна за поступак инјекционог бризгања метала. Хемијски састав после синтеровања је:

угљеник	0,35-0,45%
хром	0,9-1,2%
молибден	0,15-0,30%
гвожђе	остали део сировине

Табела 13. Састав легуре за МИМ поступак [3]

Исти узорак се испитује по три пута и узима се средња вредност. Постоје по три узорка сваке епрувете, тако да се исти материјала испитује 9 пута. Пре топлотне обраде испитана је тврдоћа по Brinellu. Вредности су дате у табели 14.

MIM									
материјал	редни број	Dog bone				6x6x44			
		HB30-1	HB30-2	HB30-3	HB30-srednja	HB30-1	HB30-2	HB30-3	HB30-srednja
4140	1.	190,0	187,7	188,1	188,6	176,5	171,3	174,6	174,1
	2.	183,9	186,1	186,5	185,5	193,4	180,5	175,8	183,2
	3.	195,2	191,5	204,6	197,1	169,3	164,7	175,2	169,7
	srednja	189,7	188,4	193,1	190,4	179,7	172,2	175,2	175,7
	max	195,2	191,5	204,6	197,1	193,4	180,5	175,8	183,2
	min	183,9	186,1	186,5	185,5	169,3	164,7	174,6	169,7
	raspon	11,3	5,4	18,1	11,6	24,1	15,8	1,2	13,5

Табела 14. Тврдоћа по Brinellу пре топлотне обраде [3]

Такође, вршено је и испитивање тврдоће узорка по Роквелу. Резултати испитивања дати су у табели 15.

MIM									
материјал	редни број	Dog bone				6x6x44			
		HRC-1	HRC-2	HRC-3	HRC-srednja	HRC-1	HRC-2	HRC-3	HRC-srednja
4140	1.	41,0	41,5	42,0	41,5	42,0	41,0	41,5	41,5
	2.	41,0	41,5	41,0	41,2	42,0	42,0	42,5	42,2
	3.	42,0	42,0	42,0	42,0	43,0	42,0	41,0	42,0
	srednja	41,3	41,7	41,7	41,6	42,3	41,7	41,7	41,9
	max	42,0	42,0	42,0	42,0	43,0	42,0	42,5	42,2
	min	41,0	41,5	41,0	41,2	42,0	41,0	41,0	41,5
	raspon	1,0	0,5	1,0	0,8	1,0	1,0	1,5	0,7

Табела 15. Тврдоћа по Rockwellу након топлотне обраде [3]

За испитивање ударне жилавости користи се Шарпурева. За ово испитивање се користи правоугаона 6x6x44 епрувета. Резултати испитивања су дати у табели 16.

MIM		
6x6x44		
1-1	1-2	1-3
25J	17J	32J

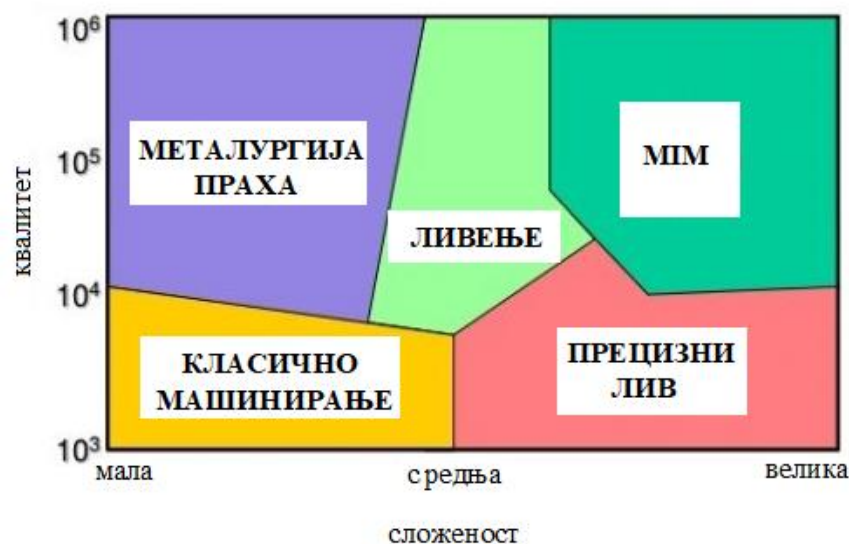
Табела 16. Резултати испитивања ударне жилавости [3]

8. ПРИМЕНА MIM-A

MIM побољшава квалитет производа, смањује време производње и постиже се уштеда трошкова чак до 50% у односу на поступке ковања челика и поступке прецизног лива. Као резултат тих предности MIM процес постаје широко прихваћен као стандардни поступак бројних индустријских сектора, укључујући:

- медицину
- машинство
- прецизну механику
- аутомобилску индустрију
- телекомуникацију
- пољопривреду
- инструментацију
- индивидуалних уређаја

На слици 83. приказане су основне карактеристике и обележја производа који су добијени различитим поступцима производње, као и степен сложености производа.



Слика 83. Карактеристике различитих начина производње [9]

8.1. MIM производи

Браве аутомобила. Ове MIM компоненте користе се на многим возилима. MIM компоненте које су прецизно израђене осигуравају висок ниво сигурности против отварања на силу (слика 84).



Слика 84. Браве аутомобила [12]

Сензори притиска, кућиште и поклопац – одликује се посебним магнетним атрибутима, што се постиже коришћењем посебно одабраних МІМ материјала (слика 85).



Слика 85. Ручна кочница [12]

МІМ компоненте имају широку примену у производњи брава (слика 86).



Слика 86. Цилиндар за закључавање [12]

Профилни зглобови осигуравају једноставно и сигурно спајање профила и могу се раставити без разарања. То олакшава монтажу, подешавање и растављање. Компоненте су галвански обложене због заштите од корозије (слика 87).



Слика 87. Профилни зглобови [12]

Примена у медицини је у облику једнократних инструмената високе димензионалне прецизности. Преко 25% производа у медицини произведено је МИМ поступком (слика 88).



Слика 88. Медицински инструмент за постављање катетара за перитонеалну дијализу [12]

9. МАШИНЕ КОЈЕ СЕ КОРИСТЕ ТОКОМ МИМ ПРОЦЕСА



Слика 89. Машина за мешање праха модела „ Ribbon Blender“ [13]

Ова мешалица има моделе капацитета 65, 130, 200, 300, 1000 и 1500 литара.

капацитет	снага	брзина	димензије
65 L, 25 kg	220V, 1/2HP, 1PH	20rpm	62 x 80 x 121 cm
130 L, 50 kg	220V, 1HP, 1PH	30rpm	65 x 98 x 137 cm
200 L, 70kg	220V, 2HP, 3PH	20rpm	65 x 125 x 137 cm
300 L, 100kg	220V, 5HPH, 3P	20rpm	160 x 77 x 125 cm
1000 L, 325kg	220V, 7.5HP, 3P	12rpm	185 x 100 x 165 cm
1500 L, 525kg	220V, 3PH, 10HP	8rpm	220 x 112 x 200 cm

Табела 17. Спецификације Ribbon Blender машине [13]



Слика 90. Машина за синтеровање модела „ SM60“ [14]

снага	220/380V, 50/60Hz
распон сила компресије	15—260 KN
распон температура	400—1200 °C
величина располагајуће површине	95 cm ²
растојање између електрода	350mm
димензије машине	1350×880×1970 mm

Табела 18. Спецификације машине SM60 [14]



Слика 90. Машина за бризгање, модел „ Bengbu Longhua 220t “ [15]

карактеристика	јединица	вредност
хидраулични радни притисак	МПа	14
сила притиска	KN	2000
пречник водећих стубова	mm	φ90
отворени ход	mm	380
сила уризгавања	KN	270
растојање између клипова	mm	140
позиција за бризгање	mm	0-140
пречник клипа	mm	φ70
пумпа мотора	KW	15
ход стубова за вођење	mm	200-500
димензије машине	m×m×m	5,6×1,5×2,35
тежина машине	T	7,5

Табела 19. Карактеристике машине [15]

10. ЗАКЉУЧАК

Последњих десет година металургија праха је све чешће решење за делове од којих се не захтева велика отпорност на диманичка оптерећења. Зато се врше бројна испитивања на динамичка и друга оптерећења, која ће довести до најквалитетнијих материјала који сачињавају композит у најоптималнијем односу за најбоље особине. Осим материјала и процентуалног удела, начини обраде и производње делова такође утичу на квалитет финалног производа. Праћење понашања материјала у калупу и откривање критичних тачака такође доприноси бољем квалитету производње. Слика расподеле притисака и температура унутар калупа даје могућност пројектовања најпогоднијег облика калупа са најбољим условима и минималним грешкама у конструкцији. Такође, значај конструкције калупа је и у томе што се смањује број корака који следе након вађења из калупа. Смањење броја корака у производњи и што већи степен аутоматизације ће окарактерисати овакав начин производње као најповољнији када је у питању сложеност конструкције металних делова и број компонената конструкције. Што се тиче МИМ поступка производње, постоје бројни поступци који су претходили развоју МИМ поступка, као што је употреба композита који се пресују. Легуре метала су се додавале полимерној бази како би се унапредиле механичке особине и отпорност. Тако су изабрани основни састојци МИМ материјала – метални прах и везиво. У поглављу 7. вршена су испитивања на ударну жилавост, где се показало да су најутицајнији фактори процеса температура, притисак убризгавања и количина металног праха у материјалу, тј. процентуални удео. Такође, постоји и критична маса, односно количина металног праха у материјалу, која условљава нагли пад отпорности материјала. Када је реч о синтеровању, главни параметри су температура, време дејства те температуре на део који се синтерује и притисак синтеровања. Променом ових вредности могу се значајно променити особине финалног производа. МИМ поступак је по особинама својих производа и сложености њихове конструкције заменио поступак израде делова прецизним ливом и омогућио производњу широког спектра производа који се користе у медицини, електротехници, аутомобилској индустрији, машинству итд.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Pachauri, Md. Haniuddin, *Optimization of Injection Moulding Process Parameters in MIM for Impact Toughness of Sintered Parts*, Алигар, 2015.
2. Б. Ђурковић, Д. Ђурковић, *Металургија ретких метала*, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 1991.
3. Љ. Сколар, *Металургија праха и синтер материјали*, Металуршки факултет, Загреб, 2015.
4. Д. Вилотић, *Технологија инјекционог пресовања полимера*, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2007.
5. X. Kong, *Development and characterization of polymer- metallic powder feedstocks for microinjection molding*, Париз, 2011.
6. Д. Божић, М. Митков, З. Вујовић, *Металургија праха*, МБГ, Београд, 1998.
7. M. German, A. Bose, *Injection Molding of Metals and Ceramics*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, Њу Џерси, 1997.
8. <http://www.custompartnet.com>, приступљено 8.9.2018. године
9. <https://www.optimim.com/mim-process>, приступљено 8.9.2018. године
10. <https://www.pressuretechnology.com>, приступљено 8.9. 2018. године
11. <https://www.youtube.com/watch?v=BoJbLGR6Dss>, приступљено 10.9.2018. године
12. <http://www.dshtech.com>, приступљено 10.9.2018. године
13. <https://dir.indiamart.com>, приступљено 10.9.2018. године
14. <http://www.china-superabrasives.com>, приступљено 10.9.2018. године
15. <https://bblhyzj.en.made-in-china.com>, приступљено 10.9.2018. године