

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Технологије прераде пластичних маса

Број индекса: 303/2013

Миланка М. Кутлешић

Специфичности технологија инјекционог бризгања прахова

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Недић, ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру мастер рада кандидат треба да изврши прикупљање, систематизацију и на одговарајући начин презентацију података везаних за технологије израде делова бризгањем прахова (металних и керамичких прахова) а затим синтеровањем. Потребно је да се кандидат упозна са технологијама металургије праха, технологијама добијања и бризгања прахова (ПИМ технологије), машинама које се користе у овим технолошким линијама и да прикаже примере примене. У посебном делу рада потребно је извршити могућа испитивања узорака добијених овом технологијом. Приликом израде рада потребно је да кандидат упозна технологије синтеровања које се користе у предузећима "CORUN" и "SINTER" из Ужица.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Увода разматрања,
2. Специфичности технологије синтеровања
3. Технологије бризгања прахова - ПИМ технологије,
4. Карактеристике прахова,
5. Машине за израду делова ПИМ технологијама,
6. Примери примене
7. Испитивање делова добијених ПИМ технологијом,
8. Закључци,
9. Литература.

Препоручена литература:

1. M. G. Randall, B. Animesh, Injection Molding of Metal and Ceramics, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 1997.
2. Powder Metallurgy Design manual, 2nd Edition, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 1995.
3. G. Joamin, B. S. Stringari, I. Emri, Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts, Centar for Experimental Mechanics, Ljubljana, 2012.

Крагујевац, 29.05.2015.

ментор:

Проф. др Богдан Недић

Резиме

У раду је извршено прикупљање и систематизација података везаних за технологије израде делова бризгањем прахова (металних прахова – МИМ или керамичких прахова – СИМ) и њихово синтеровање. Описана је технологија металургије праха, добијање сировине, бризгање прахова (ПИМ технологија), као и одстрањивање везива. Представљене су машине на којима се изводе ове операције, од саме припреме праха па све до добијања готовог производа, различитих облика и димензија. Приказани су и неки од примера где се најчешће примењује ПИМ технологија. На крају рада дат је пример испитивања узорака, добијених овом технологијом, у предузећу “SINTER” из Ужица.

Кључне речи:

Инјекционо бризгање праха (ПИМ), бризгање металног праха (МИМ), бризгање кермачког праха (СИМ), металургија праха (РМ), сировина, одстрањивање везива, синтеровање.

Summary:

In work is executed the collection and systematization of data related to technologies for parts making injection moulding powder (metal injection moulding – MIM, ceramic injection moulding – CIM) and their sintering. Described is technology of powder metallurgy, obtaining feedstock, powder injection moulding (PIM technology), and the removal of binder (debindin). Presented are machines that run these operations, then the preparation of powder until obtaining the finished product, different shapes and sizes. They are shown some of the examples where the most frequently applied Powder Injection Moulding technology. At the end, an example is given of test samples, obtained this technology, in the enterprise “ SINTER” from Užice.

Keywords:

Powder injection moulding (PIM), Metal Injection Moulding (MIM), Ceramic Injection Moulding (CIM), Powder metallurgy (PM), Feedstock, Debinding, Sintering.

САДРЖАЈ

1.	УВОДНА РАЗМАТРАЊА	3
2.	ТЕХНОЛОГИЈА ДОБИЈАЊА МАТЕРИЈАЛА ПРОЦЕСОМ СИНТЕРОВАЊА.....	5
2.1	Основе металургије праха	7
2.2	Сировине	15
2.3	Припремање и мешање праха	16
2.4	Пресовање	17
2.5	Синтеровање	17
2.6	Калибрисање.....	19
3.	<i>PIM</i> ТЕХНОЛОГИЈА.....	21
3.1.1	Процес ливења праха под притиском	22
3.1.2	Процес имплетације	24
3.1.3	Компонента дизајн аспекта.....	25
3.1.4	Студије случаја.....	27
3.2	<i>SIM</i> Технологија	31
3.3	<i>MIM</i> Технологија.....	33
3.4	<i>MICRO-PIM</i> Технологија.....	36
4.	ПРАХ ЗА <i>PIM</i> И <i>MIM</i> ТЕХНОЛОГИЈЕ	39
4.1	Припрема сировина.....	39
4.2	Формулација везива	41
4.3	Производња праха	42
4.3.1	Керамички прахови.....	42
4.3.2	Метални прахови	43
4.3.3	Субмикронски прахови	43
4.4	Карактеристике идеалног <i>PIM</i> праха	44
5.	МАШИНЕ ЗА ОБРАДУ <i>PIM</i> ТЕХНОЛОГИЈОМ.....	46
6.	ПРИМЕРИ ПРИМЕНЕ <i>PIM</i> ТЕХНОЛОГИЈЕ.....	54
6.1	Примена умрежавања металних и керамичких компоненти у биомедицинске сврхе	54
6.2	Аутомобилска индустрија	56
6.3	Алати за сечење	57

6.4	Индустријска керамика.....	58
6.5	Медицински инструменти	59
7.	ПРИМЕР ИСПИТИВАЊА УЗОРАКА ДОБИЈЕНИХ <i>РІМ</i> ТЕХНОЛОГИЈОМ	60
8.	ЗАКЉУЧАК	63
	ЛИТЕРАТУРА.....	64

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Инјекционо бризгање прахова (*Powder Injection Molding - PIM*) се први пут појавило као производни процес тридесетих година прошлог века. Инјекционо бризгање керамичких прахова је примењено 1937. године у производњи свећица за аутомобилску индустрију. Међутим, убрзо је замењено другим технологијама, те се примена инјекционог бризгања керамичких прахова, све до скоро, ограничавала на израду керамичких компоненти у случајевима када класичне методе нису могле бити примењене. Инјекционо бризгање керамичких прахова се поново нашло у значајнијој употреби 1970-их и 1980-их година када се користило у изради гасних турбина. Данас *PIM* технологија долази до пуног изражаја. Развијају се технике инерционог бризгања широког спектра различитих материјала од керамичких прахова (прахови алуминијума, цирконата, силицијум-нитрида, силицијум-карбида, алуминијум-нитрида и многих других електронских керамика), преко металних прахова (прахови челика, нерђајућег челика, никла, бакра) до прашкастих карбида, суперлегура, интерметала, композита са керамичком или металном матрицом (*Ceramic Matrix Composites - CMC*, *Metal Matrix Composites - MMC*). Овако широк спектар материјала омогућава сврставање *PIM* технологије у групу актуелних производних техника. *PIM* технологије, грубо гледано, се могу поделити на *MIM* технологију (*Metal Injection Molding* - бризгање металних прахова са растопљеним везивом) и *CIM* технологију (*Ceramic Injection Molding* - бризгање керамичких прахова са растопљеним везивом). Даља подела *PIM* технологије се може извршити на бризгање прахова под ниским (*Low Powder Injection Molding - LPIM*) и високим притиском (*High Powder Injection Molding - HPIM*).

Имајући на уму да у региону југоисточне Европе не постоји произвођач ове врсте компоненти, који може да задовољи потребе овог тржишта, досадашње искуство и знање из сродних области омогућава једноставно усвајање *CIM* технологије.

У оквиру овог рада, у другом поглављу су приказане металургија праха и технологија добијања производа процесом синтеровања.

У трећем поглављу је описана *PIM* технологија, као и *CIM*, *MIM* и *MICRO-MIM* технологије, њихове карактеристике, процес добијања делова, предности и недостаци ових технологија.

У четвртном поглављу је описан прах за бризгање *PIM* технологијом, начин добијања, карактеристике, састав и његов даљи процес прераде у *PIM* технологији.

У петом поглављу су дати примери машина за обраду *PIM* технологијом. То су машине за бризгање, млевење, мешање, пећи за синтеровање. Дате су основне карактеристике

машина целе линије добијања производа *PIM* технологијом, од добијања праха до добијања готовог производа.

У шестом поглављу су дати примери примене *PIM* технологије, и предности примене у појединим областима.

У седмом поглављу је приказан пример испитивања узорака добијених *PIM* технологијом. Извршена су испитивања густине, порозности, тврдоће и хемијског састава. Дате су слике машина на којима се вршило испитивање као и слике полираних површина узорака.

На крају рада дат је закључак и поглед коришћене литературе.

2. ТЕХНОЛОГИЈА ДОБИЈАЊА МАТЕРИЈАЛА ПРОЦЕСОМ СИНТЕРОВАЊА

Металургија праха ($PM \Leftarrow en. Powder Metallurgy$) је технологија производње механичких конструкцијских и других делова од металних прахова. При томе се одвијају два процеса:

1. Компактирање – збијање металног праха у жељени облик
2. Синтеровање – повезивање честица праха у чврсту масу.

Механичка својства производа су углавном једнака, а у неким случајевима и боља од производа истог хемијског састава који су израђени резањем струготине, ваљањем или ковањем, *Табела 1.*

Табела 1. *Предности и недостаци РМ [3]*

ПРЕДНОСТИ	НЕДОСТАЦИ
Могућа је масовна производња делова у коначном облику (<i>net shape</i>) или блиско коначном облику (<i>near net shape</i>) без додатне опреме скидањем струготине	Јављају се специфичне потешкоће у складиштењу прахова метала (корозија, опасност од пожара)
Постижу се тачније димензије делова него код већине поступака ливења	Прахови метала су скупи
Ситнозрна структура	Висока цена потребне опреме и алата
Могу се обликовати метали које је тешко обликовати другим поступцима	Ограничени су облици делова који се могу изградити због потешкоћа латералног течења праха у калупу.
Мали су губици материјала (око 3%)	Јављају се промене густоће, обично код делова сложених облика
Могућа је израда производа од смесе више материјала који нису међусобно топиви као смеша метала и керамике	
Аутоматизацијом процеса могу се постићи велике продуктивности	

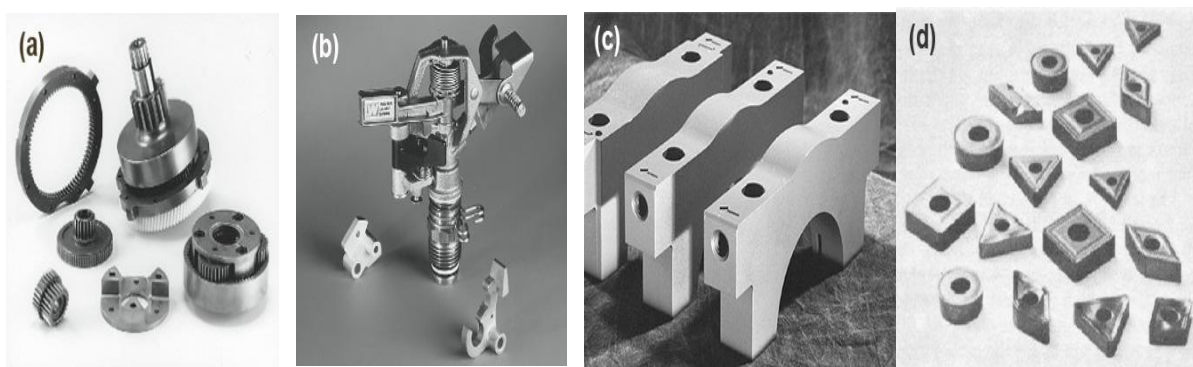
Основна својства производа прашкасте металургије:

1. мала површинска хrapавост ($< 63 \mu\text{m}$),
2. велика тачност димензија ($< 0,125 \text{ mm}$),
3. велика сложеност облика,
4. производност је велика (> 100 делова/h) до средња ($> 10, < 100$ делова/h),
5. произведена количина је велика (> 5000 делова) до средња ($> 100, 5000$ делова),
6. високи до средњи трошкови.

Према томе, поступци прашкасте металургије конкуренција су традиционалним технологијама: скидање струготине, прецизно ливење, ливење под притиском, ковање у калупима итд.

У *PM* се највише користе прахови гвожђа, челици и алуминијум. Користе се, такође, и прахови од бакра, легура бакра и супер легура (на бази никла и кобалта). Као и ватроотпорни метали као што су молибден и волфрам. У материјале *PM* често се укључују и карбиди метала, нпр. волфрам карбид.

Типични производи *PM* су: зупчаници, ланчаници, лежајеви, електрични контакти и различити делови машина. Због 2D облика и потребе за ефикасним подмазивањем, када се производе у великим количинама, зупчаници и лежајеви су идеални за *PM*, слика 1.



Слика 1. Производи добијени технологијом праха [3]

- a) примери типичних производа поступком прашкасте металургије,
- b) горња прекидна полука прскалице за воду, израђена од месинга – преласком с поступка ливања у калупе на поступком *PM* постигнута је уштеда од 60 %,
- c) поклопци главних лежаја *General Motors-ovog* мотора од 3,8 и 3,1 L,
- d) плочице за обраду метала резањем од тврдих метала.

2.1 Основе металургије праха

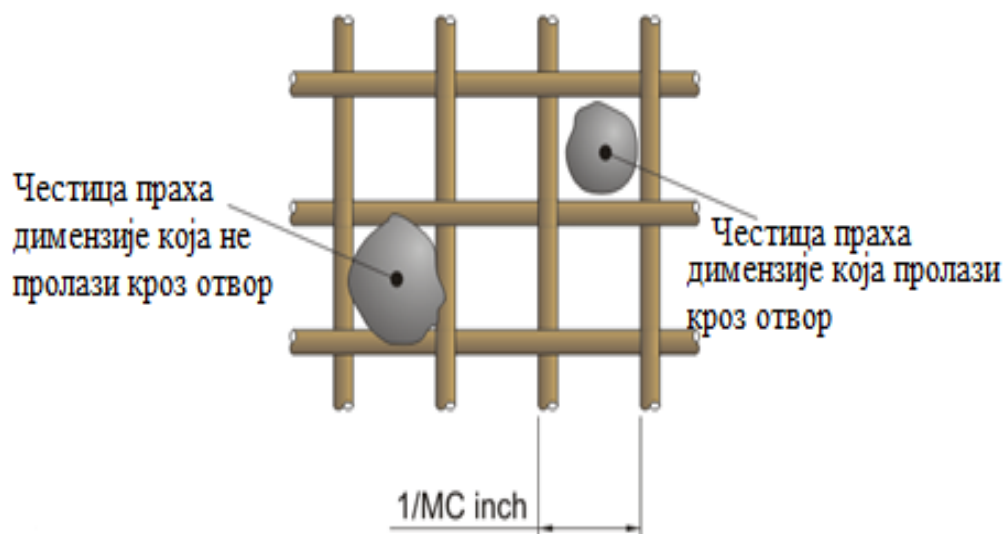
Прахови

Прахови су фино уситњене круте честице. Инжењерски прашови обухватају металне и керамичке прашове. Геометријска својства прахова су:

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

Димензије и расподела честица

При одређивању димензија и расподеле 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 мм). 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/мм, односно 16 отвора/мм². Што је већи *MC* то су ситнији отвори сита и кроз њих ће пролазити ситније честице. Производе се прашови димензија честица $10^{-6} \div 0,1$ mm.



Слика 2. Честице праха и сито за сортирање [3]

Облици и грађа честица

Облици и грађа честица у великој мери зависе од технологије њихове производње. На слици 3 приказани су различити облици честица прахова.



Слика 3. Честице праха [3]

Технолошка својства праха:

- способност течења – зависи од величине и облика честица и 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 праха, смањења порозности и повећања густине производа при синтеровању.

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 заперминске густине са стварном густином (која је већа од заперминске).

$$\text{фактор паковања} = \text{заперминска густина} / \text{стварна густина} < 1$$

Према томе, фактор паковања је увек мањи од 1.

- типичне су вредности фактора паковања прахова пре компактирања $0,5 \div 0,7$,
- 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.
$$\text{порозност} + \text{фактор паковања} = 1$$

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

Прахови материјала који се користе у *РМ* су скупљи од комадних материјала у облику шипки и плоча, јер се за добијање прахова морају улагати додатне енергије.

У спровођењу процедуре *РМ* 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
 - бакара.
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:
 - нехрђајућег челика,
 - одређене легуре бакра и
 - брзорезни алатни челици .

Производња праха

Готово сви метали се могу производити у облику праха, а производњом прахова баве се специјализоване компаније које се не баве производњом делова од праха.

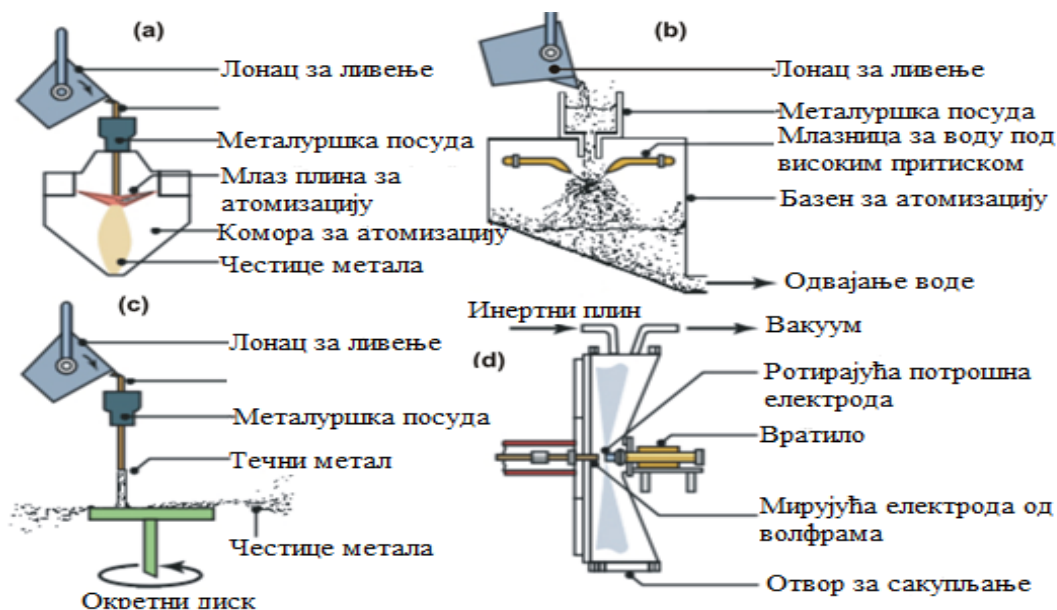
У производњи прахова користе се три основна поступка:

1. атомизација – распршивање,
2. хемијски поступак,
3. електролитички поступак.

Поред тога, честице се уситњавају механичким поступцима.

Користе се четири поступка атомизације:

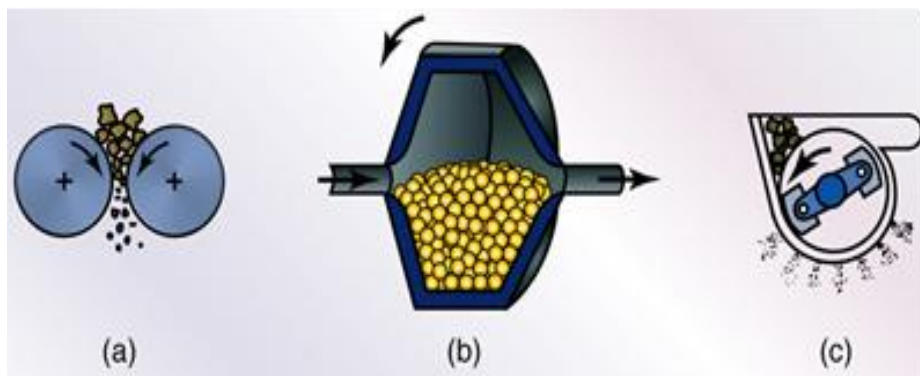
- плином,
- водом,
- центрифугална са ротирајућим диском и
- ротирајућом потрошном електродом.



Слика 4. Поступци атомизације [3]

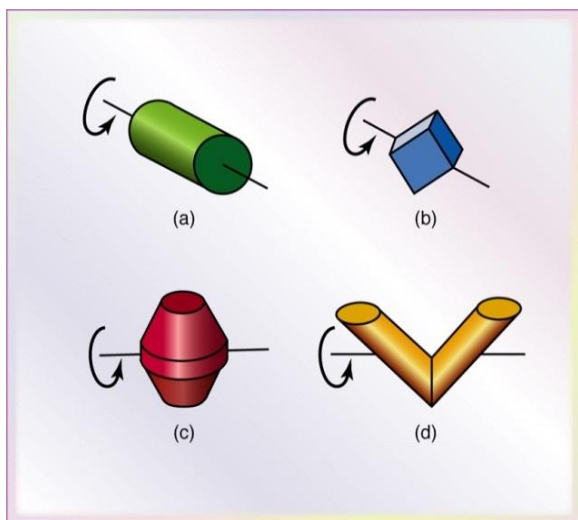
Поступци механичког млевања или дробљења су приказани на слици 5.

- Међу обртним ваљцима,
- у млину са куглицама,
- у млину са чекићима.



Слика 5. Механичко мрвљење праха [3]

Због јаког абразивног деловања прахова, за њихово мешање се не користе мешалице са ротирајућим пропелерима него само ротирајуће или претурајуће коморе. На слици 6 су приказани: (а) облици ротирајућих комора у којима се мешају прахови и (б) мешалица са куглицама за припрему мешавине металних прахова.



Облици комора за мешање



Мешалица са куглама

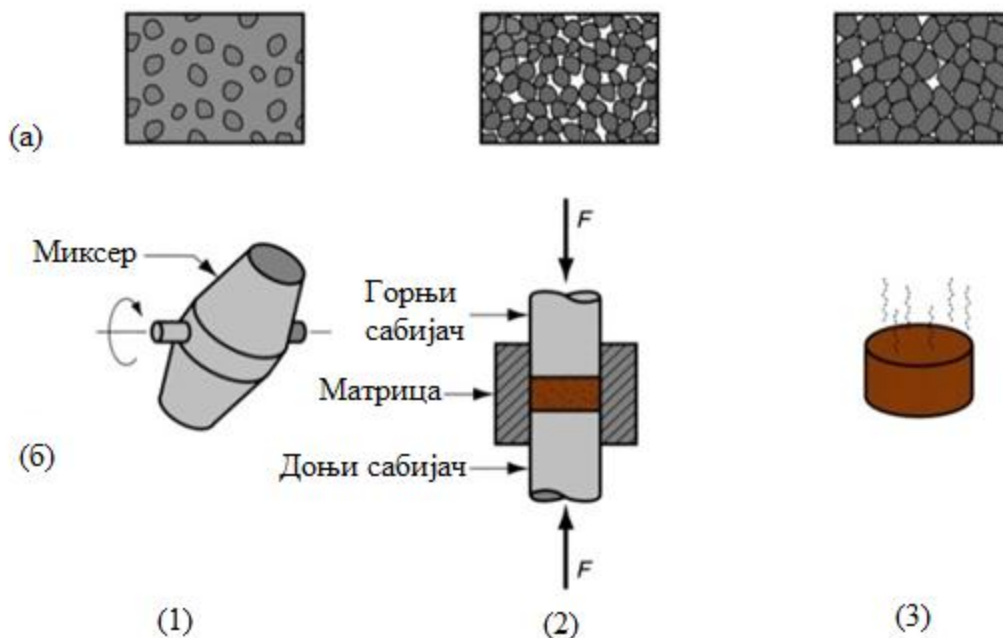
Слика 6. Опрема за мешање прахова [3]

Конвенционални поступак обликовања/синтеровање

Куповином прахова, код конвенционалног поступка *РМ* (обликовање и потом синтеровање) проводе се у три корака, слика 7:

1. **мешање** – формирање хомогене мешавине прахова
 - мешавина обухвата прахове различитих крупноћа зрна и/или
 - прахове различитих хемијских састава
2. **компактирање** – сабијање мешавине прахова уз обликовање задате геометрије
3. **синтеровање** – грејање 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, густоћа или пак неко друго својство.



Слика 7. Конвенционални поступак РМ [3]

(а) стање честица, (б) операције колоне: (1) мешање, (2) компактирање, (3) синтеровање

Компактирање у калупу

Код компактирања се под високим притиском прах сабија и обликује жељена геометрија:

- конвенционална је операција компактирања пресовањем код кога наспрамни жигови сабијају прах који се налази у калупу,
- комад након пресовања назива се „зелени комад“ (ен. „green compact“), 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.

Механичка преса, максималне силе 7,3 MN, за компактирање прахова метала приказана је на слици 8.

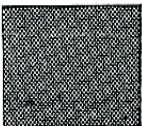


Слика 8. Механичка преса за компактирање прахова [3]

На скицама 9, 10 и 11 приказана су међусобна поређења делова израђених технологијом синтеровања и делова израђених другим производним поступцима.

Prednosti livenih delova Advantages of cast parts		Prednosti sinterovanih delova Advantages of sintered parts		LIVENI DELOVI / CAST PARTS											
		Livenje u pesku Sand casting				Livenje u kalupima Mould casting				Precizni liv Precision cast	Livenje u kalupima Mould casting	Livenje pod pritiskom Casting under pressure	Sinterovani Die casting		
		Sivi liv Gray cast	Čelični liv Steel cast	Nodularni liv Nodular cast	Temper liv Temper cast	Čelični liv Steel cast	Čelični liv Steel cast	Nodularni liv Nodular cast	Temper liv Temper cast		Laki metali Light metals	Laki metali Light metals	Cink Zinc	Veštačka masa Artificial mass	
Veći delovi	Bigger parts														
Komplikovani oblici	Complex shapes														
Niže cene alata ili modela	Lower prices of tools or models														
Niže cene delova	Lower prices of parts														
Manje težine	Smaller weights														
Bolja temperaturna postojanost	Better temperature stability														
Kvalitetniji materijali	More qualitative materials														
Veće mogućnosti legiranja	Better alloying possibilities														
Bolje iskorišćenje materijala	Better use of material														
Bolje površine	Better surfaces														
Finija izrada	Finer manufacture														
Veće tačnosti	Higher accuracies														
Homogenija struktura	More homogeneous structure														
				SINTEROVANI DELOVI / SINTERED PARTS											
				Sinterovani delovi u odnosu na livene delove Sintered parts in relation to cast parts											

Слика 9. Поређење синтерованих делова у односу на ливене [5]

Prednost delova oblikovanih bez skidanja strugotine Advantage of parts shaped without chips removal		Prednost sinterovanih delova Advantage of sintered parts		DELOVI OBLIKOVANI BEZ SKIDANJA STRUGOTINE PARTS SHAPED WITHOUT CHIPS REMOVAL																	
				Kovani delovi Forged parts			Precizno pakovani delovi Precisely packed parts			Presovanje trakašnih profila Pressing of strip profiles			Hladno presovani delovi Cold pressed parts			Stancovani, savijeni i vučeni delovi Stamped, bent and drawn parts			Precizno stancovani delovi Precisely stamped parts		
				Čelik Steel	Čeljeni metali Non-ferrous metals	Laki metali Light metals	Čelik Steel	Laki metali Light metals	Čelik Steel	Čeljeni metali Non-ferrous metals	Laki metali Light metals	Čelik Steel	Laki metali Light metals	Čelik Steel	Čeljeni metali Non-ferrous metals	Laki metali Light metals	Čelik Steel	Čeljeni metali Non-ferrous metals	Laki metali Light metals		
																					
Veći delovi Bigger parts																					
Niže cene delova Lower prices of parts																					
Niže cene alata Lower prices of tools																					
Kvalitetniji materijal More qualitative materials																					
Tanji zidovi Thinner walls																					
Male težine Small weights																					
Bolje površine Better surfaces																					
Deblji zidovi Thicker walls																					
Finalna izrada Final manufacture																					
Veća tačnost komplikovanih oblika Higher precision of complex forms																					
		SINTEROVANI DELOVI SINTERED PARTS																			
		Upoređenje sinterovanih sa delovima oblikovanim bez skidanja strugotine Comparison of sintered parts and those shaped without removal of chips																			

Слика 10. Поређење синтерованих делова са деловима обликованим без скидања струготине [5]

Prednost delova dobijenih skidanjem strugotine Advantage of parts obtained by chips removal		Prednost sinterovanih delova Advantage of sintered parts		OBlikovane delova dobijanjem strugotine FORMING OF PARTS BY CHIPS REMOVAL								
				Struganjem By turning		Bušenjem By drilling		Glodanjem By milling		Izrada navoja Thread manufacture	Probijanjem By punching	Provlačenjem By broaching
				Pojedinačno Single	Na automatima On lathes			Pojedinačno Single	U paketu In packet			
Veći delovi		Bigger parts								Ne presuje se Not pressed		
Kvalitetniji materijali		More qualitative materials										
Precizne konture		Precision contours										
Niže cene delova		Lower prices of parts										
Velika tačnost		High accuracy										
Bolje površine		Better surfaces										
Niže investicije za mašine i alate		Lower investments for machines and tools										
Duži vek alata		Longer life-time of tool										
Bolje iskorišćenje materijala		Better use of material										
Manji troškovi škarta		Smaller costs of wastes										
				SINTEROVANI DELOVI SINTERED PARTS								
				Upoređenje sinterovanih sa delovima dobijenim skidanjem strugotine Comparaslon of sintered parts and those obtained by chips removal								

Слика 11. Поређење синтерованих делова са деловима добијеним скидањем струготине [5]

На сликама се могу видети предности синтерованих делова у односу на ливење и делове добијене са или без скидања струготине. Предности се огледају у квалитетнијем материјалу, великој тачности, нижој инвестицији за машине и алате, боље искоришћен материјал, мањи трошкови шкарта, прецизне контуре, а пре свега предност синтерованих делова је у цени.

Поступци фине обраде, након синтеровања, као: брушење, леповање или хоновање нису погодни за поређење пошто се сви, могу применити и за синтероване делове у циљу повећања тачности или побољшања квалитета површине. Предност делова израђених синтер поступком лежи на првом месту у тачности. Овим је омогућено у већини случајева добијање готових делова спремних за уградњу. Предности технологије синтеровања су у следећем:

- економична производња, уколико је серија већа од 10 000 комада,
- коначан облик који само у изузетним случајевима захтева још и накнадну механичку обраду – скидањем струготине,
- велика тачност димензија,
- висок квалитет површина,
- могућност израде компликованих облика, као озубљење, отвора различитих облика итд. са веома уским толеранцијама,
- константност у облику и одржавању димензија у току читаве серије,
- добре клизне особине и висока отпорност на хабање,
- самоподмазујуће дејство науљених порозних делова, и
- могућност цементације и побољшања као и третирање прегрејаном воденом паром синтерованих делова.

2.2 Сировине

За израду делова технологијом синтеровања употребљавају се метални прашови различитог састава и различите величине честица. Најчешће се употребљавају прашови: жељеза, бакра, никла, графита, бронзе, калаја и месинга. Облик зрна и величина честице праха могу се дотеривати према потреби. Величина честица креће се од 10-100μm. Прах који се употребљава по геометријском изгледу може бити: дендритан, спужваст, љуспаст, кугличаст и чиодаст. На следећој слици 12, приказана је шема производње синтерованих делова.

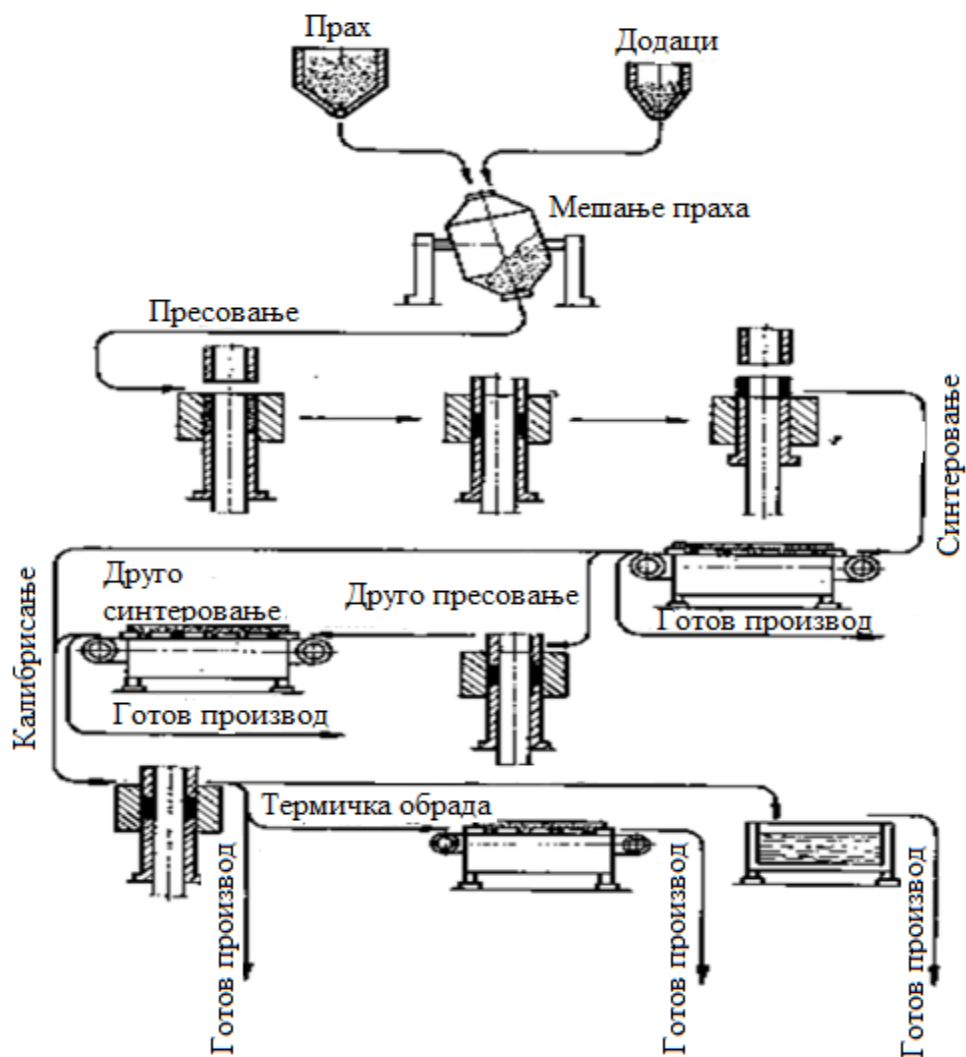
Метални прашови се могу добити различитим поступцима и то:

- **електролитичким путем** – најчистији прах, редукцијом руде
 - прах са техничким нечистоћама,
 - аутоматизацијом истопљеног метала, и
- **механичким поступцима** – дробљењем и млевењем.

Сви метални прашови који се употребљавају у синтер металургији могу се добити по сваком од наведених поступака.

При избору поступака за одређени метал одлучујући су следећи фактори:

- економски,
- захтевана чистоћа и
- могућност добијања жељених, физичких, магнетних или електричних карактеристика.
-



Слика 12. Шематски приказ производње синтерованих делова [5]

2.3 Припремање и мешање праха

Припремање праха врши се у зависности од врсте употребе и захтева који се постављају готовом синтерованом делу. Због тога се прахови различито састављају и мешају. На основу утврђеног хемијског састава и тежинског учешћа компонената врши се хомогенизација смеше праха одређено време и у одговарајућим мешачима.

Код припремања мешавине праха, чију основу чини жељезни прах као легирајући елементи у облику праха додају се: бакар, никал, графит, хром и други, а код мешавине чију основу чини бронза, као легирајући елементи додају се: калај, жељезо, олово, цинк, графит и молибдендисулфид.

Поред легирајућих елемената мешавини се додаје још и средство које служи за подмазивање – смањење трења, које се јавља између честица праха и тарућих радних делова алата у току пресовања.

После завршеног мешања праха контролише се: умешаност компонената, брзина истицања и слободна насипна запремина праха која битно утиче на рад у току пресовања.

2.4 Пресовање

Прах припремљен за пресовање обликује се у посебним алатима на механичким и хидрауличним пресима. Захтеви који се постављају таквим алатима за пресовање су посебно велики јер се употребљавају притисци за пресовање од 200 – 1000 МПа.

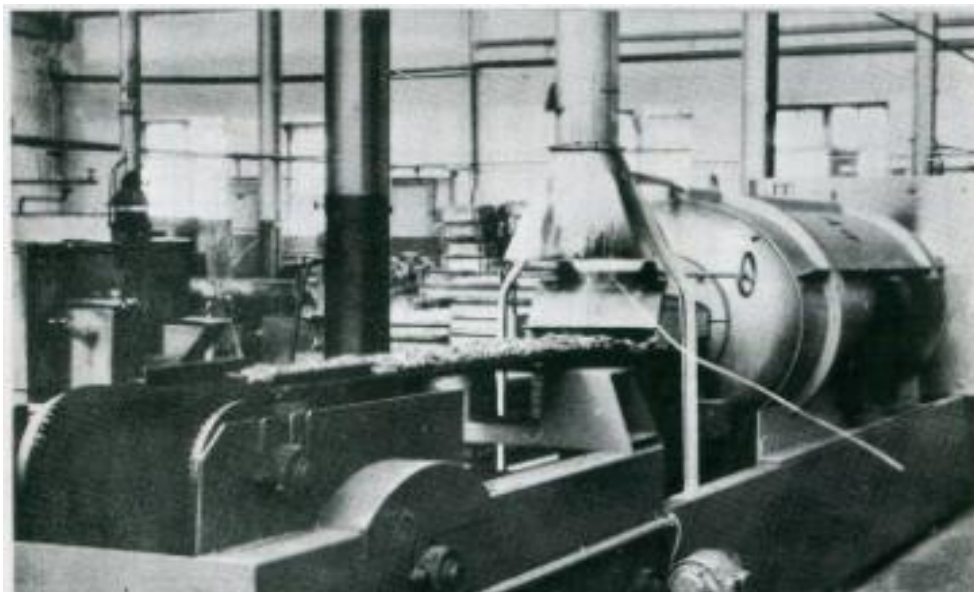
Само алати који функционално задовољавају, могу бити употребљиви за пресовање делова. Матрице, трнови и тискачи морају бити од каљеног челика или тврдог метала.

Густина која се постиже приликом пресовања зависи од компресибилности употребљеног праха и притиска пресовања. Не постоји никакав линеарни однос између притиска пресовања и густине јер, за време пресовања, које се обавља у хладном стању, настаје јако преобликовање честица праха које знатно отежава даље пресовање.

Отпресак се задржава само ахезионим силама и поседује утолико већу чврстоћу уколико је густина већа. Отпресак од гвозденог праха, који је пресован са притиском од 400 – 600 МПа и који има, у зависности од врсте праха који је употребљен, густина између 6.2 и 6.8 g/cm³ лако се ломи, тј. савојна чврстоћа му је релативно ниска пре синтеровања.

2.5 Синтеровање

Очвршћавање отпреска и настајање његовог коначног облика обавља се термичким поступком који је познат као „*СИНТЕРОВАЊЕ*“. За синтеровање делова употребљавају се специјалне пећи, које раде са заштитном атмосфером водоника или ендогаса који имају улогу да изврше редукцију и спрече оксидацију отпресованих делова, *слика 13*.



Слика 13. Пећ за синтеровање [5]

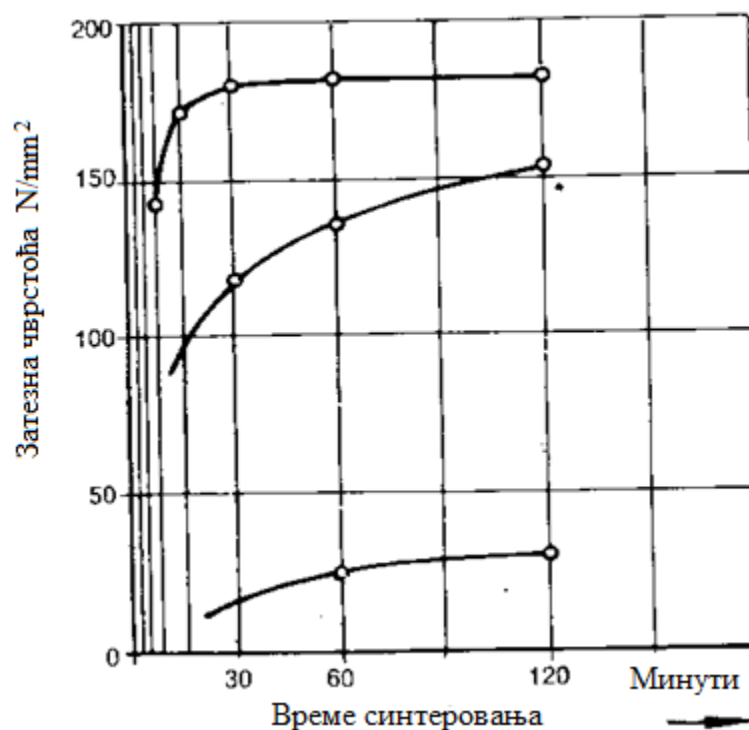
Синтеровање се обавља тачно одређено време и при одређеној температури која је нешто испод тачке основног топљења основног материјала – праха из кога се метални отпресак састоји. Ако се употребљава мешавина праха, тј. ако је у питању материјал са више компонената, чије су тачке топљења веома различите, синтерују се на температури при којој је један од компонената већ отопљен. Тада се синтеровање врши у присуству једне тачне фазе.

Процесом синтеровања структура дела се добија путем међусобне атомске измене места. На површини честице сировине, која је у облику праха, налази се велики број атома који су лабилније везани на површини него у унутрашњости честице, па због тога атоми дела имају велику покретљивост.

Ако се више честица доведе довољно близу једна другој, на пр. да се прах густо наспе или пресује и истовремено загрева, повећава се покретљивост атома и тако наступи стање у којем се врши атомска измена места и образује нова атомска мрежа. То се дешава на додирним местима честица и тиме се омогућава стварање контактних места, на којима се честице праха чврсто међусобно вежу. С тим је синтеровање започето. Оно се наставља даљом изменом атома у унутрашњости честица.

Брзина дифузије је иста за сваки прах од истог метала. То значи да има константну вредност и она не зависи од производног начина за тај прах.

Дијаграм бр.1 показује којом брзином при умерено ниској температури почиње процес синтеровања. Из дијаграма се виде вредности за три различита праха тј. зависност између времена синтеровања и затезне чврстоће. Најчистији прах постиже после синтеровања од само 30 минута чврстоћу од 180 N/mm^2 , док најслабији прах после 120 минута синтеровања постиже чврстоћу од 30 N/mm^2 . Мање промена мере од којих долази код делова за време синтеровања дотерују се калибрсањем.



Дијаграм 1. Процес брзине синтеровања [5]

2.6 Калибрисање

Код синтеровања делова наступа низ појава од којих су најважније: одстрањивање напона од пресовања и уклањање деформација насталих хладним преобликовањем честица праха, нова кристализација делића праха и образовање легура између компонената из којих се састоји мешавина праха.

У зависности од употребљене врсте праха, коришћене мешавине праха и од употребљеног притиска пресовања, може код отпресака доћи како до скупљања тако и до ширења, које се креће у границама $\pm 2\%$ у односу на димензије отпреска. Димензионалне промене могу се смањити: избором погодног праха и одговарајућих радних услова. Делови који морају задовољити веома велике захтеве у погледу димензионалне тачности

не могу се у већем броју случајева употребити у стању синтеровања, већ се морају дотерати накнадним калибрисањем на сасвим тачну меру.

Овај радни поступак најчешће се обавља посебним алатом након чијег третмана се испоручују делови са веома тачном мером.

3. *PIM* ТЕХНОЛОГИЈА

Делови од пластичних маса су се годинама производили бризгањем, због тога се сложеност компоненти стално повећава. Поред пластике, годинама се усавршавало бризгање металног и керамичког праха. Са *PIM* технологијом (*Power Injection Moulding*) сложене компоненте од метала и керамике могу бити јефтиније, него коришћењем других производних могућности.

Ова атрактивна технологија настала је комбинацијом класичног бризгања и металургије праха. Подразумева бризгање праха композита са растопљеним везивом. Током последње деценије *PIM* технологија је постала веома поуздана технологија за серијску израду металних и керамичких компоненти сложених форми.

Одлике технологије *PIM* :

- могућност производње комплексних делова који се не могу добити класичним поступком,
- бризгање различитих материјала,
- густина делова од 96 до 100 % и
- толеранције димензија лако оствариве .

PIM технологија обухвата :

- *MIM* технологију (*Metal Injection Moulding* - бризгање металних прахова са растопљеним везивом) и
- *CIM* технологију (*Ceramic Injection Moulding* – бризгање керамичких прахова са растопљеним везивом).

Бризгање праха (*PIM*) је технологија за производњу сложених, прецизних, *net-shape* компоненти из металног или керамичког праха. Потенцијал методе лежи у њеној способности да комбинује дизајн и флексибилност пластичног убризгавања и готово неограничен избор материјала који нуди металургија праха, што омогућава комбиновање више делова у један. Осим тога, *PIM* превазилази мере и ограничења продуктивности, прецизно ливења, недостатке и толеранције ограничења ливења, механичке чврстоће ливених делова и ограничења облика традиционалних делова.

Ливење праха под притиском је јефтин процес производње којим се могу производи веома сложени делови по *net-shape* од разних материјала и јединствених легура, укључујући суперлегуре нерђајућег челика и карбида. *PIM* нуди значајне уштеде, повећану флексибилност дизајна и материјала, повећану могућност минијатуризације, висока механичка својства, добру завршну обраду и високу продукцију израде делова.

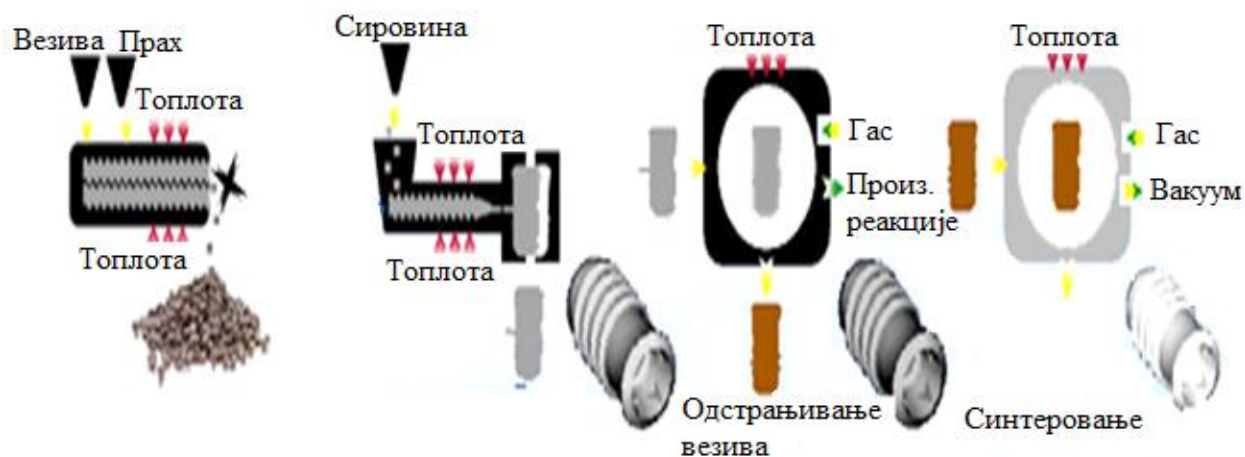
Институт индустријских материјала - Национални истраживачки савет Канаде (*NRC - IMI*) је водећи у истраживању примене технологије прашкастих материјала.

Ливење пршкастих материјала је продуктивно и нашироко се користи у технологији обликовања производа од пластичних маса. База знања за ову технологију је високо развијена и најновије иновације су око нових формулација полимера. Убризгавање пршкастих материјала је настало од овог развоја. *PIM* је млада али установљена технологија, са годишњом светском продајом више од 1,200 \$ и одрживе стопе раста између 10 и 25%. Коначно, иновативан приступ да се интегрише *PIM* у свим корацима у развоју производа животног циклуса се разматра. Визија је да смањи процес *PIM*-а до потребног обима производње уз минимално штетан утицај на трошкове производње.

Због потражње материјала високих перформанси и смањења комплексности компоненти у различитим областима, *PIM* тржиште је премашило једну милијарду у 2007. години, постајући око шест пута веће од пре 15 година. Не очекује се да ова импресивна стопа раста успори у наредних неколико година, као што је најављено у недавном извештају из Global Industry Analysts где се наводи да ће тржиште *PIM*-а достићи 3,7 милијарди долара до 2017 године (*Global Industry Analysts [GIA]*). [2]

3.1.1 Процес ливења праха под притиском

Основа процеса је коришћење полу-чврсте смеше, направљене од финог праха и топла полимерна везивна средства, да попуни калупну шупљину убризгавањем под притиском. Полимери су затим екстраховани и порозна структура лабаво пакованог праха се синтерује у чврсто да добије снагу која карактерише густ материјал. Типичано спровођење *PIM* процеса је описано испод. Као што је приказано на слици 14, постоје четири основне кораке у процесу *PIM*.



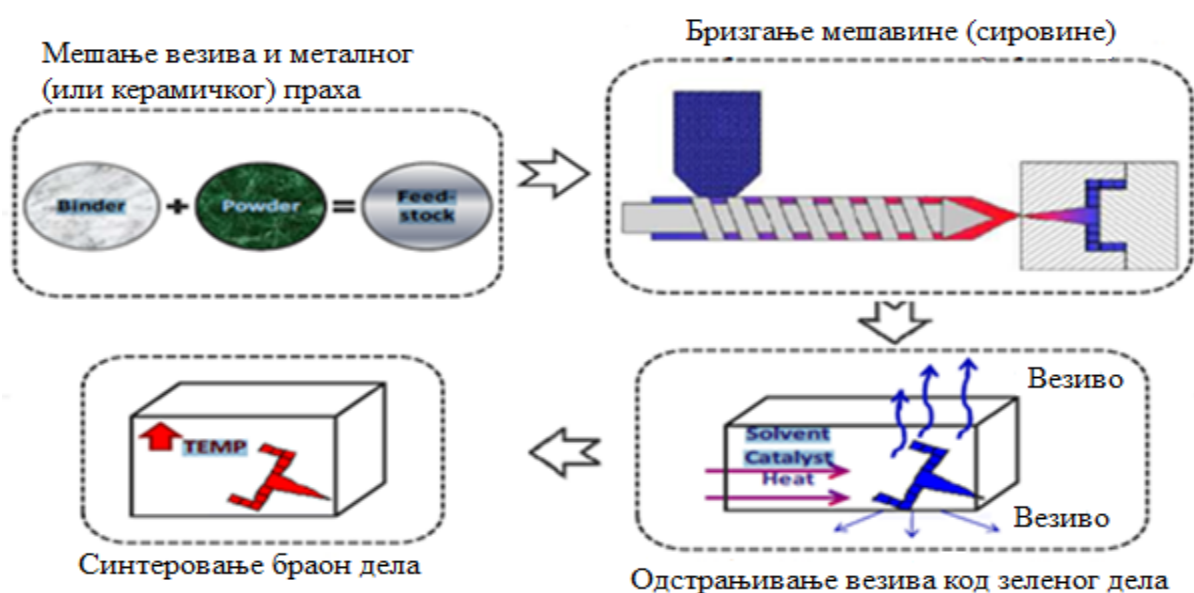
Слика 14. Типичан ланац *PIM* процеса [6]

Процес *PIM* представља безброј варијација које се користе у индустрији данас. Састоји се од четири корака :

- припрема сировина,
- ливење под притиском,
- одстрањивање везива и
- синтеровање.

На слици 15, илустроване су главне фазе *PIM* методе:

- мешање праха и везива,
- бризгање сировине
- одстрањивање везива
- синтеровање



Слика 15. Главне фазе *PIM* методе [2]

Почетни материјал за *PIM*, назван сировина, је хомогена смеша металног или керамичког праха и органског вишеделног везива. Везиво и прах су комбиновани разним мешањем опреме, као што су екструдери и мешалице. Смеша се затим палетизира у одговарајућем облику за пуњење машине за ливење. Везиво је једноставно носач праха и када је ливење обављено, везиво се уклања у накнадним корацима. Процес убризгавања је углавном идентичан конвенционалном убризгавању пластике. Ипак, неке промене на хардверу машина су потребне са циљем обраде специфичних сировина на основу њихове стишљивости и вискозности. Контрола процеса ливења је од виталног значаја за одржавање уске толеранције у наредним корацима. Већина предности у дизајну *PIM* технологија се виде током ливења ослањајући се на флексибилност укључивања сложености у алату. Ливени део се зове "зелена део" и предимензионисан је да омогући скупљање током синтеровања.

Пре синтеровања је потребно уклонити везиво са изливеног дела. Уклањање везива је најскупља и дуготрајна фаза у *PIM* технологији. Процес уклањања би требало да буде заснован на прогресивном отварању површинских канала како би се олакшало уклањање испаравања унутар језгра. Три главне методе могу бити примењене у зависности од састава везива: топлотна метода, метода растварача и каталитичка метода.

У топлотној методи, везиво се уклања деградацијом или екстракцијом течности, на температурама у опсегу од 60 до 600° С. Релативно дуго време обраде топлотном методом, је значајно редуковано помоћу органских растварача или у неким случајевима чак водом која треба да раствори раствориве компоненте везива.

Каталитичка метода, за узврат, фокусира каталитичку деградацију, као што је случај излагања ацетал-полиолефин сировина киселим испаравањем, што доводи до много бржег уклањања везива у односу на термичку или методу растварача. У свим поступцима уклањања везива, скелет ливења често остаје да преноси снагу и облик који се задржава до почетка синтеровања. Овај преостали скелет термички је уклоњен између 200° С и 600° С у корацима пре синтеровања.

Синтеровање је последња фаза процеса, обезбеђујући везивање међу-честица. У зависности од материјала, одливени делови или "браон делови" су синтеровани на температурама које се крећу од 1200 до 1600° С. То у суштини уклањање пора, је праћено растом и јаким пријањањем међу суседним честицама, узрокујући ретракцију производа чије се димензије обично смање између 14 и 20%. Стога, зелени делови су предимензионисани да надокнаде скупљања синтеровањем. Прецизна величина честица коришћена у *PIM* процесу резултира великој густини синтеровања - у распону од 95% до 99,5% од теоријског, чиме пружа врхунска механичка и корозиона својства у односу на штампу и синтер технологију.

3.1.2 Процес имплементације

Први корак у процесу мешања је критичан, јер сви детаљи морају се разматрати у циљу добијања хомогене и предвидиве сировине са пожељним реолошким понашањем. Фини метални, керамички или карбидни прашкови, мањи од 25 μm , су вруће помешани заједно са топленим полимерним везивним средствима користећи континуиран или серијски миксер, затим се охлади и гранулише да формира хранљиви материјал за ливење под притиском машине. Сферични прах је најбољи јер помаже у повећању максималног солидног пуњења сировине и, према томе, нуди бољу контролу завршних димензија. Уобичајено чврсто пуњење је између 60 и 65 %. Типични полимери су полиетилен, полиетилен гликол, полиметил метакрилат, полипропилен и типичан восак је парафин.

Сировина се конвертује у дефинисан облик користећи машину за обликовање, слична таква користи се за пластично убризгавање. Сирове грануле се топе у загрејаном бурету са интерним вијком за компримовање, дозирање и убризгавање праха суспензије у затвореној шупљини. Притисак убризгавања креће се од 1.5 до 60 МПа. Пуњење калупа одвија се за мање од секунде, а притисак се даље одржава током финалног хлађења да спречи празнине или пукотине настале због контраакције. Укупно време циклуса је између 10 и 30 секунди и нормално се постиже. Калуп је дизајниран да надокнади финално скупљање

које се дешава током синтеровања. Типично скупљање је између 12 и 18% у зависности од чврстоће пуњења сировине и нивоа згушњавања постигнутог током синтеровања.

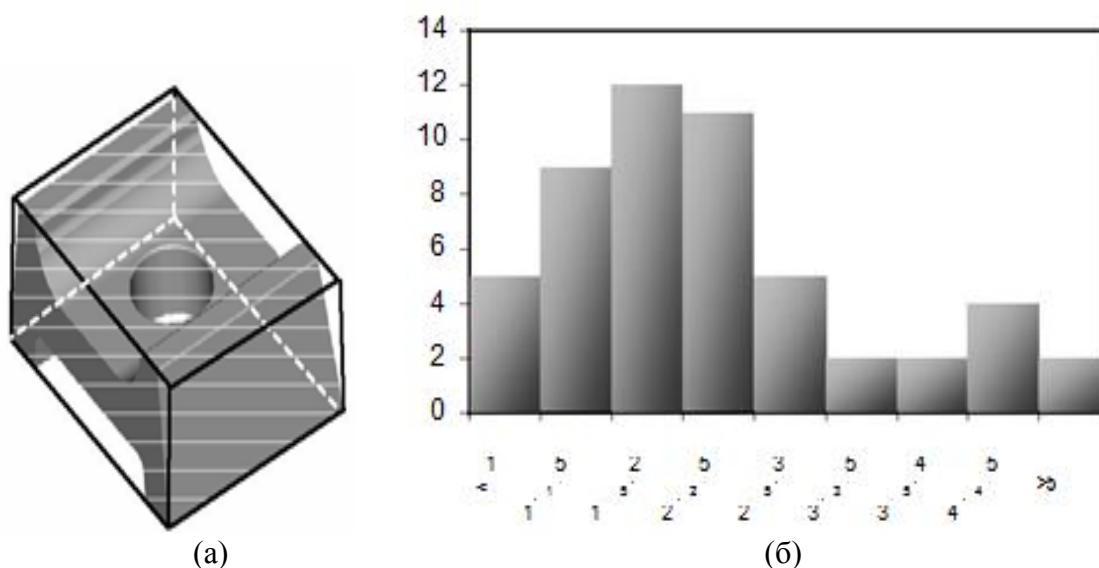
Мулти-компонентни везивни систем се затим елиминише у току одстрањивања везива. Главни циљ овог корака је да се уклони везиво без дисторзионог дела. Термално одстрањивање везива је најчешћа техника у којој су делови загревани у пећи под контролисаном атмосфером. Прва компонента везива је елиминисана на нижој температури, док друга компонента, „кичма полимера“, одржава честице праха на месту. Порозна мрежа формирана током прве фазе одстрањивања везива, помаже у евакуацији остатака деградације из кичменог полимера и смањује унутрашњи притисак који би могао да деформише део. Алтернативни путеви одстрањивања везива су такође доступни где растварач може да се користи за уклањање прве компоненте, док је „кичма полимера“ термички уклоњена. Органски растварачи се користе за растварање полимера али вода се такође може користити за полимер растворљив у води као што је полиетилен гликол. Последња фаза топлотног одстрањивања везива је уклањање „кичме“ заједно са синтеровањем у циљу избегавања оштећења.

Последњи корак је да се синтеровањем очврсне део, уклањањем празнине за собом настале екстракцијом везива. Синтеровање се јавља на нижој температури али близу температуре топљења метала, керамике или карбидног праха материјала. Механизам дифузије помаже попуњавању пора што доводи до скупљања дела. Коначна густина је нормално виша од 97% и може да достигне и до 99,5%. Механичка, физичка и хемијска својства су упоредива са кованим материјалима.

3.1.3 Компонента дизајн аспекта

Разумевање способности процеса *PIM*-а је рана фаза пројектовања компоненте, што значи побољшање квалитета, повећање функционалности и смањење трошкова. Сложене *net-shape* компоненте из метала, керамике, зацементираног карбида може да се производи *PIM*. Процес нуди могућност повећања обима производње да амортизује трошкове алата. Критеријуми при избору дела се заснивају на четири главна разлога: годишњег обима, сложености дела, димензија делова и материјала.

Неколико дизајн водича су доступни и дају одличне савете о дизајну разматрања. Немац је увео концепт ефективне густине да илуструје успех *PIM* – а, над обрадом. Ефективна густина је маса компоненте подељена од спољашње запремине омотача, од које би машина почела. Концепт је илустрован на слици 16а. Проучио је више од 50 случајева приче о *PIM*-у, компонентама челика и нерђајућег челика. Као што је приказано на слици 16б, прикупљени подаци показују да је највише израда делова *PIM* технологијом, примењена на облике ниске ефективне густине у распону од 25% специфичне густине, што значи да је *PIM* избегао 75% губитка масе при обради.



Слика 16. (а) Ефективни концепт густине и (б) дистрибуција 50 *PIM* челичних компоненти ефективне густине [5]

Концепт ефикасне густина је свакако одличан критеријум за одабир дела на основу своје релативне сложености. Дизајн карактеристике које се могу остварити по *PIM*-у су сличне онима које се постижу стандардним пластичним убризгавањем или ливењем. Међутим, неке специфичне карактеристике су пожељне да искористе *PIM* или да избегну своја ограничења. Једна од кључних карактеристика је употреба једнаке дебљине зида, како би се избегао хладан ваздух, празнине, унутрашњи потреси и уобичајне проблеме током одстрањивања везива и синтеровања. Уклањањем материјала на местима где није потребно, коришћењем ребра и трака папира да ојачају одређено подручје, може се добити уједначена дебљина. Поред тога, употреба језгара и рупа смањује коришћење материјала и побољшава ефикасност одстрањивања везива. Једна од главних предности *PIM*-а је способност интеграције не-кружне рупе на многим различитим правцима у делу дизајна. Поред тога, спољашњи и унутрашњи навој, површински детаљи (млевења површине, писма и логотипи) могу се обликовати помоћу *PIM* процеса. Упркос повећаној комплексности увео је нека специфична дизајн ограничења, добијене су прихватљиве толеранције на одређеним функцијама. У табела 2. сажете су минималне и типичне толеранције могуће са *PIM* процесом без секундарне операције.

Табела 2: Тренутна димензионална толеранција границе *PIM* процеса

ОДЛИКЕ	НАЈБОЉЕ МОГУЋЕ	ТИПИЧНО
Угао	0.1°	2°
Густина	0,2%	1%
Тежина	0,1%	0,4%
Димензија	0,05%	0,3%
Апсолутна димензија	0,04 mm	1 mm
Пречник рупа	0,04%	0,1%
Локација рупа	0,1%	0,3%
Равност	0,1%	0,2%
Паралелност	0,2%	0,3%
Облине	0,3%	0,3%
Просечна храпавост	0,4 μ m	10 μ m

Границе толеранције *PIM* се стално унапређују. Недавна студија из Немачке и САД-а је предложила тренд у побољшању толеранције. Њихова прогноза за 2005. је да 50% индустрије има димензију толеранција ± 0.17 mm, док су типичне тврдње ± 0.075 mm и најбољи учинак је ± 0.010 mm. Њихова прогноза за 2010. је да ће 5% од индустрије бити у стању да има димензију толеранције $\pm 0,03$ mm, али само најновији произвођачи *PIM*-а користећи најбоље праксе, имаће ову могућност.

3.1.4 Студије случаја

Слика 17 приказује сегментације тржишта *PIM* индустрије и релативног раста различитих сегмената. Највећи део тржишта везан за *PIM* је производња ливења језгара. Ово су керамичке компоненте (глинице, силицијум или циркони) са сложеним геометријама које су уметнуте у шупљине за унутрашње функције. Овај сегмент и даље показује умерен раст због ширења земљишта турбине, производне опреме и млазних мотора.



Слика 17. Релативна подела и релативни раст продаје од тржишних сегмената [5]

За ваздухопловни сектор, *PIM* је решење да подржи „купи-да-летиш“ филозофију. Међутим, строге спецификације производа ограничавају продирање *PIM*-а на овом тржишту. Али, још увек постоје многе „*R & D*“ активности око никла и кобалта, базиране на бази суперлегура и легура титана које производи *PIM*.

Турбине садрже хиљаде малих, замршених, обликованих делова који захтевају велику обраду и завршне операције када се праве од кованог материјала. Економичне предности *net-share* производних метода, као што је *PIM* су приказани за компликоване компоненте турбина мотора. Односно добијено је 30% и 80% смањења у производњи трошкова преко коване методе легура. *PIM* су такође истраживали за производњу једног лептир вентила чија је тежина око 1000 грама. Велики проток тела *IN718* је успешно обликован и синтерован. Затезна и замор својства су приказана прелазима прецизног ливења *IN718*.

Електроника/паковање, телеком и инструменти су сегменти у којима *PIM* показује највећи продор на тржиште. Бројни примери *PIM* делова могу се наћи у роби широке потрошње (мобилних телефона, шарке, вибратор за масаже, конектор органа). Значајни „*R & D*“ напори су стављени у обраду на ниским температурама ширења материјала (Fe/Ni, Fe54Ni31Co15, W-Cu и Mo-Cu) за микроелектронских пакованња преко *PIM*-а. Повећана потражња за високо фреквентне-модуле за комуникацијске мреже и аутомобилске сензоре је главни покретач тог развоја. Остале апликације су термички уређаји за управљање, где су потребни механичка чврстоћа, висока топлотна проводљивост и низак коефицијент топлотног ширења подесив на гас. Ови захтеви су испуњени од стране тунгстен- или молибден - псеудолегура, *net-share* може бити произведен само *PIM*-ом, због уских димензија толеранције потребних за коначно печење електронског пакета.

PIM је, такође, веома погодан за материјале које је тешко производити/или су веома скупе сировине. То може одржати снагу на температури од 2000° C или изнад и он је имун од термичког шока.

Овако високе температуре материјала ће наћи промену за цеви и погоне чврстих флуида у системима пропелера. Производња ових компоненти је, међутим, и скупа и тешка јер ренијум не може радити на собној температури. *PIM* превазилази ове тешкоће и омогућује производњу уз мање трошкове малих и сложених облика. Уштеда трошкова у вези са развојем производног процеса ренијум, *PIM* је између 25% до 80%. Поред тога, процес *PIM* значајно смањује водеће време када се пореди са старим путем обраде.

PIM нуди повећану слободу производње за формулисање нових материјала помоћу елементарне прах мешавине или посебне адитиве за претходно легираног праха у циљу добијања нових легура формулације, композитних материјала, и материјале које је тешко обликовати са другим производним технологијама. Неки од најновијих дешавања циљају да ови специфични изазови покажу флексибилност *PIM*-а над другим производним линијама.



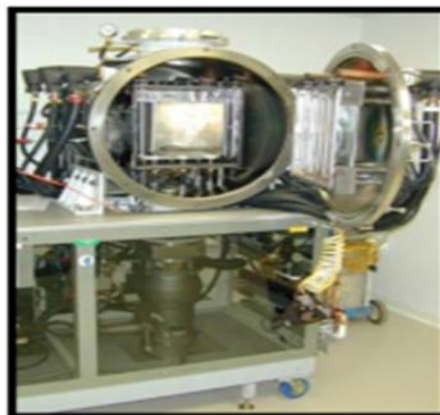
Слика 18. Машина за припрему сировина [6]



Слика 19. Преса за микро - бризгање [6]



Слика 20. Инструмент за хемијске анализе [6]



Слика 21. Пећ под вакуумом за синтеровање [6]



Слика 20. Пресе за ливење под притиском [6]

Бризгање праха (*PIM*) је ефикасан процес за производњу малих, сложено обликованих компоненти за високе апликације перформанси. Процес *PIM* укључује неколико корака, укључујући и припрему сировине, мешањем праха са преносивим везивом, бризгање смеше, одстрањивање везива и синтеровања.

У *PIM* процесу, неколико класа везива имају користи, али већина има дуг пут одстрањивања везива, који могу довести до високе цене производње и велику потрошњу енергије.

PIM је погодан за делове тежине од 0.1 g до 250 g. Пресеци су обично мањи од 0.25 inc. (6,35 mm). Делови нису ограничени на ове комбинације масе и попречног пресека. Толеранције су од $\pm 0.3\%$ до 0.5%.

PIM технологија је процес добијања металних одливака модификованом технологијом бризгања, уз додатне операције које дају потребан квалитет производу. Материјал за израду је мешавина металног праха (волфрам, бакар, алуминијум, итд.) и везивног средства у односу који омогућава добијање производа са жељеним физичко-механичким карактеристикама. Тим процесом се могу добити производи веома сложених облика и малих димензија, који имају примену у авиоиндустрији, војној индустрији, машинској индустрији, медицини, прехранбеној индустрији, итд.

Карактеристика инјекционог бризгања праха насупротив механичкој производњи компоненти је да додатна комплексност не значи додатни трошак.

PIM технологија, технологија бризгања, припада групи модерних технологија. Овом технологијом се добијају делови сложене геометрије, који се не могу добити класичним поступцима пресовања.

PIM технологијом се могу бризгати различити материјали, чији полаз мора бити у облику праха са величином честица не већих од 30 μm као што су:

- челици (нерђајући, легирани, брзорезни...)
- тврди метал
- керамика

- обојени метали и њихове легуре
- пластика
- тешки метали

Област примене *PIM* производа је веома широка:

- аутомобилска индустрија
- авиоиндустрија
- индустрија сатова
- електронска индустрија
- медицина
- грађевинарство

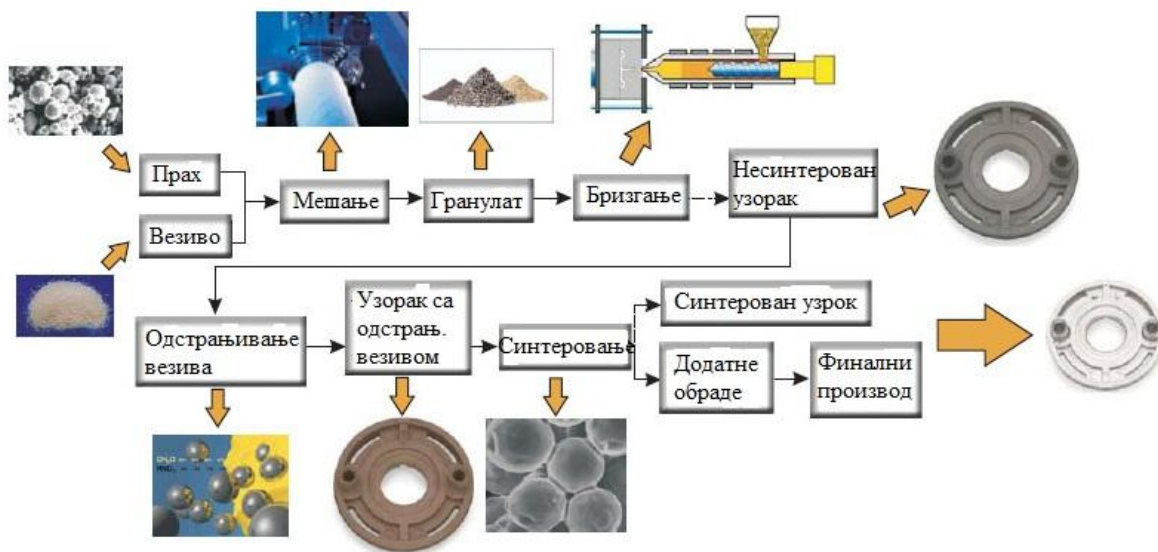
3.2 *CIM* Технологија

Инјекционо бризгање керамичких прахова (*CIM* - *Ceramic Injection Molding*) нашло је широку примену у електроници (сензори и актуатори), авио-индустрији (механички делови, сензори и актуатори), аутомобилској индустрији (механички делови), хемијској индустрији (мембране, вентили), медицини (вештачке кости) итд. Ради се о серијској производњи комплексних керамичких компоненти сложених геометрија. *CIM* технологија обезбеђује економичну серијску производњу керамичких компоненти малих димензија и сложених геометрија са толеранцијама мањим од $\pm 0.3\%$. Компоненте се одликују великом чврстоћом, механичком снагом, отпорне су на хабање, корозију и старење. Стабилних су димензија и високих радних температура. Површина добијених компоненти најчешће не захтева додатну обраду.

На слици 23 је приказан редослед операција *CIM* технологије. Процес се састоји од четири главна корака:

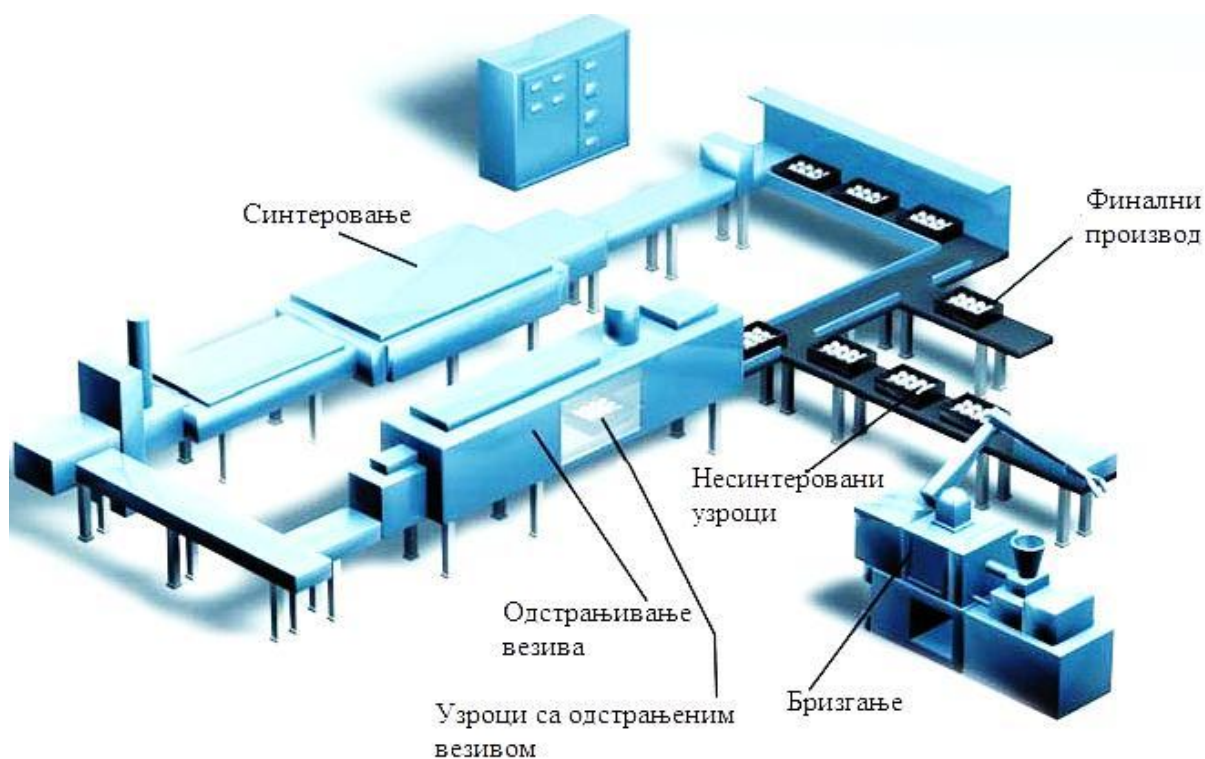
1. припрема гранулата
2. бризгање
3. одстрањивање везива и
4. синтеровање

У фази припреме гранулата полази се од финих керамичких прахова који се мешају са термопластичним везивом формирајући хомогени гранулат. Термопластично везиво одржава керамички прах у пластичном стању за време процеса бризгања. Као резултат бризгања добија се несинтеровани узорак (енгл. *green body*) који се затим подвргава процесу одстрањивања везива. Узорак са одстрањеним везивом (енгл. *brown body*) се потом синтерује. Синтеровани узорак је могуће додатно топлотно или механички површински дорадити али то најчешће није неопходно. Површина узорка се може обрадити пескарањем, полирањем или брушењем уколико је то неопходно.



Слика 23. Редослед операција СИМ технологије [4]

На слици 24 је приказан пример аутоматизоване линије за инјекционо бризгање керамичких прахова.



Слика 24. Аутоматизована линија за инјекционо бризгање керамичких прахова [7]

Комбиновањем керамичких материјала и технологије инјекционог бризгања остварују се:

- веома комплексне геометрије малих димензија, које се не могу реализовати другим производним техникама,
- велике чврстоће компоненти,
- супериорна отпорност на корозију,
- комплексне геометрије без додатне обраде,
- одлична површинска обрада,
- укупно смањење димензија и тежина компоненте,
- могућност интеграције више компоненти у један пројекат,
- смањен број компоненти и скраћено време монтаже.

СИМ тржиштем углавном доминирају производи од глинице, цирконијума и силицијума или алуминијум нитрид прашкова, типичне компоненте произведене *РИМ*, *МИМ* или *СИМ* методом, опсега од 0.002 до преко 100 g. Осим тога, у оба сегмента видљиво је померање ка мањим производима, захтевајући побољшане технологије у вези машина, процеса, и материјала, стога остављајући још отворено поље за примењена истраживања.

3.3 *МИМ* Технологија

МИМ (*Metal Injection Molding*) је у суштини технологија за производњу сложених облика, делова у великим количинама. Ако облик омогућава производњу дела, на пример, конвенционално пресовање и синтеровање, *МИМ* би у већини случајева био прескуп. Међутим, ако је потребан број сложених делова већи од одређеног износа, *МИМ* је јефтинији од обраде.

Код инјекционо бризгање металног праха (*МИМ*) трошкови компоненти, у великој мери, зависе од величине компоненти. Материјал има највећу улогу. За мале компоненте, утицај на цену, у шта спада алат, руковање и синтеровање, су природно већи.

Бризгање металног праха може се опистаи сликовитом шемом.

Опште карактеристике *МИМ* поступка:

- може да се лије ограничен број метала: нисколегирани и нерђајући челици, легуре за меке магнете, чисти никал, електроничке легуре гвожђа са 36 % никла и гвожђе никла и кобалта,
- поступак је погодан за мање комаде велике сложености облика, за производњу средње до велике количина,
- скупљи је од конвенционалног поступка ливења у калупе.



Слика 25. MIM поступак [3]

Формулисање сировине

Метални прах се меша са термопластичним полимерима и восковима (везиво) користећи топлоту да би се формирала смеша у којој се свака метална честица равномерно облаже.

Обликовање

Сировина се ставља у бризгалице где грејачи топе везиво, налик на пасту за зубе, и затим у калуп. Добијени део, када се охлади, се избацује из калупа. Вишак материјала се уклања, тако да се тај материјал може рециклирати.

Одстрањивање везива

"Зелени део" и даље садржи и оригинални метал и везивни материјал који је састављен од сировине. То је отприлике 20% већи него што ће завршени део да буде. Специфичан део везива се мора уклонити. Ово се обично врши термички али се може урадити хемијски, у зависности од материјала који се обрађује. Добијени део се зове "браон део."

Синтеровање

Браон део се пласира у пећи и загрева у границама 85% од температуре топљења метала. Преостало везиво се уклања, а металне честице се спајају, скупљају да формирају метални део. Синтероване компоненте метала могу да се даље обрађују машинским путем, полирање, итд, ако је потребно.



Слика 26. Готов производ [16]

МИМ делови могу бити израђени од широког спектра метала и легура да имају тачна својства потребна за појединачном апликацијом. Одржива алтернатива традиционалним производним процесима, бризгање металног праха нуди бројне предности:

- Бољи трошкови производње. *МИМ* је много ефикаснији него други производни процеси. Већи обим производње, већа уштеда.
- Већа слобода дизајна.
- Мале, минијатурне и микро-минијатурне величине, блиске толеранције, танки пресеци. Делови могу бити мали, толеранција може бити ± 0.005 . Могу се произвести једноставни пресеци до 0.20 mm.
- Брзина. *МИМ* је идеалан за масовну производњу.
- Висока густина. Калупни делови густине су 98% од кованог материјала.
- Конзистентност *МИМ* делова. Делови су изузетно доследни густине, тежине и својства. То значи мање варијабилности, скоро нула дефеката делове и минимално утрошеног материјала, времена и трошкова.
- Минималне средње операције већине *МИМ* делова. Делови су тачни, често елиминишу потребу за обраду, обраду спољних површина или другог допунског рада.
- Део консолидације. Један *МИМ* део може понекад заменити два или више дела.
- Брз преокрет. Без потребе за средње операције или спајање, уштеде времена су значајне.
- Прилагођене легуре. Може се мешати у својој „апликацији“ да добију већу снагу, бољу отпорност на корозију, побољшаних магнетних својстава и прилагођена термичка ширења.
- Високи приноси. Готов производ користи скоро 100% металног праха, и елиминише вишак трошкова.
- Зелени процес. Са *МИМ*, практично без отпада настаје производ и сви отпаци се рециклирају.

Убрзигавањем металног праха (*MIM*) и даље се сматра највећим сегментом овог тржишта, што чини више од 70% глобалне производње. Иако је глобално *PIM* технологија распрострањена, у Европи и азијско-пацифичком региону велики удео је у сегменту *MIM*, док у САД је и даље највеће тржиште за ливење убризгавањем керамике (*CIM*) (*GIA*, 2011).

У Европи, *MIM* производња доминира у аутомобилским апликацијама и тзв. потрошачком тржишту (која укључује сатове и наочаре), док Северној Америци производња се углавном примењује на област медицине и здравства. Са друге стране, у азијској производњи, која се сматра највећом, доминира примена у потрошачкој електроници и технологији информационих апликација. Тржиште потрошачке електронике је, заиста, један од покретача *MIM*, чији раст се у великој мери одржава у Азији, посебно у Тајвану, Малезија, Тајланд, Кина, Сингапур и Јужна Кореја. Други фактор раста је експанзија производње медицинских компоненти и у Азији, услед већег броја становништва које има приступ унапређеној здравственој заштити.

Недавно повећање продаје *MIM* методе изазвала је потребу за новом опремом, са истовременим улагањем у истраживање и развој. Типично, лидерске компаније инвестирају у просеку 10,5% продаје у комбинацији ширења капитала и истраживања.

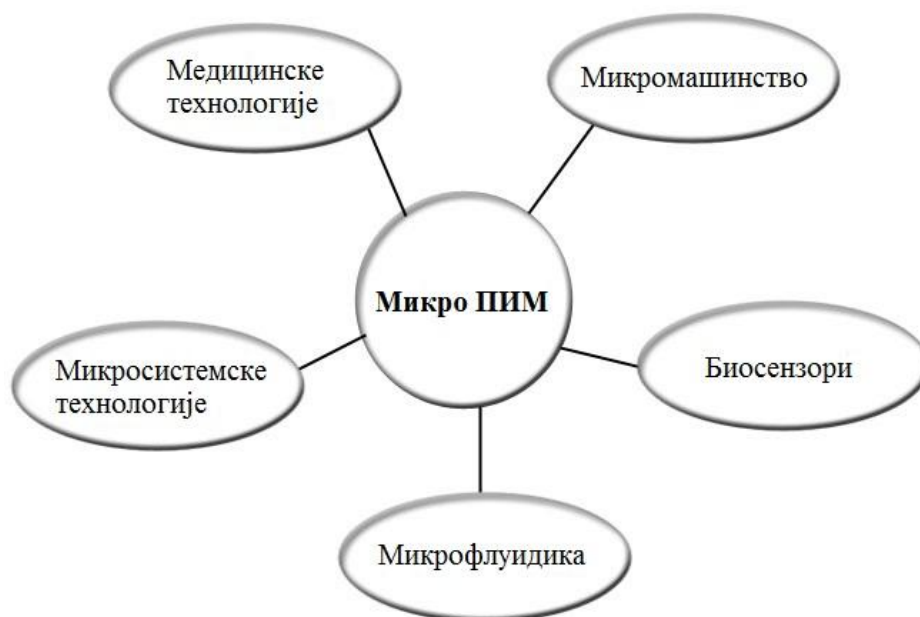
Нерђајући челик наставља да доминира *MIM* апликацијама, што чини око половину глобалне производње, одражавајући се на хватање компоненти које би иначе отишле у ливење. Ипак, други материјали као бакар, легура никла, бронзе и недавне легуре волфрама и титанијума, такође представљају важна тржишта.

3.4 *MICRO-PIM* Технологија

Имајући на уму на све веће присуство *PIM* технологије у свету, а самим тим и позитивно економско окружење, поставља се питање шта су даље могућности ове технологије и који изазови се налазе пред њом. Сваки технолошки напредак је у највећој мери резултат проширења тржишта. Једна од могућности је освајање производа који су били у домену других технологија уз услов да се оствари побољшање квалитета и толеранција компоненти уз остваривање конкурентних цена. Друга могућност би била реализација већих компоненти, тежина већа од 200 g. Међутим, то би био велики изазов за произвођаче финих керамичких прахова који би морали да понуде прихватљивије цене својих производа. Трећа могућност је увођење *PIM* технологије у потпуно нове области као што су микросистемске технологије и биосензори. На слици 27 су приказана потенцијална тржишта *Micro-PIM* технологије.

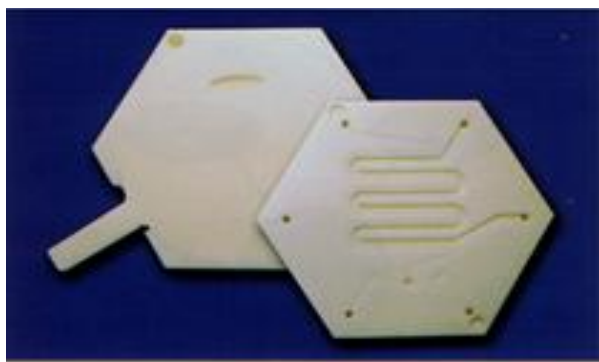
Микромеханичке компоненте реализоване *Micro-PIM* технологијом се користе као замена за пластичне компоненте захваљујући својствима керамичких и/или металних прахова који обезбеђују механичку снагу, отпорност на корозију и високотемпературске перформансе.

Микросистемске технологије представљају растући сегмент тржишта компоненти са стопом годишњег раста од преко 20%. Овим тржиштем доминирају силицијумске технологије али је мали део тржишта на располагању у *Micro-PIM* технологији.



Слика 27. Потенцијална тржишта *Micro-PIM* технологије [8]

Микрофлуидика представља још једно потенцијално тржиште за *Micro-PIM* технологију. За неке примене где се одвијају реакције у гасној фази на високим температурама или реакције високо-корозивних медија, од великог су значаја керамичке компоненте због њихове тврдоће, високе термичке и хемијске резистентности.

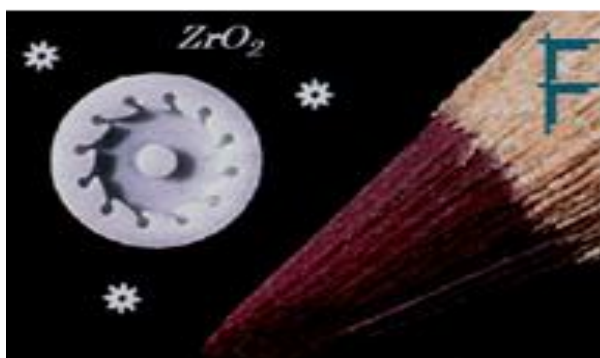


Слика 28. Примена *Micro-PIM* технологије у области микрофлуида [9]

Биомедицинска индустрија такође бележи високи раст и чини значајно потенцијално тржиште за *Micro-PIM* технологију. Постоји велико интересовање за биокompatibilне материјале као што су керамика, нерђајући челици или титанијум и поуздане производне технологије које могу обезбедити медицинске компоненте сложених облика.

На пољу биосензора микроструктурне површине *Micro-PIM* компоненти реагију са одређеним биомолекулима. Ова технологија представља најбоље решење за серијску производњу микроструктурних функционалних површина у биосензорским системима.

Данас се *Micro-PIM* технологијом могу реализовати компоненте димензија 5 μ m. Серијска производња оваких микрокомпоненти се заснива на субмикронским керамичким праховима. Пример овакве компоненте је дат на слици 29.



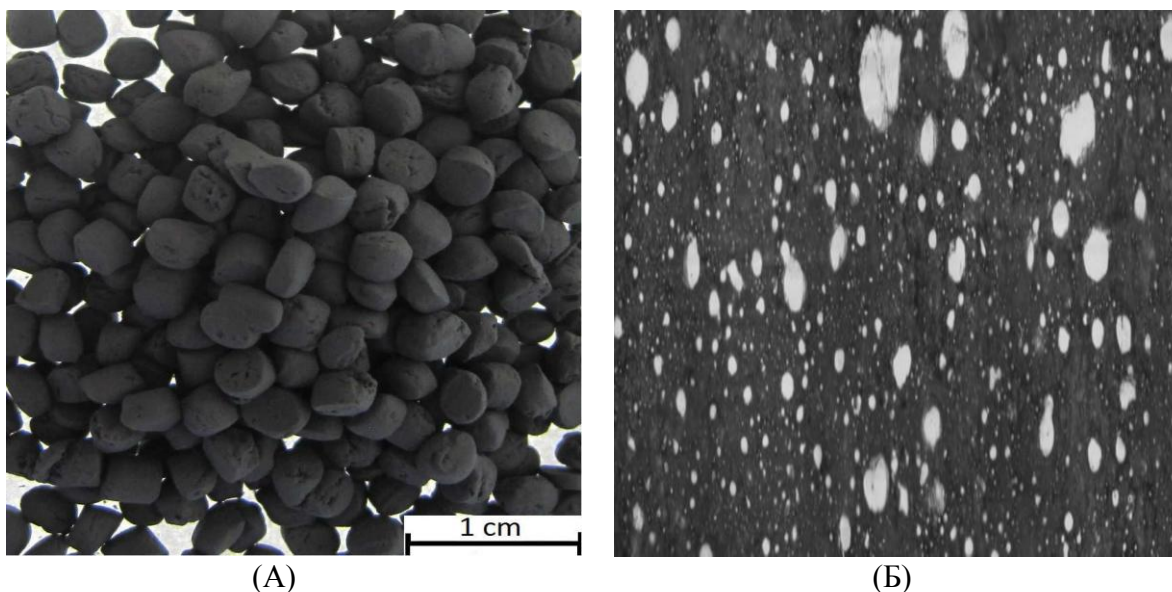
Слика 29. Керамички зупчаници [9]

Још један правац развоја *Micro-PIM* технологије је *2C-Micro-PIM*. Реч је о двокомпонентној *Micro-PIM* технологији која омогућава серијску производњу микрокомпоненти од мултифункционалних материјала.

4. ПРАХ ЗА *РІМ* И *МІМ* ТЕХНОЛОГИЈЕ

4.1 Припрема сировина

Први корак у процесу инјекционог бризгања праха је припрема сировина. Прах и везива се мешају изнад тачке топљења везива да би се омогућило равномерно облагање по површини праха, *слика 30Б*. Сировина се припрема мешањем полимерних везива са финим металним или керамичким прахом. Припремљена сировина се обично испоручује у облику брикета, *слика 30А*, тако да је лака за руковање пре и у току бризгања.



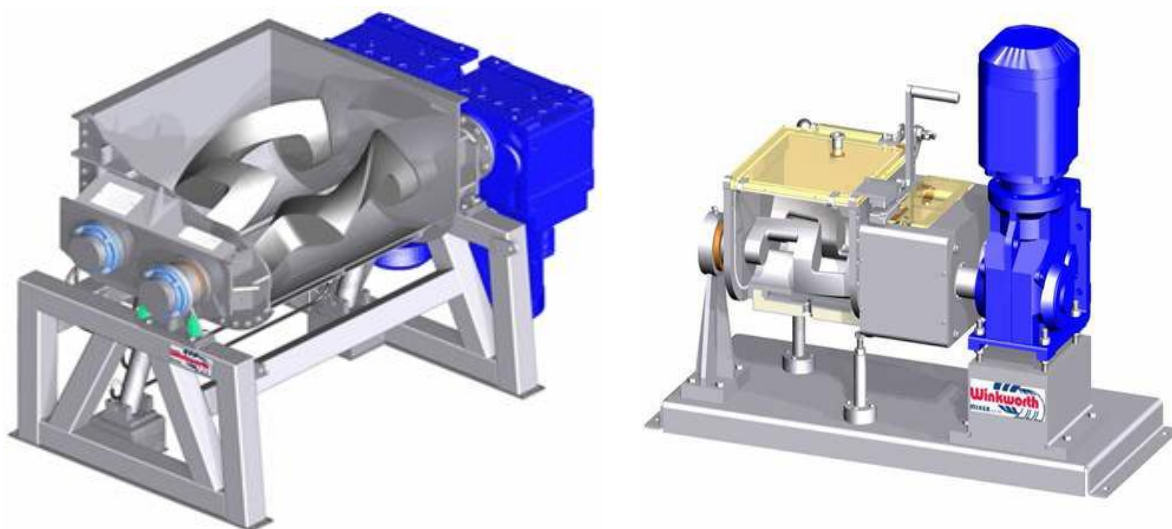
Слика . (А) Доступна сировина у облику брикета, (Б) Микрографија сировина приказује металне честице окружене полимерним везивом [2]

Садржај праха се обично креће од 50 до 65 %, мада постоје тврдње у којима се користи чак и више од 80%. Уколико се утврди да је садржај праха нижи од 50 %, способност синтеровања сировине и коначна густина дела су знатно смањене. Са другог становишта, такође, је важно задржати вискозност сировине, што је ниже могуће, како би се олакшао процес бризгања калупа, то је разлог зашто садржајем праха већим од 65 % треба руковати са бригом.

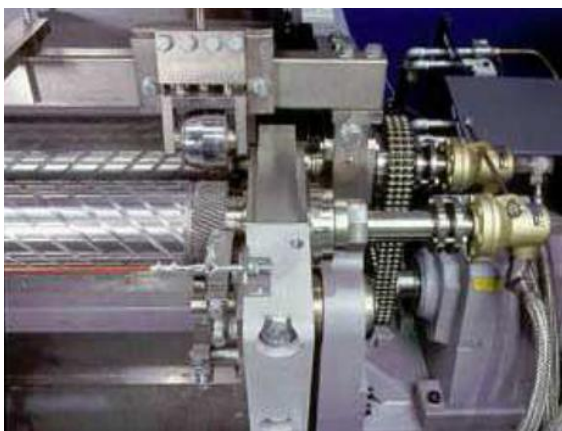
Једна од најважнијих својстава сировине је свакако њена хомогеност. Хомогена дистрибуција прашкастих честица и везива у сировини је важна, јер помаже да се минимизирају раздвајања током бризгања у калуп и касније да омогући скупљања након везивања и синтеровања. Избегавање раздвајања

код сировина је неопходна да би се спречили визуелни дефекти, претерана порозност, деформације и пукотине у синтерованом делу.

Техника која се користи за мешање везива и праха може да утиче на хомогеност сировине материјала. Сировине се могу произвести у серијском процесу или континуирано. Четири различите врсте машина се обично користе: миксери са високим смицањем, ролна млинови, шраф екструдери и ролне за сецање. Прва два су примери серијске операције, док последње две су континуирано. Који приступ да се изабере зависи од детаља, од захтева и материјала који ће се користити за припрему сировине. Када користимо финије честице које имају тенденцију да се скупљају, пожељно је серијско мешање у планетарним или z-сечива миксерима, *слика 31*, чак и ако процес може да потраје неколико сати. У високом обиму производње дупли-шраф екструдери или ролне за сецање, *слика 32*, се користе за припрему сировине.



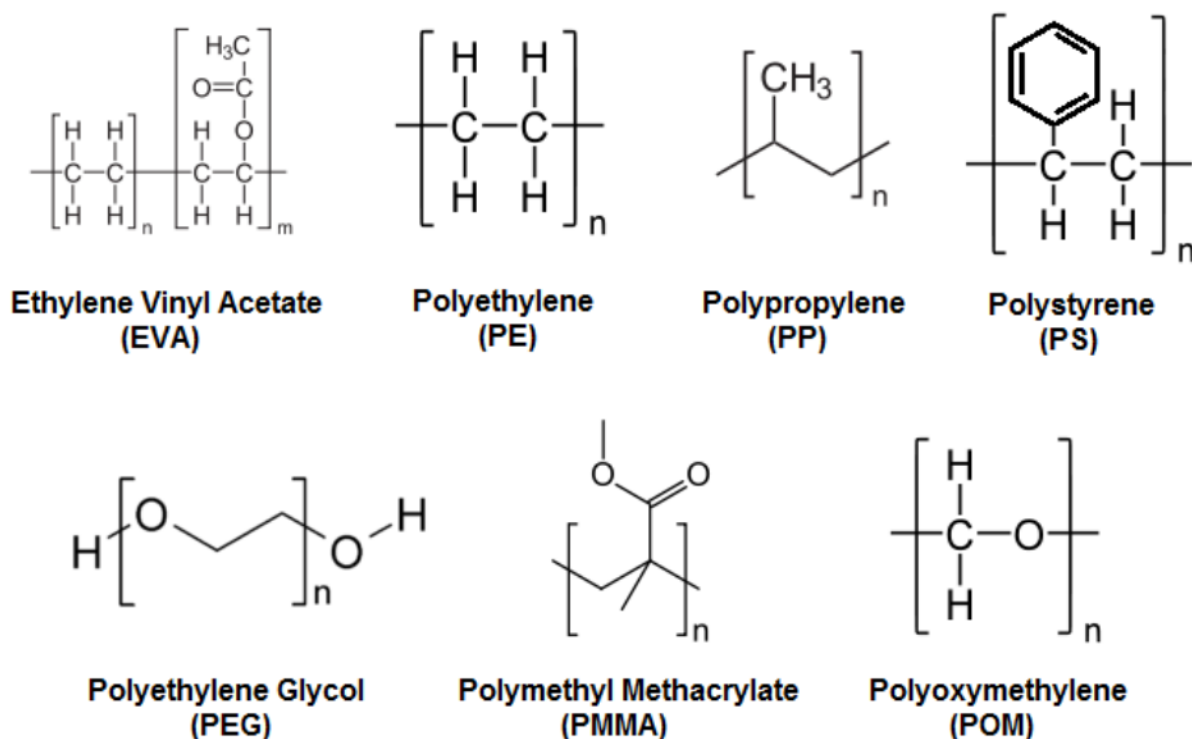
Слика 31. Миксери са z-оштрицама за серијску производњу сировина [2]



Слика 32. Ролне за сецање за континуирану производњу сировина [2]

4.2 Формулација везива

Везивна средства која се користе за *PIM* обично су дизајнирани као вишекомпонентни системи. Једна од главних компоненти се назива окосница, што је термопластични полимер који подржава и одржава облик ливеног дела до последње фазе везивања. Као пример, тренутно коришћене окоснице, могуће је споменути етилен винил ацетат (EVA), полиетилен (PE), полипропилен (PP), полистирен (PS), полиетилен гликол (PEG), полиметил метакрилат (PMMA).



Слика 33. Примери полимера који се користе у различитим формулацијама везива [2]

Друга компонента, у пропорцији слична окосници, је обично восак, као парафин или карнауб восак, или у неким случајевима чак и агарозном, који побољшава течење материјала. Осим побољшања покретљивости, што би код компоненти требало лако уклонити у раним фазама припреме пре синтеровањ преко методе растварања остављајући отворене поре да би омогућио да гасовити производи преосталог полимера изађу ван структуре. Иако овом ниском тачком топљења температура компоненте има важну улоги, треба напоменути да механичка целост финалног производа се смањује као и његово пропорционално повећање после одрђених граница.

Значај сваког од ове две главне компоненте везива се може боље разумети детаљнијим описом механизма припреме пре синтеровања. На почетку припреме пре синтеровања нема пора или слободног простора који су приказани у калупу дела, стога окосница компоненте има кључну улогу задржавања облика дела, и избегавања пукотине.

Међутим, појава *ПОМ*-базног везива, система за *PIM*, је омогућио да се уклони полимерно средство до 35 mm дебљине без употребе било ког воска или компоненте ниске молекуларне тежине. Као што је претходно описано, *ПОМ* разлаже претежно у присуству киселе паре (као оксална или азотна киселина) далеко испод свог омекшавања, то јест, у чврстом стању, избегавајући пукотине и надутост који могу бити проузроковани кључањем везива. Полимер не продире од стране гасова киселине и одвија се искључиво на интерфејсу гасног везива са скоро планарне припреме пре синтеровања. У том смислу, размена гасова је ограничена на већ порозни омотач и нагомилавање унутрашњим притисцима се избегава ипак, систем *ПОМ*-базног везива често садржи до 30% полиетилена који не реагује са киселим испарењима, делује као окосница до спаљивања у току циклуса синтеровања.

Адитив као површински може саставити везиво, а стеаринска киселина је један од примера. Ова површински активна диспергујућа средства нормално представља ниско топлјиве температуре и афинитет који ће приоритетно да апсорбују на праху површине формирајући густо-танки спољни слој на површини честица која води ка хомогеној структури паковања. Појава мехурића и пукотина је пријављена као повећање површинске количине, вероватно поседују смањене температуре испаравања од површински активне материје, састоје се углавном од кратких молекула.

4.3 Производња праха

Керамички и метални прашови се могу добити из различитих поступака. Следећи одељак ће описати неке од метода које се користе за добијање керамичких и металних прахова, различитих облика и величина.

4.3.1 Керамички прашови

Методе које се користе за синтезу керамичких прахова су механичке и хемијске методе. Механичке методе су знатно јефтиније од хемијских метода. Међутим, хемијске методе пружају бољу контролу карактеристике праха, као што је облик и величина честица. Механичке методе се углавном користе за добијање прахова од природних сировина. Операције као што је дробљење, брушење и глодање су класификоване као механичке методе. Конусне дробилице се користе за производњу прахова у опсегу величине честица од 0,1 до 1 mm. У циљу постизања честица мање од 1 mm обично се користи глодање. Глодала која се данас користе укључују високо компресована вретенаста глодала, млазна глодала и лоптаста глодала. Хемијске методе се генерално користе у синтези прахова од напредне керамике, од синтетичких материјала или од материјала из природе.

4.3.2 Метални прахови

Већина металних прахова могу се произвести ситњењем од рафинисане руде. Глодање и млевење су поступци за производњу прахова било ког степена финоће од трошног или савитљивог метала (нпр. титанијума или челика). Ипак нису све величине честица подложне синтеровању, генерално су то честице испод 45 μm . Тренутно, постоји тенденција да се користе субмикронске наночестице, пошто може бити постигнута боља густина паковања, њихова активација енергија је већа и њихова температура синтеровања нижа. Ипак треба бити пажљив приликом руковања нано прахом, јер они могу бити експлозивни или могу лако оксидирати. Металургија праха користи честице у опсегу од 1 до 45 μm . Посебно, за бризгање метала средња величина честица креће се од 5 до 15 μm . Овај тип величине честица може генерално бити постигнут у лоптастим млиновима, ротационим млиновима и планетарним млиновима. Никл или гвожђе може реаговати са угљен моноксидом да се формира метални карбонил. Метални прах из карбонила има високу чистоћу, малу и уједначену величину зрна, а честице су густе и округле. Најчешће коришћени прахови, у данашњој *MIM* производњи, су карбонилни прахови.

4.3.3 Субмикронски прахови

Уз растућу потражњу за микроделовима који се користе у електроници, ауто деловима и у биомедицинској области, постоји потреба да се користе прахови са мањим честицама и обављају оно што се зове *Micro-PIM*. Најмања карактеристика једног дела може бити само десет пута већа од пречника честице, тако да у циљу добијања микроделова са добро дефинисаном ивицом и задржавањем облика, треба користити субмикронске или наночестице. Такође, субмикронски прахови имају повећану активност синтеровања, која је погодна за постизање велике густине тела на нижим температурама синтеровања. Такви прахови су још увек у фази развоја, јер постоји много питања која морају да буду решена.

Карактеристике праха и везива се односе на све накнадне одлуке обраде у бризгању праха. Потребан је прецизан биланс између праха, састава везива и односа праха и везива.

Честица је најмања јединица праха која се не може поделити једноставним механичким средствима. Нагомилавање је чест проблем са малим честицама. Скенирање електронским микроскопом је доступно за посматрање дискретних карактеристика честица. Има многе варијанте у величини и облику честица, али су честице генерално заобљене и величина испод 20 μm . Густина је између 30 и 80 % од теоријске, али је најчешће око 60%. Сфере имају од 60 до 64 % густине, али сферни облици су мање ефикасни. Ако је прах нерегуларан, густина паковања је деградирана. На пример, правоугаоне честице имају до 51 % густине, честице кратког цилиндра до 68 % густине, али друга влакна са односом дужине према пречнику од само 10 до 48 % густине. Широка расподела величине честица помаже паковању јер мале честице се уклапају између великих честица, али ово паковање се показало теже за руковање и склоно одвајању при обликовању. Облик честица утиче на *PIM* процес, што се види из понашања паковања. Разумевање процеса *PIM* захтева основну потребу за разумевањем прахова. Бриге су следеће:

1. величине честица и његова дистрибуција,
2. облик честице,
3. површина,
4. унутрашња структура честица,
5. хемијски нагиб, површински филмови и помешан материјал.

Да се одреди прах у потпуности такође је потребно да се опише како је произведен. Ови параметри су важни за успешну стандардизацију бризгања сировине.

4.4 Карактеристике идеалног *PIM* праха

Многим истраживањима је утврђено да се идентификују одговарајуће карактеристике праха за обраду *PIM*-а.

Многи прахови су оцењени, производећи генерички дефиницију идеалног праха. Ова дефиниција представља равнотежу између неколико фактора, почев од реолошких својстава (облик честице и величине честица), димензионалне контроле у одстрањивању везива, синтеровање (величине честица, честице микроструктуре и густину за паковање) квашење везива (површинско), мешања (облик честице и величина), одстрањивање везива (величина честице, облик и густину паковања), и обликовање (облик честица и величине честица).

За свако појединачно својство, одређене карактеристике честица доминирају; тако да је овај композитни листинг заснован на студијама неколико прахова и комбинацијама карактеристика праха. Често су захтеви контрадикторни. Лакше обликовање и велике тврдоће су омиљене од стране сферних честица.

Прах за бризгање је подељен у четири производна корака:

1. Припрема сировина
2. Бризгање
3. Одстрањивање везива
4. Синтеровање

Прво, комбинацијом пластике, воска и метала или керамике настаје прах који се може обрадити бризгањем. Овај материјал се обично назива „сировина“. Машине и алати технологије могу убризгавати слично као бризгање пластике. Обликовани део је тзв. зелени део (несинтеровани део). Следећи корак је ослобађање од компоненти пластике и воска процесом одстрањивања везива. Такав део се зове браон део (део са одстрањеним везивом). Последњи корак је синтеровање браон дела (дела са одстрањеним везивом). У овом процесу појединачне честице се спајају, браон део се скупља и постаје компактна компонента. Ово скупљање, приликом синтеровања, зависи од пропорције праха у сировини, обично између 20% и 30%. Коначна компонента има сличне особине као основни материјал.

1. Припрема сировина

За металне или керамичке компоненте у процесу ливења прва компонента материјала у облику праха мора бити фиксирана/повезана/спојена у полимер/восак мешаном систему. Племенити метали, бакар, челик и легуре титана су за сада доступне за бризгање металног праха. Са стране керамичких материјала сада се могу користити оксид керамике као што је алуминијум-оксид или цирконијум-оксид, али не и оксид керамике као што је бор-нитрид и силицијум. Због различитих величина честица праха, простор између зрна праха се лако попуњава. Честице праха су величине од неколико микрометара.

Првих година бризгање праха се везивало на основу полиолефинских воштаних смеша. Мешавина компоненти (сировине) за мале количине се прави у једном млину, а за веће у екструдеру. Након процеса мешања, сировине у процесу, или аутоматски или коришћењем млина, у облику гранула су спремне за бризгање. У зависности од масе, пуниоци материјала обично заузимају 45% - 65% запремине.

2. Мешање

Метални или керамички прахови се мешају са термопластичним полимерима (познати као везиво) да се формира хомогена смеша састојака која је спремна за директно уношење у машину за бризгање. Овако спреман прах – полимер смеша се назива сировина.

3. Убризгавање

У овом процесу, сировина се загрева до топљења у циљу формирања жељане геометрије. Овакав део, не синтерован, се назива зелени део.

4. Одстрањивање везива

Везиво се уклања са зеленог дела термичким загревањем на око 400⁰ С. Готов део се назива браон део, који садржи своју првобитну геометрију и величину.

5. Синтеровање

У овом процесу, браон део се загрева до око 85 % од температуре топљења материјала, омогућавајући сабијање и скупљање праха у чврст део, елиминишући поре.

5. МАШИНЕ ЗА ОБРАДУ *PIM* ТЕХНОЛОГИЈОМ

Опрема за *PIM* технологију садржи: млин за добијање праха, мешалице за мешање праха, због хомогенизације, постројење за формирање праха са полимерним омотачем, опрема за бризгање, опрема за уклањање полимерне опне, постројења за синтеровање.

1. Опрема за бризгање

DXCJ120M3V Magnetic Field Injection Machine

DXCJ120M3V МАШИНА ЗА ИНЈЕКЦИОНО БРИЗГАЊЕ је велике брзине, за уштеду енергије, максимална сила стезања је од 80 t до 480 t, запремина бризгања од 113 g до 2152 g. **M3** серије *IMM* су опремљени са *CPC* или *MPC LCD* управљачком јединицом на кинеском и енглеском језику.



Слика 34. DXCJ120M3V Машина за бризгање [10]

Табела 3. Опште карактеристике машине за бризгање

Јединице убризгавања		
Обим ударца	cm ³	163 221 265
Тежина ударца	G	153 207 249
Пречник вијка	Mm	36 42 46
Притисак убризгавања	Mpa	185 136 113
Однос вијка L:D	-	23:1 20:1 18:1
Ход завртња	Mm	160
Брзина завртња	r/min(max)	185
Јединице стезања		
Сила стезања	kN	1200
Отворени ход	Mm	340
Величина плоче	mm×mm	610×560
Размак између вођица	mm×mm	410×360
Дебљина калупа (мин.мах)	Mm	145-380
Хидраулички удар избацивања	Mm	100
Хидрауличка сила избацивања	kN	42
Снага		
Притисак хидрауличног система	MPa	17.5
Пумпа мотора	Kw	11
Капацитет грејања	Kw	8.8
Број контролних зона температуре	/	3
Опште		
Капацитет резервоара за уље	L	200
Димензије машине (L*W*H)	m×m×m	4.0×1.2×1.7
Тежина машине	Ton	3.5

TY-350.2R.SF Вертикална машина за бризгање

Основна предност ове серије јесте вертикална јединица за бризгање, компактност и заузимање мале површине до 50% у односу на стандардне машине.



Слика 35. TY-350.2R.SF Вертикална машина за бризгање [11]

Табела 4. Основне карактеристике вертикалне машине за бризгање

МОДЕЛ		ЈЕДИНИЦЕ	TY350.2R.SF
	Пречник шрафа	mm	18
	Притисак убризгавања	Kg/cm ²	3500
	Теоријски обим удараца	cm ³	29
	Мах. тежина удара	g/Oz	26/0.9
	Стопа убризгавања	cm ³ /sec	62
	Контрола температуре	ZONE	6
	Сила стезања	T	35
	Отворена сила	T	5.6
	Димензије калупа	mm	415x250
	Мин висина алата	mm	200
	Сила избацивача	T	2.3
Хидраулични	Мах.хидраулични притисак	Kg/cm ²	140
електрични	Излаз пумпе	L	240
систем	Снага пумпе мотора	Kw	15
	Снага грејања цеви	Kw	2.5
	Укупна снага	Kw	17.5
Остало	Тежина машине	T	1.7
	Димензије машине (L*W*H)	mm	2x1.5x3.2

TY-200S Single skateboard injection molding machine

TAYU је један од професионалних произвођача вертикалних машина за бризгање у Кини. Ова машина има четири могућности вертикалног убризгавања. Сила стезања је око 25Т.



Слика 36. Вертикална машина за бризгање [12]

Табела 5. Основне карактеристике TY-200S машине за бризгање

МОДЕЛ	ЈЕДИНИЦЕ	TY – 200S	
Пречник шrafoва	Mm	Ø28	Ø32
Притисак убризгавања	Kg/cm ²	1446	1107
Теоријски обим ударца	cm ³	65	84
Мах. тежина ударца	G	58	75
Стопа убризгавања	cm ³ /sec	40.3	52.7
Контрола температуре	ZONE	3	
Запремина сандука	L	15	
Сила стезања	T	25	

Димензије калупа	Mm	360×230
Мин. висина калупа	Mm	100
Сила избакивача	T	1.3
Мах. хидраулички притисак	Kg/cm ²	140
Излаз пумпе	L	130
Снага пумпе мотора	Kw	4
Укупна снага	Kw	6.7
Тежина машине	T	1.25
Димензија машине (L×W×H)	M	1.8×0.9×2.7

ARBURG машина за бризгање

ARBURG машине су најпознатије машине за бризгање. Силе стезања од 1000 до 2000 kN.



Слика 37. Машина за бризгање ARBURG Allrounder 420 C (1000-350) [13]

Табела 6. Основне карактеристика ARBURG машине за бризгање серије ALLROUNDER 420 C

Сила стезања, kN	1000
Пречник шrafoва, mm	30/40/45
Висина калупа, мин., mm	250
Удаљеност плоча, мах., mm	750
Притисак убризгавања, мах., bar	2500
Запремина, cm ³	139/182/230 168



Слика 38. Машина за бризгање ALLROUNDER 470 C GOLDEN EDITION [14]

Табела 7. Карактеристике ARBURG машине за бризгање серије ALLROUNDER 470 C

Стезне јединице са силом стезања мах., kN	1500
Висина калупа, mm	250
Удаљеност између вођица, mm	470×470
Тежина покретне половине калупа, kg	800
Сила избацивача, kN	40
Време циклуса, min	1,8

2. Машина за формирање праха са полимерним омотачем

Solids/Liquid Injection Manifold (SLIM) Mixer

Машине за формирање праха са полимерним омотачем се користе за мешање праха са полимерима – везивом, *слика 39*. Запремина мешалице се креће од 50 l до 100 l.



Слика 39. Мешалица за облагање праха полимером [15]

3. Опрема за добијање праха

Пре почетка процеса бризгања потребно је припремити материјал, односно прах. Да би се прах потребни су млинови и пећи за добијање праха. Једна таква пећ је приказана на слици 40.



Слика 40. Пећ за производњу прахова [17]

4. Опрема за уклањање полимерне опне

После процеса бризгања добија се не синтеровани део, који се назива „зелени део“. Такавом делу, пре процеса синтеровања је потребно одстранити везиво. То уклањање везива се врши у пећима, као што је приказана на следећој слици.



Слика 41. Пећ за одстрањивање везива [18]

5. Постројења за синтеровање



Слика Стандардна вакуумска пећ за синтеровање [17]

Табела 8. Основне карактеристике пећи за синтеровање

Максимална температура	1350, 1600 или 2200 °C
Стандардне димензије коморе	300×300×600 до 900×800×1800 mm
Количина праха	Од 100 до 2500 kg

6. ПРИМЕРИ ПРИМЕНЕ *PIM* ТЕХНОЛОГИЈЕ

6.1 Примена умрежавања металних и керамичких компоненти у биомедицинске сврхе

Институт за Индустријске Материјале у оквиру Канадског Националног Истраживачког Већа (*NIV-IIM*) поседује нову интегрисану платформу за обликовање која служи за израду металних и керамичких медицинских имплантата и уређаја. Ове нове техничке олакшице пружају могућност компанијама које раде у овом сектору да тестирају своје концепте, процесе производње као и потенцијална тржишта.

Током последњих неколико година *NIV-IIM* врши велика улагања у област биоматеријала како би помогао компанијама да одговоре на нове технолошке изазове у медицинском сектору. Циљ је унапређивање израде металних и керамичких медицинских имплантата применом технологије бризгања/синтеровања композита – праха са растопљеним везивом у биомедицинске сврхе. Активности *NIV-IIM* су намењене корисницима, дизајнерима и произвођачима биомедицинских делова, као и произвођачима металних и керамичких прахова, а и компанијама које припадају другим индустријским секторима.

Предности:

- Израде нових материјала и легура
- Истраживања алтернативе машинској обради код производње сложених делова са високим нивоом функционалне интеграције
- Скраћивања времена које је потребно за тестирање маркетинга и концепта путем производње на мало.

Припрема и израда гранулата

Уз своју експертизу у формулацији полимера, полимерних композита и прахова *NIV-IIM* има при руци све што је потребно за осмишљање формулација које су карактеристичне за технологију инјекционог бризгања прахова. Опрема коју поседује омогућава производњу и контролисање реологије и хомогености формулација које се производе и у мањим и у индустријским количинама.

Бризгање

Инјекционе пресе које нуди *NIV-ИМ* покривају широк спектар запреминских делова и широк опсег ињекционог притиска (од 0.5 до 250 Мра).

Нове функционалности такође се могу добити уз помоћ дво-компонентног бризгања. На пример, могуће је помешати магнетске и немагнетске материјале или густе и порозне материјале током процеса бризгања, и на тај начин кораке у машинској обради и спајању свести на минимум.

Минијатурне компоненте могу бити произведене како би служиле у микромеханичке и микрофлуидне сврхе. Високо-прецизно израђени делови са запремином мањом од 1 – 3cm³ могу се добити уз помоћ технологије микроињекционо бризгање прахова уз високу стопу производње.

Да би подржао делатности технологије ињекционог бризгања прахова, *NIV-ИМ* је такође развио паралелни завршни елемент-компутациони софтвер за моделовање који симулира 3D процес, и на тај начин може да предвиди ток формулације током убризгавања у калуп, фаза сабијања и хлађења. Поред других својих предности, експертиза *NIV-ИМ* помаже код оптимизације облика шупљина, пре него што се калуп формира.

Одстрањивање везива и синтеровање

У самом центру активности којима се бави *NIV-ИМ*, налази се развој везива која се могу деградирати у потпуности, без остатака, и развој процедура синтеровања које су прилагођене за реактивне метале. У зависности од својстава везива и прахова, могу се користити солвентни, каталитички и термални начини одстрањивања везива.

Висок вакуум, снижена атмосфера или пећ са инертним гасом пружају велику флексибилност условима синтеровања за консолидацију већине метала и керамике.

Карактеризација

Платформа за израду код технологије ињекционог бризгања прахова такође обухвата више-димензионалне, хемијске, механичке и микроструктурне инструменте за карактеризацију који су неопходни да би се испитао квалитет и да би се тестирали концепти.

На располагању су следећа опрема и технике:

- Анализа расподеле величина честица
- Анализа флуидности и густине праха
- Термогравиметријска и термална анализа (TGA, DTA, DSC)
- Анализа елемената C, S, O, N, H
- Пикнометар за гас
- Бесконтактни више-сензорни метролошки систем
- Конфокални и интерферометријски оптички систем профилометрије
- Дифракција x-зрака
- Лабораторије за металографију, оптичку и електронску микроскопију
- Лабораторија за механичка испитивања

Експертиза у карактеризацији материјала коју поседује *NIV-IIM* омогућава да се подржи развој нових примена технологије ињекционог брызгања прахова, да се осигура да буду испуњени критеријуми који се тичу димензија, и да се обезбеде сва физичка и хемијска својства неопходна за сваку од примена које индустрија разматра.

Преко Концепта до Израде

Широк спектар експертизе коју поседује *NIV-IIM* у комбинацији са пуним додатком алата за израду помоћу технологије ињекционог и микроињекционог брызгања прахова чини ову техничку олакшицу јединственом платформом у Канади. Она пружа могућност *NIV-IIM* истраживачима и њиховим партнерима за истраживање и развој да произведу компоненте у мањим и средњим количинама, и на тај начин убрзају тестирање својих концепата, технологију израде и потенцијална тржишта.

Приступ опреми и експертизи коју поседује *NIV-IIM* пружа могућност:

- Да се дизајнирају, израде и обликују метали и легуре, керамички материјали и композитни материјали који се не могу добити машинском обрадом.
- Да се подржи дизајн и израде сложени имплантати и микро-имплантати, као и саставни делови хирушких инструмената, ортодомтских система, итд.
- Да се израде керамички и метални делови са микроструктурним површинама како би се користили у микрофлуидне и биоинжењерске сврхе, итд.
- Да се развојем дво-компонентног брызгања и композитних материјала, развију интеграционе компоненте високе функције.
- Да се смање трошкови производње мањих и средњих количина металних и керамичких делова

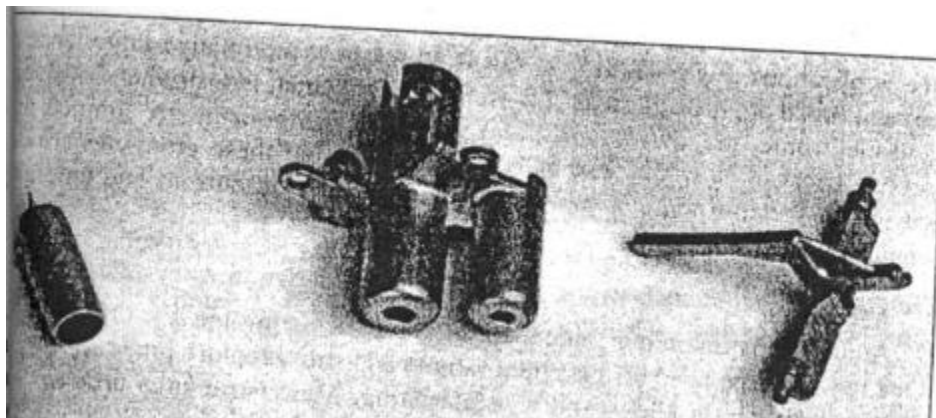
Сарадња са Индустријом

Преко пројекта Истраживање и развој и преконкурентских истраживачких пројеката, *NIV-IIM* сарађује са компанијама и користи трансфер напредних технологија како би им осигурао технолошку конкурентску предност.

6.2 Аутомобилска индустрија

Иако аутомобилска индустрија обилује могућностима примене, постоји свега неколико компонената у дугорочној производњи. Извесни почетни успеси су постигнути са механизмима закључавања, синхронизаторима трансмисије, сензорима за активирање ваздушних јастука и командним уређајима за управљање радом светлосних сигнала. Сензори концентрације кисеоника, који се праве од циркона, производе се за примену у аутомобилској индустрији, при чему их се дневно произведе 6.000. Ипак, за широку употребу, постоје ограничења која се огледају у цени компонената и недостатку индустријске префињености у раду са веома великим обимом, неопходним за ефикасну

производњу у аутомобилској индустрији. Неке компоненте мотора су испитиване за стопу производње од 300.000 дневно, али то је далеко више од капацитета највећег броја *PIM* погона. Поред тога, смањење цена помоћу аутоматизације је главни циљ примене у аутомобилској индустрији. Дакле, примене у аутомобилској индустрији су углавном у нишама које захтевају комплексност облика и у којима се производња конкурентним поступцима показала тешком. Примери су приказани на слици 43.



Слика 43. Аутомобилски сензори ваздушних јастука компоненти произведени *PIM* технологијом [1]

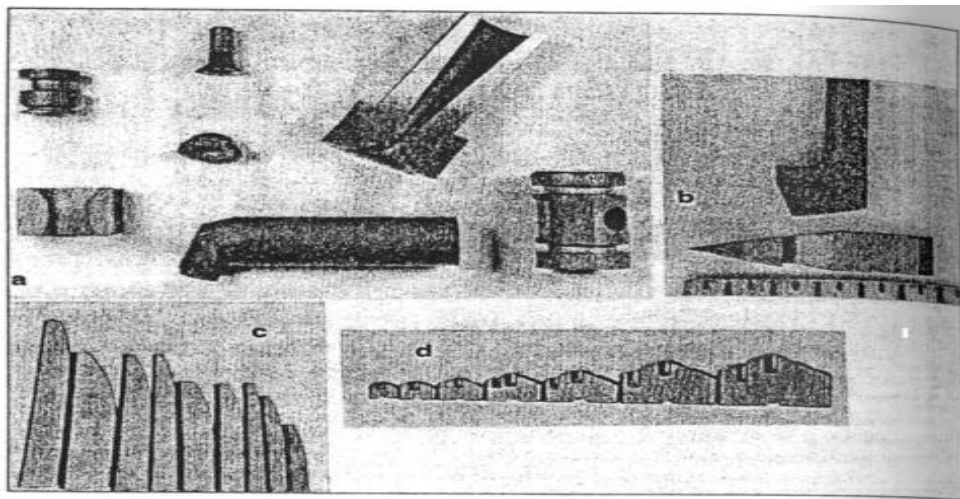
Приказане су компоненте које се користе при склапању сензора за активирање ваздушних јастука. Остале примене укључују турбокомпресоре, зупчанике за електрично подешавање седишта, механизме за мењање брзина, браве и сензоре кочионог система. Претходних неколико година, керамички турбокомпресори (на бази силицијум нитрида) су произвођени путем *PIM*, али у количинама обично мањим од 30.000 месечно.

Као што је наведено, највећи технички изазов који поставља примена у аутомобилској индустрији је производња у великом обиму. Како би се одговорило на овај изазов, неопходан је континуирани процес при уклањању везујућих адитива као и при синтеровану. Такви поступци тек излазе из фазе пројектовања, али јасно је да је цела инфраструктура неопходна за континуирано мешање, за роботизовано руковање деловима након обликовања и синтеровања, као и за преглед исправности делова.

6.3 Алати за сечење

Цементирани карбиди ($WC-Co$) обрађени путем *PIM-a* се нашироко користе као потрошни делови и делови за сечење. Један од првих примера је израда специјалних алата за сечење дрвета, као што су глодала. Остале примене укључују центрифугалне млазнице, млазнице за распршивање и млазнице за пескарење, код којих су отпорност на хабање и корозију од кључне важности. Друге примене обухватају компоненте пумпи, сечива, цедиљке, сетове глодала, бургије и алате за сечење. Различити *PIM* водичи конца се користе на машинама за ткање текстила. Свака од ових компонената захтева комплексност

облика коју пружа *PIM*, заједно са својствима снаге и хабања цементираног карбида. Слика 44 даје пример компонената коришћених за млазнице и за поступке сечења. *PIM* је идеалан за израду компонената са великом разликом односа дужине и пречника, као што је израда бургија.



Слика 44. Облици формирани *PIM* технологијом: а) млазнице; б) писар од 18 мм дужине; в) алати за сечу дрвета који су до 35мм дужине, д) зидарске бушилице ширине до 20мм [1]

Слагање синтерованих карбида је тешко, пошто захтева обликовање у стању пре синтеровања, које је идеално за *PIM*. Густина у стању пре синтеровања, која је могућа при *PIM*, олакшава контролисање облика током синтеровања. На тај начин, у оним применама у којима је најважнија отпорност на хабање, цементирано карбиди се обрађују помоћу *PIM*, уз побољшану прецизност и снижене трошкове. У већини примена, процес производње није видљив крајњем купцу, јер се највише пажње посвећује техничким карактеристикама. Према једном прорачуну, вредност светске *PIM* производње у 1995. се процењује на око 25.000.000\$. Иако ово делује као доста, неке од примена у изради бургија и алата за сечење су скупе, а *PIM* компонента представља важан, иако релативно мали допринос укупним трошковима.

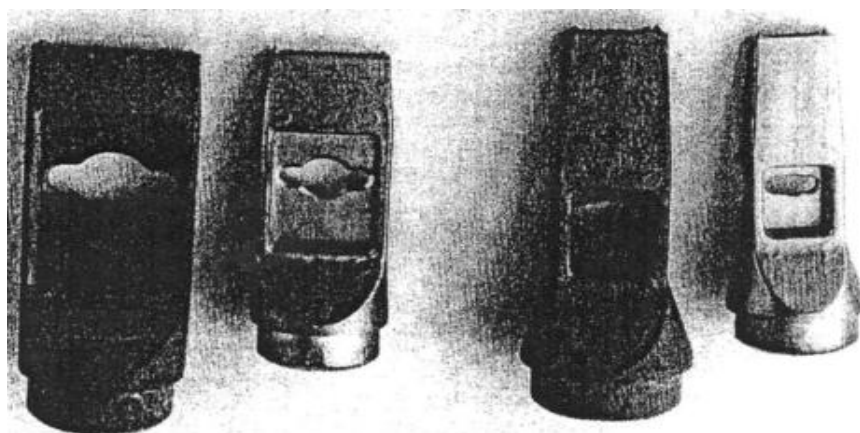
6.4 Индустијска керамика

Једна од често потцењиваних области примене *PIM* је област индустијске керамике. Ту спадају компоненте које су у широкој употреби у вези са заваривањем, топљењем легура, топлотним баријерама, сензорима, термопаровима, постољима за печење керамике и електричним изолаторима. Делатност индустијске керамике у *PIM* је веома фрагментирана, али ипак сваки важан актер у индустрији керамике има неку варијанту ове технологије. Многе од ових компанија имају само једну машину за обликовање, коју користе у складу са тренутним потребама. Недовољно директне пажње се посвећује *PIM*-

у, који се радије користи као средство за производњу сложенијих облика. У САД постоји преко 20 компанија које производе керамичке *PIM* компоненте, углавном из једињења глинице и силицијум диоксида или из чисте глинице. Свака од ових производња је релативно мала, али када се саберу укупни износ може достићи између 15.000.000\$ и 25.000.000\$ годишње продаје. Типични облици су тигл, шоља, млазница, или слични геометријски облици.

6.5 Медицински инструменти

Медицински инструменти представљају веома велику прилику за *PIM*. Ову област примене покреће жеља да се елиминишу предмети за виšekратну употребу који могу бити контаминирани крвљу. Рано интересовање за *PIM* компоненте је обећавало брз раст, али због проблема са ценом и због неодговарајуће процене тржишта није препозната конкуренција у виду пластичних предмета за једнократну употребу. Тренутне пројекције боље увиђају могућност за спор, али прогресиван раст у областима медицинских алатки и инструмената. На пример, компоненте хируршких металних копчи су приказане на слици 45, пре и после синтеровања.



Слика 45. Скупљање медицинских компоненти након синтеровања [1]

PIM процес је ефикасан и наставља да поприма нове примене. На пример, тешке легуре волфрама се убризгавају како би се формирала заштита од зрачења за шприцеве који се користе у давању радиоизотопа током хемиотерапије. У друге сврхе, керамички хируршки ножеви и средства за бушење су развијени за потребе лапароскопских операција. Једна од узбудљивих примена је за ин ситу хируршка снимања, помоћу *PIM* керамике која формира ултразвучне слике артерија гледаних изнутра.

Примена *PIM* компонената у имплантатима споро напредује. Препреку представљају захтеви замора материјала. Ипак, *PIM* облици могу бити обликовани по задатим димензијама и могу да се користе у применама које подразумевају мањи притисак, под претпоставком да поседују адекватна својства корозије.

7. ПРИМЕР ИСПИТИВАЊА УЗОРАКА ДОБИЈЕНИХ РИМ ТЕХНОЛОГИЈОМ

За примере добијене из фирме „ЗАСТАВА ОРУЖЈА“ Крагујевац, извршена су испитивања: густине, порозности, тврдоће и хемијског састава у сарадњи са фирмом „СИНТЕР“ из Ужица.

Табела 9. Вредности испитиваних узорака

	УЗОРАК 1	УЗОРАК 2	УЗОРАК 3
ГУСТИНА, g/cm ³	7,56	7,48	7, 55
УКУПНА ПОРОЗНОСТ, %	3,08	4,10	3,2
ТВРДОЋА, HRC	48,5; 48; 48,9	47,5; 48,9; 48,7	49,5; 48,8; 49,3
ТЕЖИНА, g	0,997	0,995	0,997
ЗАПРЕМИНА, cm ³	0,1320	0,1330	0, 1285

Хемијски саств рађен на спектрометру, на кривој која може да прикаже само Ni; Cu; Мо и Fe као остатак.

Табела 10. Хемијски састав узорака

ХЕМИЈСКИ САСТАВ [%]	
C	0,75
Ni	1,912; 1,890
Cu	0,0288; 0, 0101
Mo	0,5047; 0,499
Fe	Остатак

На сликама 46, 47, 48 су приказани уређаји, на којима је вршено испитивање датих узорака, у лабораторији фирме „SINTER“ из Ужица.



Слика 46. Уређај за испитивање тврдоће



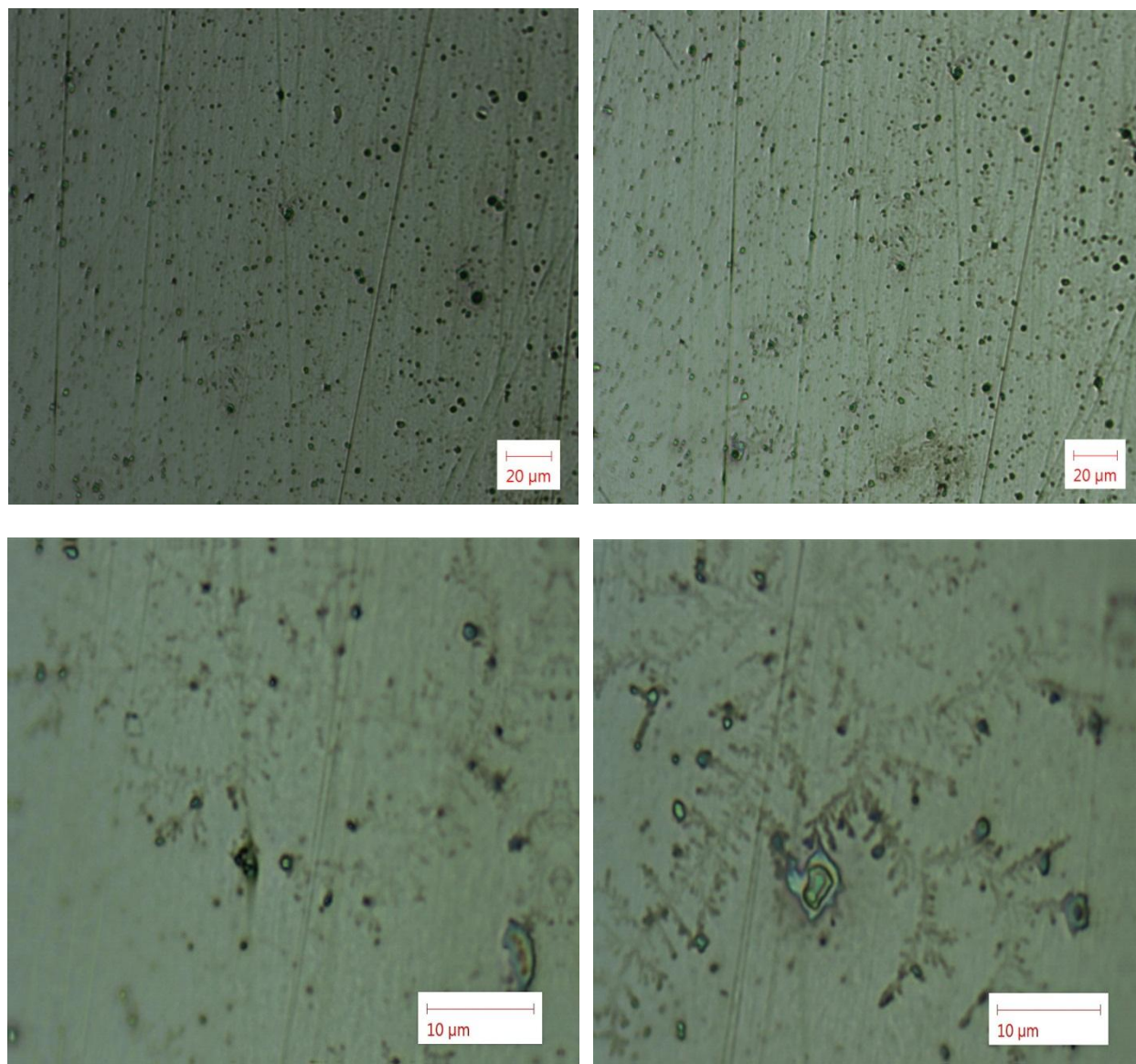
Слика 47. Уређај за одмашћивање узорака



Слика 48. Спектрометар за одређивање хемијског састава

На следећим сликама су приказане полиране површине узорака, на којима се јасно уочава порозност, и дендритна структура, али није вршено нагризање тако да се не може изводити коначни закључак о структури узорака.

Испитивање је вршено у сарадњи са Факултетом инжењерских наука, у Крагујевцу.



Слика 49. Полиране површине узорака

8. ЗАКЉУЧАК

Током последње деценије *PIM* технологија (бризгање праха са растопљеним везивом) је постала поуздана технологија за серијску израду металних и керамичких компоненти сложених форми. Данас *PIM* индустрија доживљава експанзију потискујући конкурентске технологије и преузимајући део њиховог тржишта. Досадашње искуство и знање из сродних области омогућава релативно једноставно усвајање технологије инјекционог бризгања керамичких прахова (*CIM*) које је нашло широку примену у електроници, авио-индустрији, аутомобилској индустрији, хемијској индустрији, медицини итд. Ради се о серијској производњи комплексних керамичких компоненти малих димензија и сложених геометрија са толеранцијама мањим од $\pm 0.3\%$. Ове компоненте се одликују великом чврстоћом, механичком снагом, отпорне су на хабање, корозију и старење, стабилних су димензија, високих радних температура.

Употреба *PIM* у свим корацима развоја циклуса производа може да побољша смањење трошкова и времена на тржишту.

Ова атрактивна технологија настала је комбинацијом класичног бризгања и металургије праха. Подразумева бризгање праха композита са растопљеним везивом.

Одлике *PIM* технологије:

- могућност производње комплексних делова који се не могу добити класичним поступком;
- бризгање различитих материјала ;
- густина делова од 96 до 100 % ;
- толеранције димензија лако оствариве.

Инјекционо бризгање металних и керамичких прахова нашло је широку примену у металској индустрији, електроници (сензори и актуатори), авио-индустрији (механички делови, сензори и актуатори), аутомобилској индустрији (механички делови), хемијској индустрији (мембране, вентили), медицини (вештачке кости) итд. Ради се о серијској производњи комплексних компоненти сложених геометрија. Површина добијених компоненти најчешће не захтева додатну обраду.

Желела бих овом приликом да се захвалим свом ментору др. Богдану Недићу, на великој подршци, помоћи и стручним саветима које ми је пружио не само током израде овог мастер рада, већ и у току студирања.

Такође бих жела да се захвалим фирмама „CORUN“ и „SINTER“ из Ужица, које су ми изашле у сусрет у току израде мастер рада, и омогућиле да се упознам са њиховом производњом и технологијом синтеровања, као и на испитивању узорка у „SINTER-у“.

И велику захвалност упућујем фирми „ЗАСТАВА ОПУЖЈА“ из Крагујевца, која ми је омогућила узорке добијене *PIM* технологијом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Randall M.German, Animesh Bose: "Injection Molding of Metals and Ceramics, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 1997.
- [2] Joamin Gonzalez, Gustavo Beutke Stringari and Igor Emri: „Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts”, Center for Experimental Mechanics, University of Ljubljana, Slovenia.
- [3] Металургија праха, скрипта, 2008.
- [4] Иванка Станимировић, Здравко Станимировић: „PIM технологија – Могућности и изазови“, Институт за телекомуникације и електронику IRITEL A.D. Београд, Март 2009.
- [5] Фирма: „Синтер“, Први Партизан, „Синтеровани делови“, Титово Ужице.
- [6] Mathien Boisclair and Benoit Julien : "Powder Injection Molding (PIM) for Low Cost Manufacturing of intricate Parts to Net-Shape", National Research Council Canada – Industrial Materials Institute, Canada, 2006.
- [7] B. Berginc, M. Rot: "Brizganje prašnatih materialov", IRT 3000, No. 9, pp.139-141, jun 2007.
- [8] F. Petzoldt, "Micro powder injection moulding – challenges and opportunities", Powder Injection Moulding International, Vol.2, No. 1, pp. 37-42, March 2008.
- [9] K. Yoshikawa, H. Ohmori: "Outstanding features of powder injection molding for micro parts manufacturing", RIKEN Review, No.34, pp. 13-18, April 2001.
- [10] Интернет адреса: <http://www.magnetomachinery.com/magnet-field-injection-machine-1.htm>, приступљено 10.05.2015
- [11] Интернет адреса: <http://injection-molding-machine.tayu.cn/Vertical-injection/260.html>, приступљено 10.05.2015
- [12] Интернет адреса: <http://injection-molding-machine.tayu.cn/Vertical-injection/131.html>, приступљено 10.05.2015
- [13] Интернет адреса: <https://www.uni-due.de/kkm/arburlg.shtml>, приступљено 10.05.2015
- [14] Интернет адреса: http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_A_LLROUNDER_470C_GOLDEN_EDITION_TD_523679_en_GB.pdf, приступљено 10.05.2015
- [15] Интернет адреса: <http://www.pharmaceuticalonline.com/doc/charles-ross-announces-automated-powder-mixing-skid-system-0001>, приступљено 10.05.2015
- [16] Интернет адреса: http://www.flomet.com/capabilities_metal_injection.php, приступљено 10.05.2015
- [17] Интернет адреса: <http://dinagent.com/index.php/pei-za-osebne-namene/pei-za-sinterovanje-metal-a-i-keramike>, приступљено 24.06.2015
- [18] Интернет адреса: <http://www.ceramicindustry.com/articles/87509-batch-kilns-for-binder-removal>, приступљено 24.06.2015