

**Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Војна академија Универзитета одбране у Београду**



Назив студијског програма: Војно индустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул : Наоружање

Предмет: Технологија прераде пластичних маса

Број индекса: 534/2014

Вељко М. Стаматовић

**Анализа могућности примене технологије
бризгања прахова (*PIM*)**

дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

Датум одбране: _____

Оцена: _____

1. Проф. др Богдан Недић – ментор

2. _____

3. _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука

Основне студије: **Војно индустријско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Наоружање**

Име и презиме: **Вељко Стаматовић**

Бројиндекса: **534/2014**

ПРИЈАВА ДИПЛОМСКОГ РАДА

Тема рада: **Анализа могућности примене технологије бризгања прахова (PIM)**

Задатак: У оквиру дипломског рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о технологијама металургије праха, технологијама добијања делова бризгањем прахова (PIM технологије) и машинама које се користе у овим технолошким линијама. Посебно приказати примере примене делова добијених од металних прахова у војној индустрији. У посебном делу рада потребно је извршити могућа испитивања узорка добијених овом технологијом.

Дипломски рад треба да садржи следеће целине:

1. Увода разматрања,
2. Технологије бризгања прахова - PIM технологије,
3. Карактеристике металних прахова за MIM технологију,
4. Машине за израду делова PIM технологијама,
5. Примери примене
6. Експериментална испитивања,
7. Закључци,
8. Литература.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 06.05.2020.

САДРЖАЈ:

1. УВОД	- 4 -
2. КАРАКТЕРИЗАЦИЈА МЕТАЛНИХ ПРАХОВА	- 6 -
2.1. НАЧИНИ ДОБИЈАЊА МЕТАЛНИХ ПРАХОВА	- 9 -
3. ТЕХНОЛОГИЈЕ БРИЗГАЊА ПРАХОВА – РИМ ТЕХНОЛОГИЈЕ	- 11 -
3.1. Процес бризгања (ливења) праха под притиском	- 12 -
4. МИМ ТЕХНОЛОГИЈА	- 15 -
4.1. Састављање / сировина	- 16 -
4.2. Бризгање	- 16 -
4.3. Сировине које се користе у МИМ поступку	- 18 -
4.4. Везива	- 18 -
4.5. Мешање	- 19 -
4.6. Карактеризација МИМ сировина	- 20 -
4.7. Процес уклањања везива	- 20 -
4.8. Процес синтеровања	- 21 -
5. СИМ ТЕХНОЛОГИЈА	- 23 -
6. КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРАХА ЗА РИМ И МИМ ТЕХНОЛОГИЈЕ	- 25 -
6.1. Припрема сировина	- 25 -
6.2. Основе металургије праха	- 26 -
6.3. Карактеристике идеалног РИМ и МИМ праха	- 34 -
7. МАШИНЕ ЗА ОБРАДУ РИМ ТЕХНОЛОГИЈОМ	- 37 -
7.1. Опрема за бризгање	- 37 -
7.2. Машина за формирање праха са полимерним омотачем	- 43 -
7.3. Опрема за добијање праха	- 44 -
7.4. Опрема за уклањање полимерне опне	- 45 -
7.5. Постројења за синтеровање	- 46 -
8. ПРИМЕРИ ПРИМЕНЕ РИМ ТЕХНОЛОГИЈЕ	- 47 -
8.1. Примена умрежавања металних и керамичких компоненти у биомедицинске сврхе	- 47 -
8.2. Примери примене у аутомобилској индустрији	- 49 -
8.3. Алати за сечење	- 50 -
8.4. Индустријска керамика	- 51 -
8.5. Медицински инструменти	- 52 -
9. ПРИМЕР ИСПИТИВАЊА УЗОРАКА ДОБИЈЕНИХ РИМ ТЕХНОЛОГИЈОМ	- 53 -
10. ЗАКЉУЧАК	- 56 -
11. ЛИТЕРАТУРА	- 57 -

1. УВОД

Метални прахови су у последњих неколико деценија пронашли примену у великом броју индустријских грана. Процењује се да се у свету годишње произведе око 1,3 милиона тона праха метала и легура, чија тржишна вредност премашује 3,7 милијарди долара. У укупној производњи металних прахова доминантан удео имају прахови гвожђа и челика, алуминијума, бакра, никла и волфрама.

Метални прахови се првенствено користе у металургији праха за израду чврстих делова. Процес се обично састоји из два ступња. Метални прах се најпре смешта у калуп одговарајућег облика и компактира применом високих притисака. Компактирани материјал се након тога синтерује у пећи у контролисаној атмосфери на високим температурама, како би дошло до срастања честица праха и повећања чврстоће.

Металургија праха има кључну улогу у аутомобилској, електронској и војној индустрији. Овом технологијом добијају се делови који захтевају прецизну израду (зупчаници, ланчаници, лежишта), полупроизводи (плоче, траке, жице), магнетни материјали и материјали велике тврдоће (разни делови и алати). Металургија праха омогућава знатно већу енергетску ефикасност и искоришћење полазног материјала у односу на класичну машинску обраду чврстих тела.

Иако се генерално употребљавају у мањим количинама, прахови метала у некомпактираном облику имају примену код ширег спектра производа, укључујући: ракетна горива, превлаке млазних мотора, електроде за заваривање, катализаторе, пасте за лемљење, пигменте, боје, тонере штампача и адитиве за брашно.

Поступак производње директно утиче на својства праха и самим тим одређује његову погодност за конкретну примену. Од многобројних метода за добијање металних прахова најчешће се користе поступци атомизације растопа метала и редукције фино спрашених оксида метала. Електрохемијско таложење прахова метала са успехом конкурише осталим методама. У предности електрохемијског поступка убрајају се висока чистоћа производа, изузетна способност пресовања и синтеровања, као и могућност контроле својстава праха променом параметара електролизе. Главну препреку широј примени ове методе често представља висока цена процеса, па се тренутно овом методом комерцијално производе у значајнијем обиму само прахови гвожђа, бакра, сребра и никла.

Електрохемијско таложење прахова метала различитим режимима електролизе са посебним освртом на прахове Fe, Ni, и Co и њихових легура (феромагнетици), за које је познато да имају изузетно високу релативну магнетну пермеабилност, као и на прахове њихових легура са Mo (индуковани тип таложења прахова – неиспитиван до данас), је изузетно значајно, поготову када се зна да постоји директна зависност магнетних особина од величине честица. Осим тога, ови прахови представљају основу за активне бифункционалне катализаторе за издвајање кисеоника у киселим и његову редукцију у алкалним срединама, као и за издвајање водоника. Могућности примене ових прахова су велике и истраживања везана за њихову производњу су од великог значаја за нови научни допринос овој проблематици.

По дефиницији прах представља фино уситњену чврсту супстанцу састављену од честица мањих од 1 mm [1].

Карактеризација прахова обухвата:

- а) анализу праха у целини и
- б) анализу појединачних честица праха [1, 2].

Понашање прахова описује се помоћу низа специфичних својстава као што су течљивост, густина, специфична површина, порозност итд. У литератури се наводе чак 22 својства праха [1,3]. Својства праха као целине зависе од својстава појединачних честица. У главне карактеристике честица праха спадају величина, облик и хомогеност састава.

2. КАРАКТЕРИЗАЦИЈА МЕТАЛНИХ ПРАХОВА

Карактеризација праха врло је битан корак за све етапе технолошког процеса добијања готовог синтерованог производа. Омогућава оптимизацију појединих параметара који се односе на млевење, компактовање и синтеровање као и на састав и микроструктуру коначног производа.

Карактеризација праха се спроводи пре дефинисања параметара технолошког поступка добијања готовог синтерованог производа, а обухвата одређивање следећих својстава:

- ♦ Хемијска (састав, чистоћа)
- ♦ Физичка (облик и димензије честица)
- ♦ Металуршка (густина, брзина течења) [4]

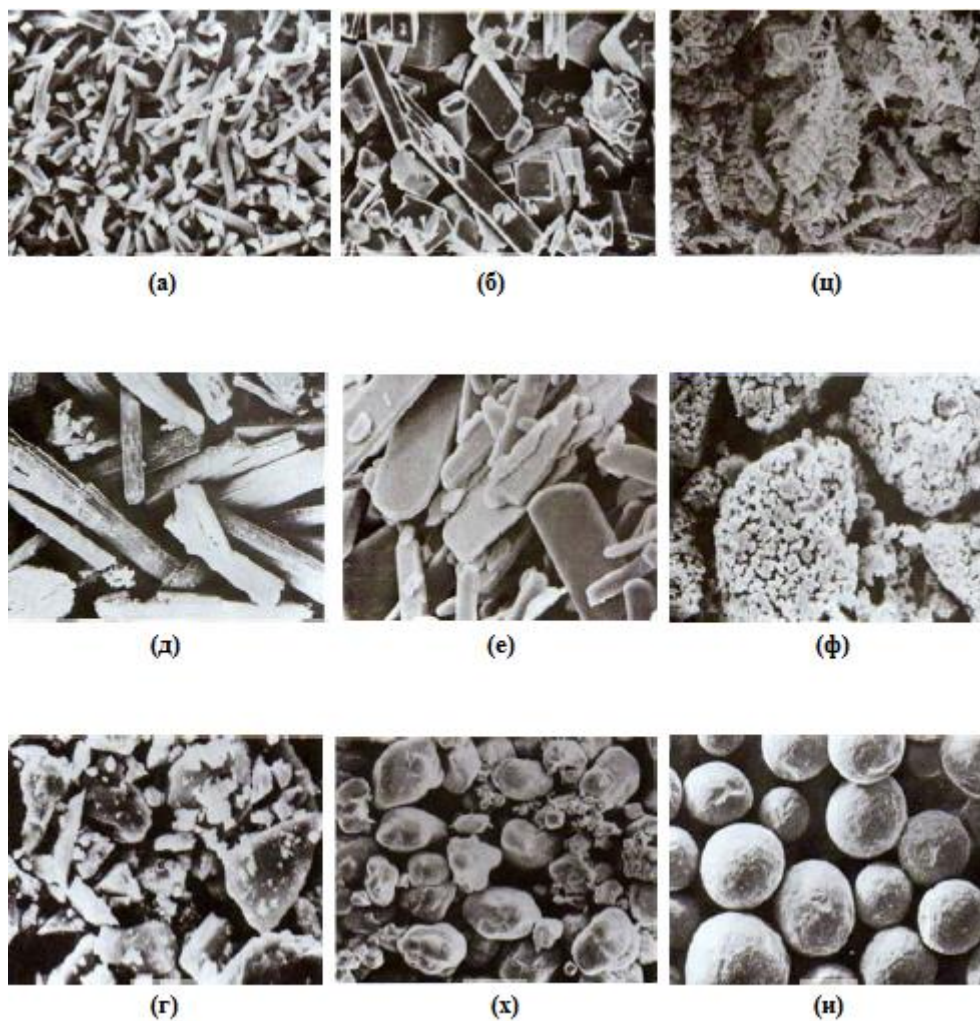
Успех било ког поступка металургије праха зависи искључиво од карактеризације и контроле металног праха.

За одређивање величине честица користи се већи број метода: микроскопска анализа, методе сепарације, методе седиментације, метода расипања светлости итд.

Нађена величина честица може да варира у зависности од технике мерења тако да употреба различитих техника понекад даје различите резултате. За микроскопску анализу карактеристика честица користе се: оптички микроскоп, скенирајући електронски микроскоп (*SEM*) и трансмисиони електронски микроскоп (*TEM*). Избор инструмента зависи пре свега од величине честица. За честице мање од 1 μm најчешће се користи *TEM*, док се за веће честице користе *SEM* и оптички микроскоп.

Осим тога, на основу облика честица праха могу се добити информације о одговарајућим параметрима процеса производње праха. Облик честица праха тешко је геометријски дефинисати [1] поготову у случају честица неправилног облика какав се најчешће добија електрохемијским путем. С тога се у пракси углавном прибегава квалитативном описивању морфологије честица праха. Облик честица варира у зависности од њихове величине и начина производње.

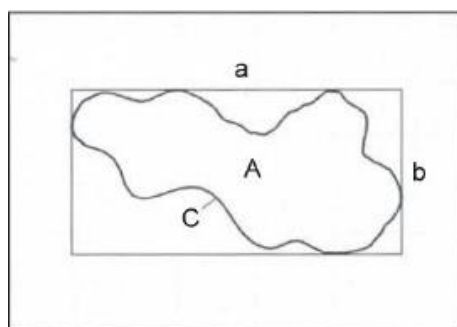
Према ISO-стандарду 3252 честице прахова метала и легура могу да имају један од следећих облика (слика 2.1): ацикуларни, ангуларни, дендритични, тракасти, плочасти, грануларни (сунђерасти), неправилни, нодуларни и сферни [5].



Слика 2.1. Различити облици честица прахова метала и легура по ISO-стандарду 3252:

(а) ацикуларни, (б) ангуларни, (ц) дендритични, (д) тракасти, (е) плочасти, (ф) грануларни (сунђерасти), (г) неправилни, (х) нодуларни, (и) сферни [5].

Величина честица прахова се одређује преко њених димензија, а зависи од технике мерења. Већина уређаја за одређивање величине честица користи геометријске параметре усвајајући сферни или правоугли облик честице.(слика 2.2.) [2,7].



Слика 2.2. Најмањи могући правоугаоник нацртан око честице

При анализи величине честице користе се геометријске вредности као што су: површина, пројектована површина, максимална димензија, минимална површина попречног пресека, запремина. Што је сложенији облик честице, број могућих мерења димензија расте.

Код сложеног облика честице (слика 2.2.) за одређивање величине могу се искористити карактеристике честице преко величина x , y и z (таблица 2.1, слика 2.3.).

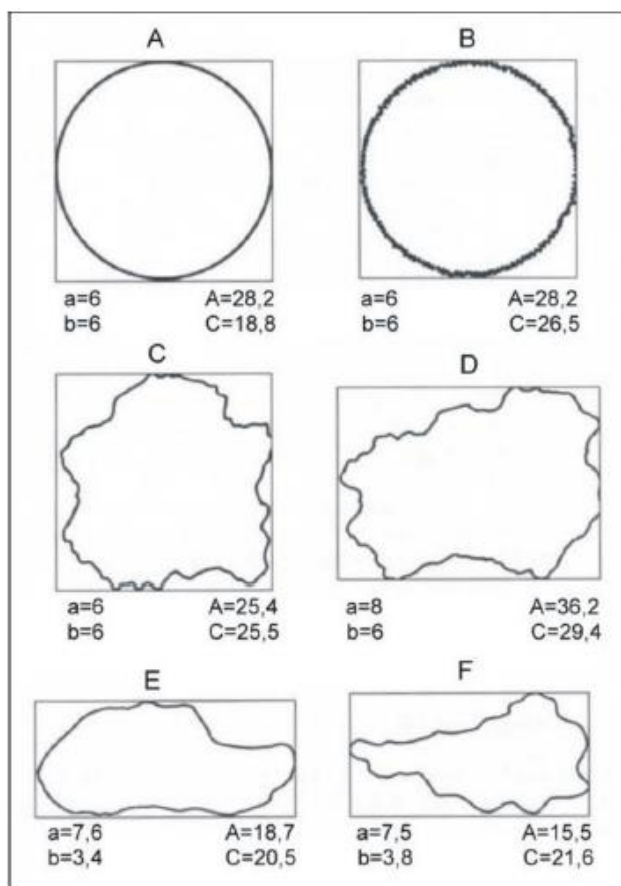
$$\text{Фактор издужења} \quad x = \frac{a}{b} \quad (2.1)$$

$$\text{Фактор испуњености простора} \quad y = \frac{A}{ab} \quad (2.2)$$

$$\text{Фактор површине} \quad z = \frac{C^2}{12,6A} \quad (2.3)$$

Табела 2.1 Релативне димензије и фактори честица различитог облика [2]

ОБЛИК	РЕЛАТИВНЕ ДИМЕНЗИЈЕ				ФАКТОРИ		
	a	b	A	C	x	y	z
A	6,0	6,0	28,2	18,8	1,00	0,78	1,00
B	6,0	6,0	28,2	26,5	1,00	0,78	1,79
C	6,0	6,0	25,4	25,5	1,00	0,71	2,04
D	8,0	6,0	36,2	29,4	1,34	0,76	1,89
E	7,6	3,4	18,7	20,5	2,23	0,72	1,77
F	7,5	3,8	15,5	21,6	1,97	0,54	2,20



Слика 2.3. Одређивање величина честица различитог облика [2]

2.1. НАЧИНИ ДОБИЈАЊА МЕТАЛНИХ ПРАХОВА

У зависности од облика и намене производа полазни прашови морају да задовоље различите захтеве. При томе се имају у виду њихова физичка (облик и грануло метријски састав честица праха, стање површине), хемијска (садржај основног метала и примеса, загађеност гасовима у хемијски везаном, асорбованом или раствореном стању) и технолошка својства (густина, течљивост, способност пресовања и др.) [1, 3, 6].

Разноврсност захтева који се постављају у односу на област њихове примене објашњава постојање различитих метода производње прахова. Требало би истаћи да избор методе добијања праха значајно утиче на физичка, хемијска и технолошка својства праха. Тако, на пример, прашови који имају исти хемијски састав, али различите физичке карактеристике, имају различита технолошка својства, што захтева различите услове при изради жељених производа. Са друге стране, конкретан поступак је одређен како степеном чистоће и могућношћу добијања праха са потребним физичким, електричним или магнетним карактеристикама, тако и економским аспектом, односно ценом коштања праха и ценом његове даље прераде.

Узимајући све ово у обзир јасна је неопходност разраде већег броја поступака за производњу прахова метала, легура и једињења. Многе методе су већ нашле широку примену у индустрији (механичке, редукција из оксида и једињења, електролитичке и др.), а неке се налазе у фази лабораторијског и полуиндустријског развоја.

Данас се велика пажња поклања добијању прахова са честицама субмикронских димензија, који се користе за производњу синтерованих материјала, магнетних уређаја за меморисање података, катализатора и др. Производе се комбинацијом различитих

процеса у које су укључене и физичко-хемијске методе као што су испаравање и кондензација, односно таложење из гасне фазе. Насупрот процесима који су засновани на механичком уситњавању честица, ове методе омогућавају не само да се произведу прахови са контролисаном величином зрна, него и да се контролишу својства праха која су значајна за његову крајњу примену.

Постојеће методе добијања прахова могу се поделити у две основне групе:

- ❖ механичке и
- ❖ физичко-хемијске методе.

У **механичке методе** добијања прахова спадају: дробљење и млевење, атомизација растопа метала и легура, гранулација и обрада метала резањем. Као резултат примене механичких метода добијања прахова полазни материјал се дејством спољашњих сила уситњава без измене хемијског састава.

У **физичко-хемијске методе** добијања прахова спадају: редукција оксида или соли, електролиза водених раствора соли или растопа соли, дисоцијација карбонила, испаравање и кондензација, интеркристална корозија, електроерозија, редукција из раствора (цементација) и термодифузионо засићавање. При добијању прахова овим методама долази до физичко-хемијских промена полазног материјала. При томе се крајњи производ, по правилу, разликује од полазног материјала по хемијском саставу. Прецизнија подела метода добијања прахова је [1, 2, 6]:

1. Механичко дробљење и млевење метала

- а) без фазне промене;
- б) са фазном променом.

2. Атомизација (распршивање течних метала)

- а) Атомизација ваздухом и водом под притиском;
- б) Атомизација инертним гасом;
- ц) Центрифугална атомизација.

3. Хемијске методе

- а) Редукција оксида метала;
- б) Метода реакционе синтезе;
- ц) Метода хидрирања и дехидрирања;
- д) Метода испаравања и кондензације.

4. Електрохемијско таложење

- а) Из раствора соли;
- б) Из растопа соли.

3. ТЕХНОЛОГИЈЕ БРИЗГАЊА ПРАХОВА – *PIM* ТЕХНОЛОГИЈЕ

Технологија ињекционог пресовања прахова (скраћено *PIM*) омогућава великосеријску производњу потпуно металних или керамичких делова сложене геометрије полазећи од материјала, који нису у потпуности метални или керамички, већ углавном пластични.

Описане су четири фазе *PIM* технологије :

- ❖ мешавање полазног материјала,
- ❖ ињекционо пресовање материјала пластично везиво/метални прах,
- ❖ уклањање везивне компоненте и
- ❖ синтеровање

полазећи од материјала који се састоји од пластичног везива и металних прахова. Изабран је полазни материјал полиацетално везиво/прахови ниско легираног челика и технологијом ињекционог пресовања урађен је отпресак тзв. „зелени комад“ (прецизније речено испитна епрувета према стандарду ASTM E8/E8M-11), по први пут у Србији. Испитане су карактеристике полазног материјала (густина, семи-квантитативна анализа, визуелни изглед) и особине „зеленог комада“ (маса, густина, семи-квантитативна анализа, визуелни изглед). Закључено је да су добијени задовољавајући резултати. [8]

Ова атрактивна технологија настала је комбинацијом класичног бризгања и металургије праха. Подразумева бризгање праха композита са растопљеним везивом. Током последње деценије *PIM* технологија (*Power Injection Moulding*) 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 % ;
- ❖ 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 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 ограничења која има прецизно ливење и прецизно ковање.

Бризгање (ливење) праха под притиском је јефтин процес производње делова веома сложене геометрије од различитих материјала. *PIM* нуди значајне уштеде, повећану флексибилност дизајна и материјала, повећану могућност минијатуризације, висока механичка својства, добру завршну обраду и високу брзине продукције.

Бризгање праха је веома продуктивна технологија и нашироко се користи код технологији обликовања делова од пластичних маса. Бризгање металних или керамичких прахова је настало развојем бризгања полимерних материјал.



Слика 3. Поступак бризгања прахова [8]

3.1. Процес бризгања (ливења) праха под притиском

Бризгање праха комбинује квалитете пластичног обликовања убризгавањем, као што су комплексност облика и високу продуктивност и специфичне особине металних и керамичких прахова.

Основа процеса је коришћење полуврсте смеше, направљене од финог праха и полимерног везива, и попуњавања калупне шупљине убризгавањем. Полимери се затим екстрахују и порозна структура лабаво пакованог праха се синтерује у чврсто стање кога карактерише густ материјал. Постоје четири основна корака у процесу *PIM*.

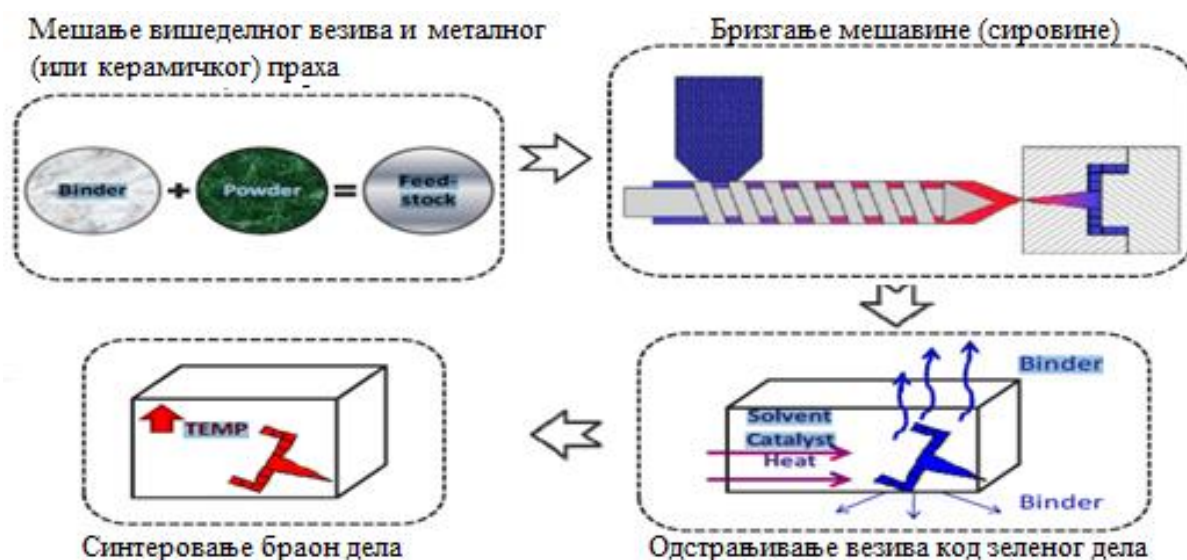


Слика 3.1. Ланац *PIM* процеса [9]

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

- припрема сировина;
- бризгање;
- одстрањивање везива;
- синтеровање.

На слици 3.2. илустроване су главне фазе *PIM* методе:



Слика 3.2. Главне фазе *PIM* методе [10]

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 пелетизира 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 убризгање је углавном идентичан конвенционалном убризгавању пластике. Ипак, неке промене на машини 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 бризгања ослањајући се на флексибилност укључивања сложености у алату. Бризгани део се зове "зелени 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 испарења унутар језгра. Три главне методе могу бити примењене у зависности од састава везива: топлотна, метода растварања и каталитичка.

У **топлотној методи**, везиво се уклања деградацијом или екстракцијом течности, на температурама у опсегу од 60 до 600° C.

Релативно дуго време обраде топлотном методом, је значајно редукована 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 сировине киселим испаравањем, што доводи до много бржег уклањања везива у односу на термичку или методу растварача. У свим поступцима уклањања везива, језгро бризганог дела често остаје да преноси снагу и облик који се задржава до почетка синтеровања. Овај преостали део полимера термички је уклоњен између 200° С и 600° С у корацима пре синтеровања.

Синтерирање 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.

4. MIM ТЕХНОЛОГИЈА

Бризгање металног праха (*MIM - Metal Injection Molding*) 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.

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

Бризгање металног праха може се опистаи сликовитом шемом.



Слика 4. *MIM* поступак [11]

Опште карактеристике *MIM* 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 калуп

Процес убризгавања метала комбинује дизајнерску флексибилност ливења од пластике са снагом и интегритетом кованих метала како би понудио економична решења за изузетно сложене геометрије делова.

Процес металног ињекционог ливења обично се објашњава као четири јединствена корака обраде (саливање, ливење, одвајање везивања и синтеровање) да би се добио завршни део.

4.1. Састављање / сировина

Процес металног убризгавања метала (*МИМ*) почиње са поступком састављања или припреме сировине. Фини метални прах величине честица мањих од 20 μ помешан је са термопластичним и воском везивима у прецизним количинама. Однос метала у праху према везиву је приближно 60:40 запремински. Смеса се стави у посебну опрему за мешање и загрева на температуру која узрокује топљење везива. Маса се механички меша све док честице металног праха нису једнолико премазане везивима. Маса се хлади, а затим гранулира у слободно проточне пелете (сировине) које ће прихватити машина за бризгање метала. [12]



Слика 4.1. Састављање сировине [12]

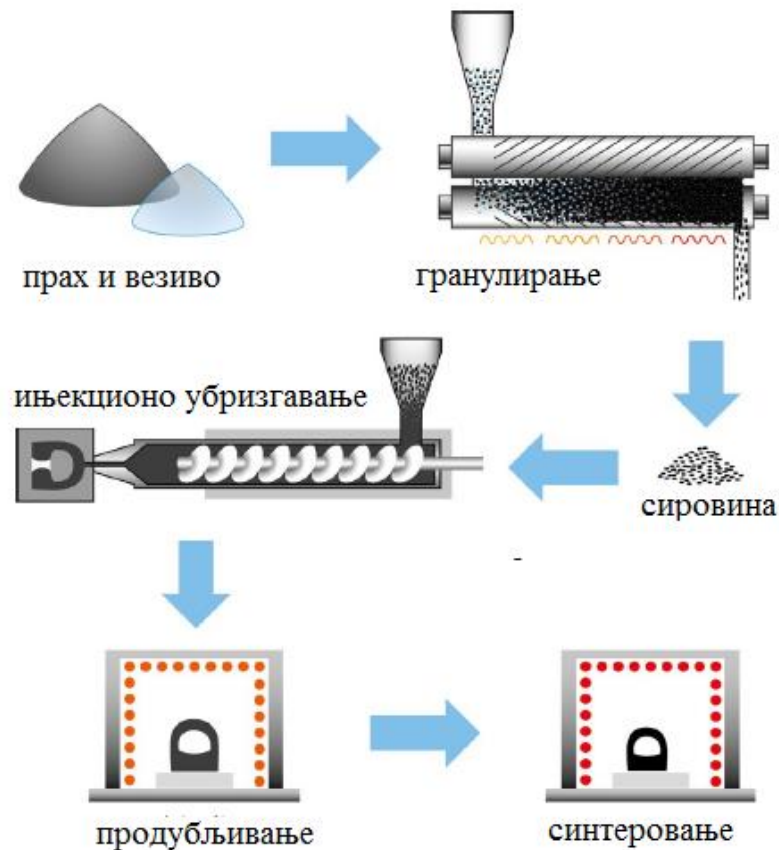
4.2. Бризгање

Бризгање металног праха (*МИМ*) је традиционални поступак металургије праха (*ПМ*) . Стандардни поступак *ПМ* је компактовање смеше праха у крутом калупу под једноосним притиском, где се избацује компакт из матрице и синтерује га. Постоји једно значајно ограничење у погледу могућности облика. Након збијања у матрицу део мора бити избачен, тј. избачен из шупљине матрице, тако да делови са избочинама не могу се правити директно. Ово ограничење се може знатно превазићи коришћењем процеса бризгања метала.

Калупљење под притиском

Једна важна карактеристика сложених делова је да су релативно јефтини. Међутим, ови термопластични материјали не могу се користити због њихових неадекватних механичких својстава. Они су релативно мекани, имају ограничену чврстоћу и не трпе повишене температуре. Могућа су одређена побољшања механичких перформанси употребом чврстих пунила - керамичких или металних прахова - али прави узмак догодио се када се утврдило да је то могуће да се у њега угради мешавина

металног праха где се добија метални или керамички део. Потребно је пажљиво уклањање пластичног костура од метала или керамике који је крх. Након синтеровања достижу се одговарајућа механичка својства. Слика 4.1.1 приказује основне кораке убризавања метала.



Слика 4.1.1 Основни кораци убризавања метала [24]

Ињекцијско бризгање је идентично у опреми и техници као и пластично убризавање. Пелетизована сировина се доводи у машину за бризгање где се загрева и убризава у шупљину калупа под високим притиском. Обликовани део (сада назван „зелени део“) се оставља да се охлади, а затим избаци из калупа како би се поступак могао поновити. Будући да се само везиво топи (ради ношења металних прахова), цео процес се одвија на око 200°C . Алат може бити са више шупљина за високе производне стопе. Шупљина калупа је приближно 20% већа да надокнади скупљање које се дешава током синтеровања. Промена скупљања је тачно позната за сваки материјал. [12]

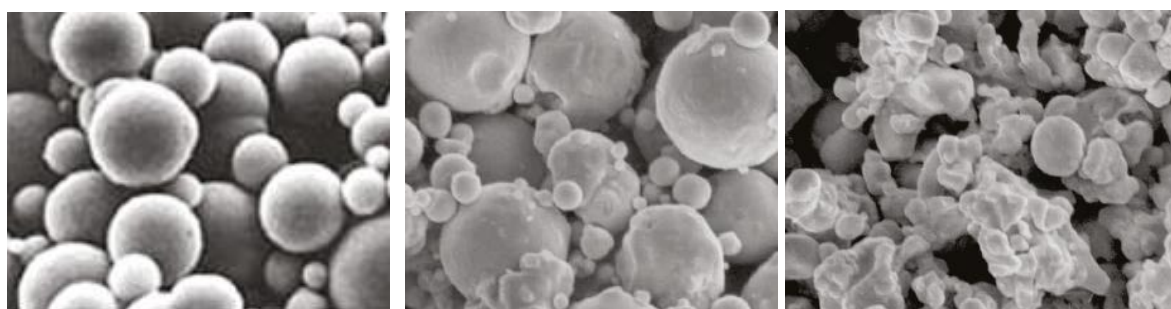


Слика 4.2. Бризгање [12]

4.3. Сировине које се користе у МИМ поступку

Готово сваки метал који се може произвести у одговарајућем облику праха може да се обради у МИМ-у. Главни изузеци су алуминијум и магнезијум; лепљиви оксидни филм присутан на овршина праха ових метала спречава синтеровање. Списак метала који су коришћени у бризгање метала се непрестано шири и укључује:

Нерђајући челици	Ватростални метали и тврди метали
Нисколегирани челици	Легуре бакра
Челици за алате	Титан
Легуре кобалта	Магнетне легуре



Слика 4.3 Гвожђе и челик у праху који се користе у МИМ-у
 а) Карбонил гвожђе у праху б) Гасни атомизовани прах од 17-4 PH
 ц) Вода атомизована у праху од 17-4 PH

4.4. Везива

Избор оптималног везива је пресудан за успешну производњу ињекцијски пресованих компонената. Донекле тачни састави и поступци су и даље власничка тајна, међутим, везива су углавном смеше органска једињења, чији су главни састојци природни воскови или синтетички полимери. Могу се додати и друге супстанце модификовати својства. Табела у наставку приказује главне системе везива који се данас користе за МИМ.

Мешање се врши на повишеној температури тако да је везиво у течном стању; у овом стању мора „покиснути“ све честице праха производе хомогену мешавину без стварања било каквих накупина честица. Често се додају површински активне супстанце формулацији везива за поспешивање процеса влажења. Други захтев је да не сме бити хемијске реакције између везива и метала, додатно везиво не сме пропадати током процеса. Коначно, за економску разлога и да би се максимализовала употреба материјала, мора бити омогућена поновна употреба било којих лијака (клизача) и одбачених зелених делова у почетни корак гранулације. Следећи фактор од значајне важности је лакоћа уклањања везива од ливеног дела. Овај део процеса може потрајати и стога представља главни елемент једначина трошкова.

4.5. Мешање

Мешалице (као што су мешалице са двоструким конусом) широко се користе за суво мешање или мешање праха, од мале су користи за прерада МИМ сировине. Да би се добила хомогена сировина, мора се извршити акција смицања. Доступно је неколико различитих типова попут Z ножева и планетарних миксера. Када је потребна велика количина, да би се постигла потребна хомогеност сировине, двоструки екструдери се могу користити за коначну припрему сировине. Циљ је да се обезбеди да цела површина сваке честице буде пресвучена везивним средством. Понекад се прах претходно обрађује како би се олакшао и појачао контакт између површине честица и везива. Као што је раније назначено, треба користити најмању могућу количину везива, међутим одговарајући запремински удео праха зависи од карактеристика праха. У индустријској пракси запремински удео праха варира од око 0,5 до 0,7. Уобичајено је да се мешавина праха и везива, такозвана сировина, претвара у чврсте пелете поступком гранулације. Ове пелет сировине се може чувати и према потреби уносити у машину за калупирање.



Слика 4.3.1 Атомизер за гас

4.6. Карактеризација МИМ сировина

Многи произвођачи МИМ делова купују готову сировину од специјализованих добављача. Стални квалитет сировине мора треба одржавати како би се осигурао квалитет завршетка производ, како у погледу својстава материјала тако и тачности димензија. Методе испитивања за карактеризацију сировине треба бити договорене између добављача и произвођача делова. Овде су предложене методе испитивања договорене Европске МИМ индустрије и често се користе због њихове једноставности и ниске цене. Требало би им дати предност где год је могуће.. Као што карактеризација сировина је још увек релативно младо подручје истраживања, нове и боље методе испитивања могу се развити у будућности.

4.7. Процес уклањања везива

"Зелени део" и даље садржи и оригинални метал и везиво материјала који је састављен од сировине. То је отприлике 20% већи него што ће завршен 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." [12]



Слика 4.3. Процес уклањања везива [12]

4.8. Процес синтеровања

Делови који се избацују постављају се на керамичке сетове који се убацују у пећ на синтерисање са високом температуром. Смеђи делови се полако загревају у заштитној атмосфери да би се избацили преостало везиво. Једном када се везива отклоне, метални део се загрева на високу температуру, при чему се празан простор између честица елиминише док се честице спајају. Део се изотропно смањује на своје димензије дизајна и претвара у густу чврсту супстанцу. Густина синтраног дела је обично већа од 97% од теоријске за већину материјала. Висока дебљина делова даје својствима производа слична кованим материјалима. [12]



Слика 4.4. Процес синтеровања [12]



Слика 4.4.1 Позиционирање делова је током синтеровања.

Поступци завршне обраде / обраде нису део процеса ливања металним убризгавањем. У зависности од крајњих захтева, на синтерованом делу се могу извести одређене дораде / обраде. Да би се побољшала физичка својства, термичка обрада се може обавити као и на било ком металу. Било која врста обраде може се извести ради постизања одступања од метала за убризгавање метала (MIM) прецизније од онога што процес може пружити. Премази и превлаке се могу лако нанети због велике густине

материјала. Много механичких техника склапања као што су заваривање или хладна обрада такође се могу успешно користити. [12]



Слика 4.5. Завршни процес [12]

5. CIM ТЕХНОЛОГИЈА

Инерционо бризгање керамичких прахова (CIM) 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, високих радних температура. Површина добијених компоненти најчешће захтева додатну обраду. На слици 1 је приказан редослед операција CIM технологије.

Процес се састоји од четири главна корака:

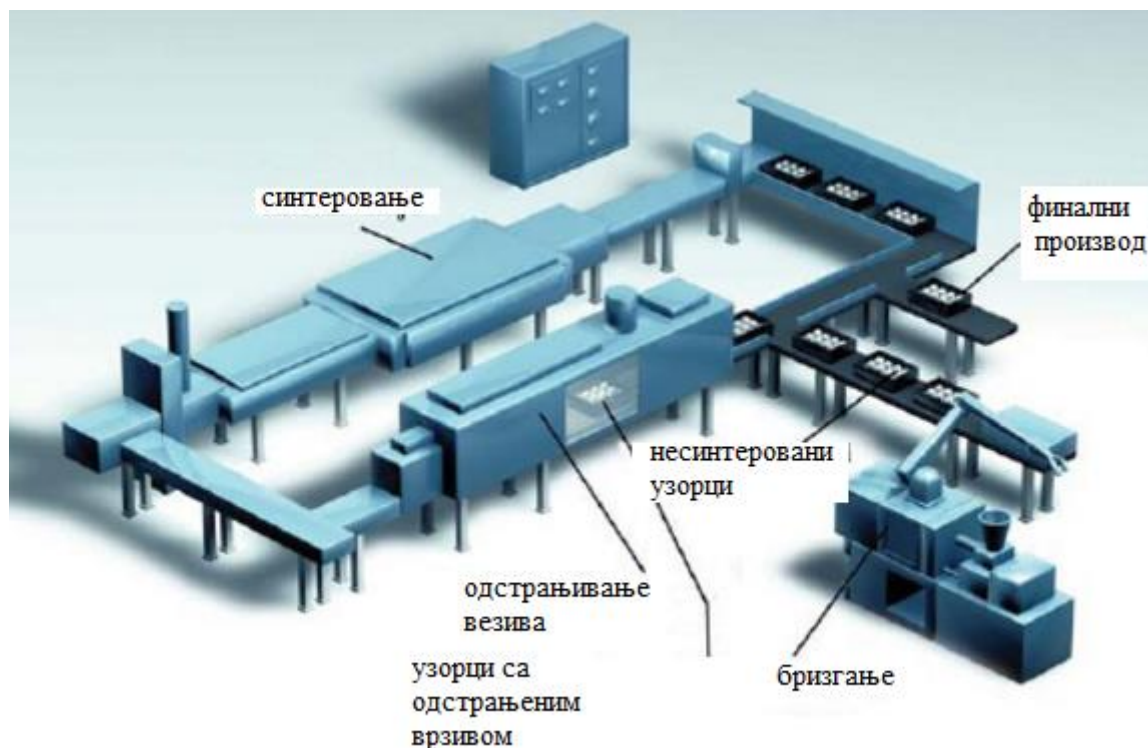
1. припрема гранулата
2. бризгање
3. одстрањивање везива и
4. синтеровање.

У фази припреме гранулата се полази од финих керамичких прахова који се мешају са термопластичним везивом формирајући хомогени гранулат.



Слика 5. Редослед операција CIM технологије

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 се потом синтерује. Синтеровани узорак је могуће додатно топлотно или механички површински дорадити али то најчешће није неопходно. Површина узорака се може обрадити пескирањем, полирањем или брушењем уколико је то неопходно. На слици 5.1 је приказан пример аутоматизоване линије за инерционо бризгање керамичких прахова.



Слика 5.1. Аутоматизована линија за инерционио бризгање керамичких прахова

Комбиновањем керамичких материјала и технологије ињекционог бризгања остварују:

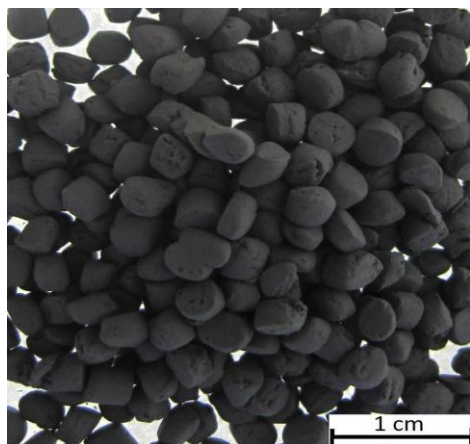
- веома комплексне геометрије малих димензија које се не могу реализовати другим производним техникама,
- велике чврстоће компоненти,
- супериорна отпорност на корозију,
- комплексне геометрије без додатне обраде,
- одлична површинска обрада,
- укупно смањење димензија и тежина компоненте,
- могућност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

CIM тржиштем углавном доминирају производи од глинице, цирконијума и силицијума или алуминијум нитрид прашкова, типичне компоненте произведене *PIM*, *MIM* или *CIM* 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.

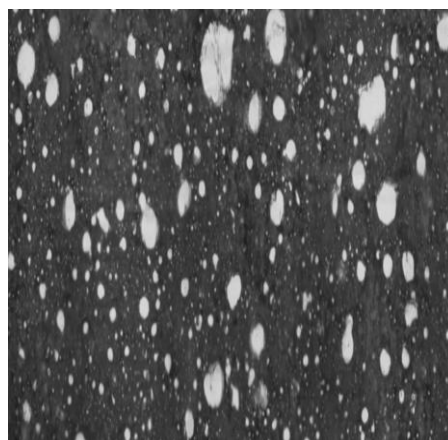
6. КАРАКТЕРИСТИКЕ ПРАХА ЗА *PIM* И *MIM* ТЕХНОЛОГИЈЕ

6.1. Припрема сировина

Први корак у процесу бризгања праха је припрема сировина. Прах и везиво се топло мешају изнад тачке топљења везива да би се омогућило равномерно облагање по површини праха (слика 6.а.). Сировина се припрема мешањем полимерних везива са финим металним или керамичким прахом. Комерцијално доступна сировина се обично испоручује у облику пелета (слика 6.б.), тако да је лако за руковање пре и у току бризгања.



(a)



(б)

Слика 6.(а) Микрографија сировина показује металне честице окружене полимерним везивом, 5.(б) (Pellets of commercially available feedstock material Catamold® by BASF.) [13]

Садржај праха се обично креће од 50 до 65% у обиму, мада постоје тврђења која говоре да се користи чак и више од 80%. Уколико се утврди да је садржај праха нижи од 50 %, способност синтеровања сировина 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 његова хомогеност. Хомогена дистрибуција прашкастих честица и везива у сировини је важна јер помаже да се минимизирају сегрегације током бризгања у калуп и касније да прибаве изотропна скупљања након везивања и синтеровања. Избегавање сегрегације код сировина је неопходна да би се спречили визуелни дефекти, претерана порозност, деформације и пукотине у синтерованом делу.

6.2. Основе металургије праха

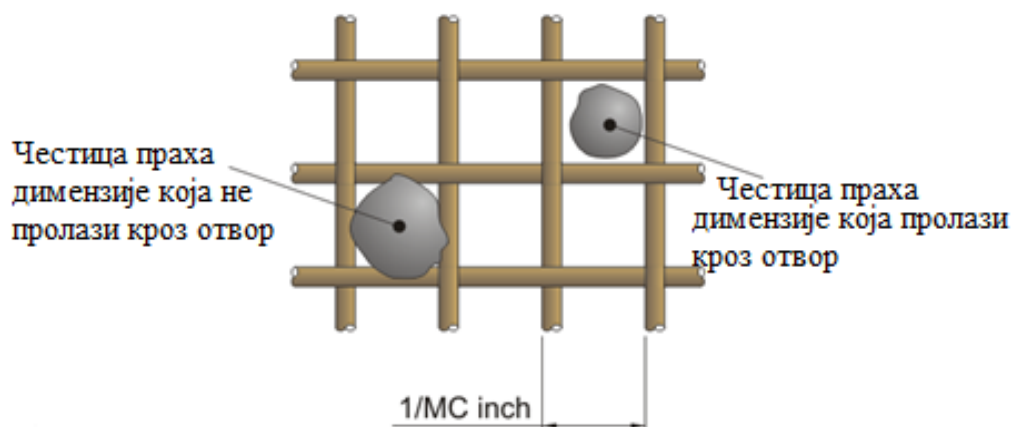
Прахови

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

- димензије и расподела честица,
- облилик и унутарња 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*“, *МС* (en. mesh count – број отвора) описује број отвора сита по инчу (1 инч = 25,4 мм). Према томе, са $МС = 100$ 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 *МС* то су ситнији отвори сита и кроз њих ће пропадати ситније честице. Производе се прашови димензија честица $10-6 \div 0,1$ мм.



Слика 6.1. Честице праха и сито за сортирање [3]

Особине металног праха, који је део сировине за МИМ производњу, одређују механичке особине финалног производа. Произведени део показује слична својства као и метал од ког се прави прах. У принципу, било који метални прах се може користити за МИМ производњу ако испуњава одређене критеријуме. Величина честица праха мора да буде мала, да се добро меша са полимерима, да има одређену густину након синтеровања и да не омета процес уклањања везива након синтеровања. На пример, магнезијум и алуминијум имају ниску температуру топљења и јако се оксидишу током синтеровања. Најчешће се користе легуре од нерђајућег челика, алатног челика, бакра, цементних карбида, титана и других ватросталних метала [1, 6].

Карактеристике металног праха се обично приказују описивањем појединачних честица. Карактеристике праха се могу ограничити на неколико главних карактеристика [1, 6]:

- Величина честица,
- Расподела величина честица,
- Облик честица.

Збир ових особина резултира густином паковања. Густина паковања говори о томе колико чврсто се честице пакују када сачињавају целину. Коришћење праха са великом густином паковања је од суштинског значаја за процес МИМ-а.

Метални прах са високом густином паковања резултираће бољим синтеровањем са мање скупљања. Честице које се могу густо паковати такође имају бенефите због међусобног трења. Трење између честица праха помаже да се одржи бризгани облик након уклањања везива. Најчешће је метални прах од материјала као што су [4]:

- Легуре гвожђа,
- Челици (316L, 42 CrMo 4,...),
- Тврди метали (WC/Co) и
- Обојени метали (Ti, W).

Данас је велика пажња усмерена ка добијању прахова са честицама субмикронских величина, које су идеалне за производњу делова који се синтерују, затим уређаја за меморисање података итд. Они се производе комбинацијом различитих технологија, где су присутне и методе као што су испаравање и кондензација, односно таложење из гасовите фазе. За разлику од механичких поступака, ове методе омогућавају производњу прахова са контролисаном величином зрна и контролисаним својствима неопходним за његову коначну примену [2]. У табели 6.1. дате су карактеристике материјала од којих се праве МИМ прахови.

Табела 6.1. МИМ материјали и њихова својства [9]

Особине МИМ материјала		Густина (103 kg/cm ³)	Тврдоћа	Затезна чврстоћа (МПа)
Легуре гвожђа	ММ-2200 (синтеровано)	7.5	45-64HRB	310
	ММ-2700 (синтеровано)	7.6	70-90HRB	410
Нерђајући челик	ММ-316L (синтеровано)	7.75	110-160Hv1	498
	ММ-316 Duplex (синтеровано)	7.65	70-100HRB	732
	ММ-178-4 PH (синтеровано)	7.5	20-25HRC	900
	ММ-178-4 PH (термичка о.)	7.5	35-40HRC	1160
	ММ-304 (синтеровано)	7.65	110-160 Hv1	480
	ММ-404 CL (синтеровано)	7.5	25-35HRC	-
Легуре волфрама	95%W-Ni-Fe (синтеровано)	18.1	30	960
	97%W-Ni-Fe (синтеровано)	18.5	33	940
	ММ-4605 (синтеровано)	7.5	70-HRB	700
	ММ-4605 (термичка о.)	7.5	45-50HRC	1610

Облици и грађа честица

Облици и грађа честица у великој мери зависе од технологије њихове производње



Слика 6.2. Честице праха [3]

Технолошка својства праха:

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

Расподела честица по величини

Прах који се користи за МИМ процесе садржи честице које нису исте величине. Ово варирање у величини честица може бити врло значајно. Величина честица се обележава ознакама D10, D50 и D90. За пример је узет метални прах одређене врсте. Ознака D10 има вредност величине честица 4,6 μm . Десет процената честица је величине мање од 4,6 μm . Ознака D50 описује средњу величину честица (табела 6.2) [1].

Табела 2. Расподела честица по величини за нерђајући челик [1]

Материјал	Састав	D10	D50	D90
Нерђајући челик	Fe/Cr/Ni/Mo	4.6	11	18
Нерђајући челик	Fe/Cr/Ni/Cu	4.8	20.7	50.9

Другим речима, 50% честица су испод величине 11 μm . Вредност D90 је величина која обухвата 90% честица, а то значи да је само 10% честица изнад ове величине [1].

Састав везива и карактеристике

Друга компонента за сировину је везиво. Иако је везиво једнократни елемент током процеса МИМ-а, његове карактеристике ће имати круцијални значај током целе производње. Везиво је састављено од најмање два различита материјала. Материјал који сачињава везиво утиче на тачку топљења везива и течење материјала. Према везиву се подешавају температура рада и проток бризгања. Везиво има мању вискозност од металног праха, па самим тим и већу брзину протицања кроз исте пресеке. За успешно обликовање материјал везива мора имати одређену вискозност да би попунио шупљине калупа без критичних подручја. Неке готове сировине садрже адитиве у везиву који помажу при обликовању и бризгању. Везиво се састоји од неколико врста материјала, који имају јединствену функцију. Обично се МИМ везиво састоји од три главне компоненте [1, 2]:

- Полимери,
- Пуниоци и
- Елементи који формирају заштитну опну.

Разлике у температури топљења између компонената главна је особина која омогућава селективно уклањање компоненти током МИМ процеса – примарно и секундарно уклањање. Воскови имају ниске температуре топљења ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), док полимери имају вишу температуру топљења ($> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$). То подразумева да је фаза уклањања воска прва током процеса уклањања везива. Услови при којима се уклања везиво не смеју бити такви да се модел деградира. Зато се одвијају постепено и зато се употребљавају различите компоненте. Процес уклањања полимера се одвија после уклањања воска, а непосредно пре синтеровања. Иако постоји бесконачан број пуниоца и полимера, само ограничен број истих је добра комбинација за материјал везива. Компоненте везива морају имати својства која су компатибилна једна са другима и која дају функционалну целину. Везива се морају добро мешати са металним прахом и водом. Приближавајући састав везива са практичне стране, најважнији критеријум за селекцију материјала се заснива на расположивим методама за уклањање и стварање прашкастог материјала са металом. Ако везива нису уклоњена пре синтеровања, тј. ако у металу постоји извесна количина везива, то може створити бројне проблеме у производњи, као што је присуство угљеника на местима где се везиво задржава. Такође, ако се везиво не уклони на време, може доћи до нарушавања облика дела и деградација током синтеровања [1].

Упоредо са развојем технологије МИМ бризгања, развијали су се различити материјали за везиво, праћењем недостатака у производњи и потрагом за бољим решењима. Одвајање везива је веома важан корак у производњи, па треба користити везива која се лако одвајају од метала. Постоји велики број различитих везива, самим тим и различити начини за издвајање везива. Први везивни материјали били су на бази воскова. Примарно везиво је било од воска и уља, а секундарно од полиолефина са додатком гумених материјала. Касније су се користили материјали као што је полиацетал са полиолефином [1]. Како се интересовање за лако растворљивим везивима повећавало, развијали су се материјали који су чак растопљиви у води. Одвајање везива од метала је процес који претходи синтеровању. Састоји се из две фазе:

- Примарно уклањање везива (*енгл. Primary debinding*) и
- Секундарно уклањање везива (*енгл. Secondary debinding*).

Примарно уклањање се односи на примарно везиво – восак, а секундарно уклањање на секундарно везиво – полимер. Циљ је да се везиво уклони без оштећења МИМ дела.

Примарно везиво се уклања растварачима, органским или воденим, као и каталитичком методом. Воскови и уља се растварају у великом броју растварача, у које се потапају МИМ делови. Када се изваде из посуде са растварачем, делови су порозни. Након тога се суше и припремају за синтеровање. Веома је битно да је везиво у потпуности одстрањено пре синтеровања из већ поменутих разлога, а један од начина провере је мерење тежине комада на сваких 30 min у току процеса уклањања. Када нема промене у тежини, то значи да је везиво уклоњено.

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 запреминска густина мања од стварне густине.

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

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

Према томе, фактор паковања је увек мањи од 1.

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, 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.
2. Смесе – за добијање специјалних легура, које је тешко добити на конвенционалне начине, мешају се честице више елементарних прахова. Пример су алатни челици.
3. Предлегирани прахови – састав честица праха одговара по саставу легури коју је тешко добити мешањем честица више елементарних прахова. Уобичајени су предлегирани прахови од:
 - нерђајућег челика,
 - одређене легуре бакра и
 - брзорезни алатни челици .

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.

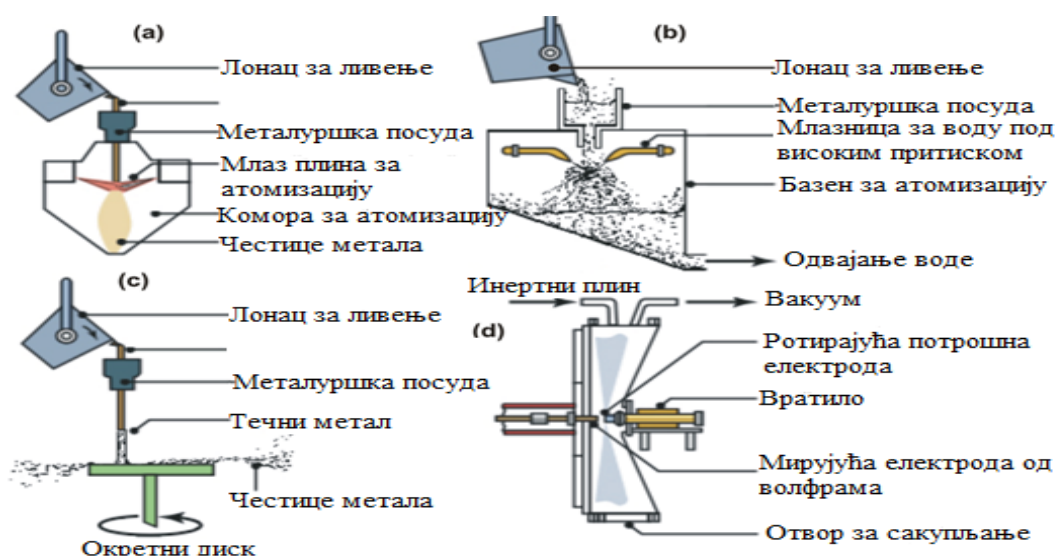
У производњи прахова користе су три основна поступка:

1. атомизација, (распршивање)
2. хемијски,
3. електролитички.

Поред тога, честице се уситњавају механичким поступцима.

Користе се четири поступка атомизације:

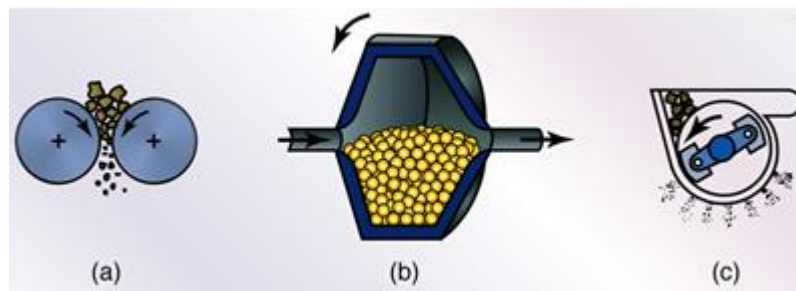
- а) плин
- б) вода
- с) центрифугална са ротирајућим диском
- д) ротирајућом потрошном електродом



Слика 6.2. Поступци атомизације [3]

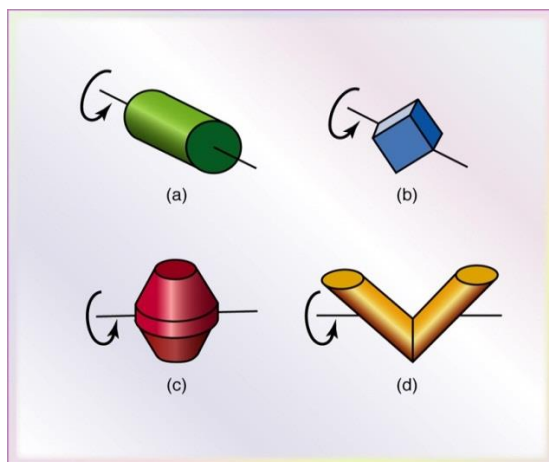
Поступци механичког мрвљења су приказани сликовитим шемама:

- а) међу обртним ваљцима,
- б) у млину са куглама,
- с) у млину са чекићима.



Слика 6.3. Механичко мрвљење праха [3]

Због јаког абразивног деловања прахова, за њихово се мешање не користе мешалице са ротирајућим пропелерима него само ротирајуће или претурајуће коморе. На слици 6.4. су приказани: (а) облици ротирајућих комора у којима се мешају прахови и (б) мешалица са куглама за припрему мешавине металних прахова.



Облици комора за мешање



Мешалица са куглама

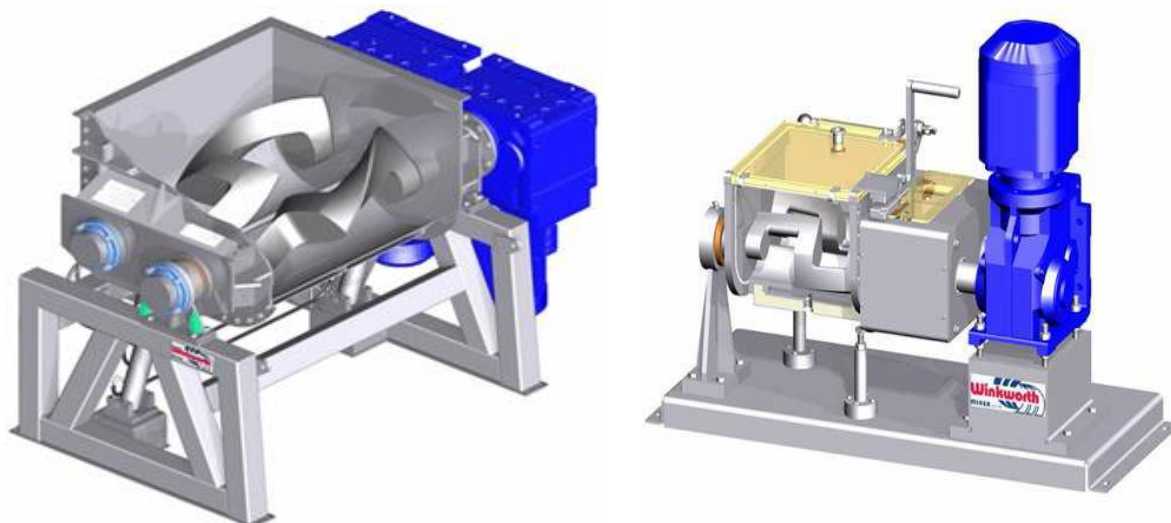
Слика 6.4. Опрема за мешање прахова [3]

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.

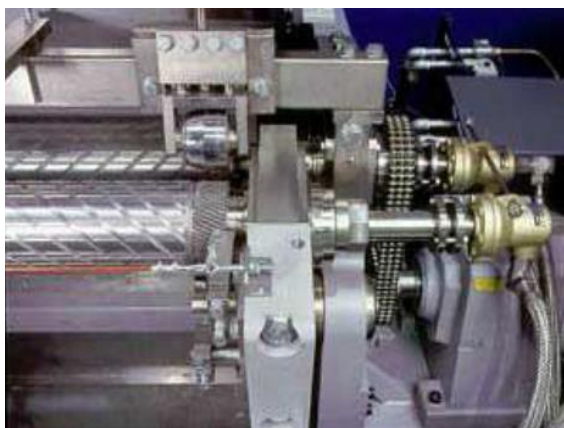
Четири различите врсте машина се обично користе:

- миксери са високим смицањем,
- ролна млинови,
- шраф екструдери и
- ролне за сецкање.

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 6.5.) чак и ако процес може да потраје неколико сати. У високом обиму производње дупли- шраф екструдери или ролне за сецкање (слика 6.6.) , се користе за припрему сировине.



Слика 6.5. Миксери са z-оштрицама за серијску производњу сировина [13]



Слика 6.6. Ролне за сецкање за континуирану производњу сировина [13]



Слика 6.2.1 Машина „ALLROUNDER“ која даје велику слободу у дизајнирању металних и керамичких делова



Слика 6.2 Продужена млазница која је најбоље решење при употреби скувих прашкастих материјала

6.3. Карактеристике идеалног *PIM* и *MIM* праха

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

Многи прашови 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 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. Дакле, стање је потребно у избору *PIM* праха.

MIM може обрађивати широку лезу материјала, укључујући легуре жељеза, супер легуре бакра никла и кобалта, легуре титанијума, ватросталне материјале, цементиране карбиде, техничку керамику и композите металних матрикса. Док су легуре обојених метала као што су алуминијум и бакарне легуре технички могуће, али економичније се обрађују другим средствима као што су ливење или обрада у калупу.

Металургија праха, (*PM* - ен. Powder Metallurgy) је технологија производње механичких конструкционих и других делова од металних прахова. При томе се одвијају два процеса:

1. компактовање – збијање металног праха у жељени облик и
2. синтеровање – повезивање честица праха у чврсту масу.

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

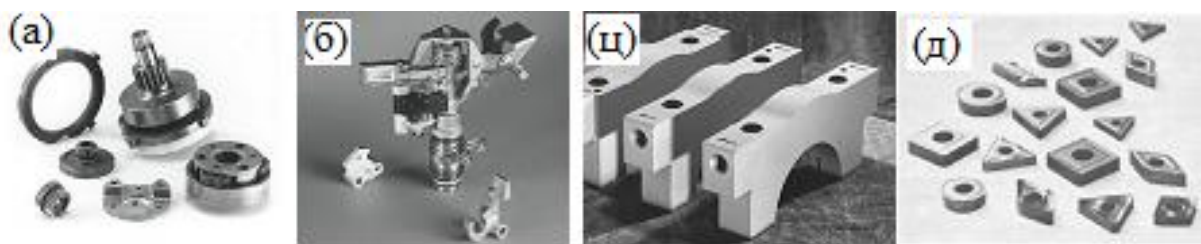
Основна су својства производа прашкасте металургије:

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

Према томе, поступци прашкасте металургије конкуришу традиционалним машинским поступцима: скидању струготине, прецизном ливењу, ковању у клупе.

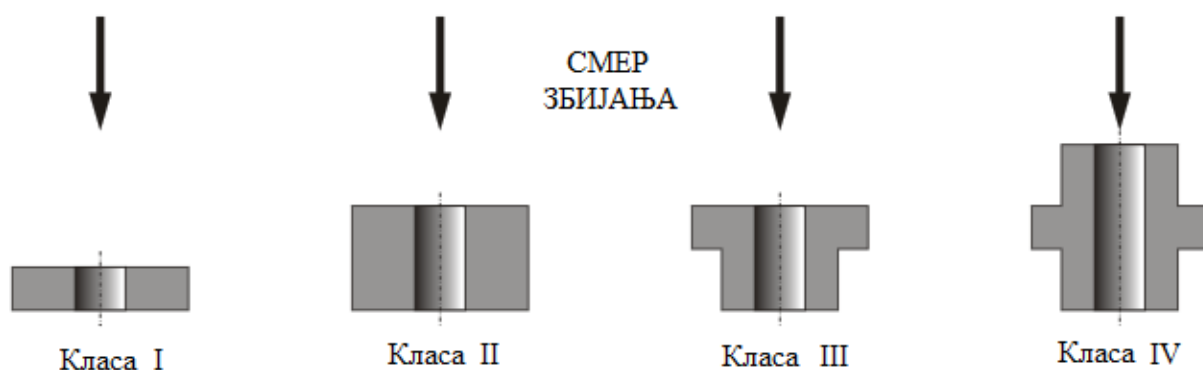
У *PM* се највише користе прахови жељеза, челици и алуминијум. Користе се прахови од бакра, легура бакра (бронзе) и супер легура (на бази никла и кобалта). Такође се користе ватроотпорни метали као што су молибден и волфрам. У материјале *PM* често се укључују и карбиди метала (волфрам карбид).

Типични су производи *PM*: зупчаници, ланчаници, лежајеви, електрични контакти и различити делови машина (Слика 6.7.). Због 2Д облика и потребе за подмазивањем, када се производе у великим количинама, зупчаници и лежајеви су идеални за *PM*.



Слика 6.7. Производи нетрадиционалне машинске технологије

Како би се указало на извесна ограничења облика који се могу изградити конвенционалним поступцима *PM*, Савез индустрије металургије праха (*MPIF* $\Leftarrow$ *Metal Powder Industries Federation*) одредио је четири класе облика (Слика 6.8.)



. Слика 6.8. Четири класе облика (кружни попречни пресек)

Табела 6. Карактеристични примери PIM прахова

material	99,7 Al ₂ O ₃	designation	chemistry,%	fabrication	Ar	D10	D50	D90	Sw	ρ _A	ρ _T	ρ _O	α
aluminium nitride	Alcoa	A-16SG	99,7 Al ₂ O ₃	calcined,milled	2,0	0,2	0,5	1,2	3,3	1,08	1,32	3,99	42
cemented carbide	Dow	XUS35548	94 AlN 6Y ₂ O ₃	reaction, milled	1,2	0,5	1,5	2,7	3,5	0,52	0,77	3,27	
cemented carbide	Teledyne	H-17	WC-10Co	milled	1,0	0,6	1,1	3,3	3,4	3,4	3,7	14,6	50
cemented carbide	Nanodyne	Nanocarb	WC-10Co	reacted, milled	1,0	9,1	14	22	6,7	3,3	3,8	8,8	55
copper	ACuPowder	635	99,5 Cu	water atomized	1,3	2,3	4,1	10	3,1	2,58	3,67	7,51	61
iron	ISP	1470R	98,3 Fe	carbonyl	1,2	2,6	4,7	11,2	4	2,65	4,3	7,63	58
iron-carbon	BASF	OM	Fe-0,9C	carbonyl	1,2	3,9	7,6	14,3	4,5	3,96	4,75	7,3	
iron-silicon	Osprey	MPFe3Si	Fe-3Si	gas atomized	1,1	4,4	13	26	3,3	1,22	2,04	10	34
molybdenum	Osram	390/100	Mo	reduced , milled	3,0	1,1	2,5	4,8	4	2,1	3,1	9,6	
molybdenum	Climax	12293	Mo	reduced , milled	1,3	4,4	7,6	13	5,4	3,6	4,6	8,86	48
nickel	Novamet	45P	99,8 Ni	carbonyl	1,2	7,7	14	25	4,9	3,11	3,77	7,2	55
nickel	Xform	XNAB04	Ni3Al	reaction	1,3	0,3	0,6	1,3	3,6	1,32		3,2	
silicon nitride	Starck	M11	Si3N4	reaction, milled	1,2	0,33	0,51	0,95	5,6	0,46	0,68	3,2	
stainless stell	Ultrafine	316L	Fe-Cr-Ni-Mo	gas atomized	1,0	4,6	11	18	4,3	3,9	4,9	8	40
stainless stell	Mitsubishi	17-4 PH	Fe-Cr-Ni-Cu	water atomized	1,1	4,8	20,7	50,9	3,8	3,3	4,4	7,9	
stainless stell	Ametek	17-4 PH	Fe-Cr-Ni-Cu	water atomized	1,5	6,3	18,7	42,5	3,1	3,03	4,43	7,37	50
stainless stell	Anval	17-4 PH	Fe-Cr-Ni-Cu	gas atomized	1,0	7	15	28	4,3	4,14	4,88	7,53	35
titanium	Crucible	Ti6-4	Ti-6Al-4V	reduced , milled	1,1	20	32	44	7,5	2,1	2,8	4,45	44
tool steel	Osprey	MPD2	Fe-12Cr-1,5C-1Mo	gas atomized	1,2	4,1	11,2	31,2	2,9		4,7	8	
tungsten	Osram	M37	99,5W	reduced , milled	1,3	0,98	3,04	21,7	1,9	2,96	4,76	19,1	50
zirconia	Electrofusion	Type C	YrO ₂ -3MgO	reaction	1,2	0,8	2,1	3,9	3,7		2,6	6,1	

Ar - aspect ratio, D10-particle size at 10% point on the cumulative particle size distribution, D50-median particle size, D90 -particle size at 90% point on the cumulative particle size distribution, Sw -particle size distribution slope, ρ_A -apparent density g/cm³, ρ_T -tap density, ρ_O - theoretical density on pycnometry, α - angle of repose

Табела 6. приказује карактеристичне примере прха који се користе у PIM технологији. Ту су дате хемијске карактеристике, облик, величина и густина. Ово су најчешће карактеристике праха које се користе у PIM процесу. Најчешће коришћени прах је 316L који се добија гасном или воденом атомизацијом. Честице праха приликом гасне атомизације су сферног облика, код водене атомизације честице су лигаментног облика. Код гасне атомизације праха, количина кисеоника је мања и приказује мању вискозност микстуре у обликовању. Ако узмемо у обзир масу код гасне атомизације праха је маља од 35 микрона.

7. МАШИНЕ ЗА ОБРАДУ *PIM* ТЕХНОЛОГИЈОМ

Опрема за *PIM* технологију садржи:

- млин за добијање праха,
- мешалицу за формирање праха са полимерним омотачем,
- опрема за бризгање,
- опрема за уклањање полимерне опне,
- постројења за синтеровање.

7.1. Опрема за бризгање

DXCJ120M3V Magnetic Field Injection Machine

DXCJ120M3V Машина за бризгање је велике брзине, за уштеду енергије модела са: 5 тачака пребацивања стезања механизма, силу стезања од 80 тона до 480 тона, запремина бризгања од 113 грама до 2152 грама. М3 серије *IMM* су опремљени са *CPC* или *MPC LCD* екран контролер на кинеском и енглеском језику.



Слика 7. DXCJ120M3V Машина за бризгање [14]

Табела 7. Карактеристике DXCJ120M3V машина 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

Слика 7.1. TY-350.2R.SF - Вертикална машина за бризгање [15]

Табела 7.1. Карактеристике TY-350.2R.SF вертикална машина за бризгање

МОДЕЛ		ЈЕДИНИЦЕ	TY-350.2R.SF
ХИДРАУЛИЧНИ ЕЛЕКТРИЧНИ СИСТЕМ	Пречник шрафа	mm	18
	Притисак за убризгавања	Kg/cm ²	3500
	Теоријски обим ударца	cm ³	29
	Стопа убризгавања	g/Oz	26/09
	Контрола температуре	cm ³ /s	62
	Сила стезања	Zone	6
	Димензије калупа	mm	415 x250
	Минимална висина алата	mm	200
	Сила избацивача	T	2.3
	Максимални хидраулични притисак	Kg/cm ²	140
	Излаз пумпе	L	240
	Снага пумпе мотора	Kw	15
	Снага грејања цеви	Kw	2,5
	Укупна снага	Kw	17,5

TY-200S Single skateboard injection molding machine

Слика 7.2. Скејтборд машина за бризгање [16]

Табела 7.2. Карактеристике Скејтборд машина 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 избацивача	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

Слика 7.3. Машина за бризгање ARBURG Allrounder 420 C (1000-350) [17]

Табела 7.3. Приказ основних карактеристика машине за бризгање ARBURG 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]	139/1827230 168

ALLROUNDER 470 C GOLDEN EDITION

Слика 7.4. Машина за бризгање ALLROUNDER 470 C GOLDEN EDITION [18]

Табела 7.4. Карактеристике Машина за бризгање ALLROUNDER 470 C GOLDEN EDITION

Стезне јединице са силом стецања 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

Табела 7.5. Карактеристике јединице за бризгање

Јединица за бризгање	400			800	
Пречник завртња [mm]	35	40	45	45 55	50
Ефективна дужина вијка [L/D]	23	20	18	22 18	20
Ход завртња [mm]	160			200	
Проток материјала [kg/h]	25	29	35	46 59	53
Притисак убризгавања [bar]	2500	2000	1580	2470 1650	2000
Проток убризгавања [cm³/s]	128	168	212	174 260	214
Кош за храну [l]	50			50	

7.2. Машина за формирање праха са полимерним омотачем

Solids/Liquid Injection Manifold (SLIM) Mixer



Слика 7.5. Мешалица за облагање праха полимером [18]

7.3. Опрема за добијање праха



Слика 7.6. Пећ за производњу прахова [19]



Слика 7.6.1. Машина за мешање праха модела „Ribbon Blender“ [16]

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



Слика 7.6.2. Машина за брызгање, модел „Bengbu Longhua 220t“ [18]

7.4. Опрема за уклањање полимерне опне



Слика 7.7. Пећ за одстрањивање везива [20]

7.5. Постројења за синтеровање



Слика 7.7.1 Машина за синтеровање модела „SM60“ [17]



Слика 7.8. Стандардна вакуумска пећ за синтеровање [21]

Табела 7.6. Карактеристике постројења 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

8. ПРИМЕРИ ПРИМЕНЕ РІМ ТЕХНОЛОГИЈЕ

8.1. 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* пружа велика улагања у област биоматеријала како би помогао компанијама да одговоре на нове технолошке изазове у медицинском сектору. Циљ нове платформе коју овде представљамо је унапређивање израде металних и керамичких медицинских имплантата применом технологије бризгања/синтеровања композита – праха са растопљеним везивом у биомедицинске сврхе. Интегрисана платформа за израду обезбеђена од стране *NIV-IIM* је намењена корисницима, дизајнерима и произвођачима биомедицинских делова, као и произвођачима металних и керамичких прахова, а и компанијама које припадају другим индустријским секторима.

Предности

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

- 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

Опрема коју поседује омогућава производњу и контролисање реологије и хомогености формулација које се производе и у мањим и у индустријским количинама.

Бризгање

Ињекционе пресе које нуди *NIV-IIM* 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 – 3cm могу се добити уз помоћ технологије микроињекционо бризгање прахова уз високу стопу производње. Да би подржао делатности технологије ињекционог бризгања прахова, *NIV-IIM* 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-IIM* помаже код оптимизације облика шупљина, пре него што се калуп формира.

Одстрањивање везива и синтеровање

У самом центру активности којима се бави *NIV-IIM*, 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 бризгања 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 бризгања 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.
- подржи дизајн и израде сложени имплантати и микро-имплантати, као и саставни делови хирушких инструмената, ортодомтских система, итд.
- израде керамички и метални делови са микроструктурним површинама како би се користили у микрофлуидне и биоинжењерске сврхе, итд.
- развојем дво-компонентног бризгања и композитних материјала, развију интеграционе компоненте високе функције.
- смање трошкови производње мањих и средњих количина металних и керамичких делова

Сарадња са индустријом

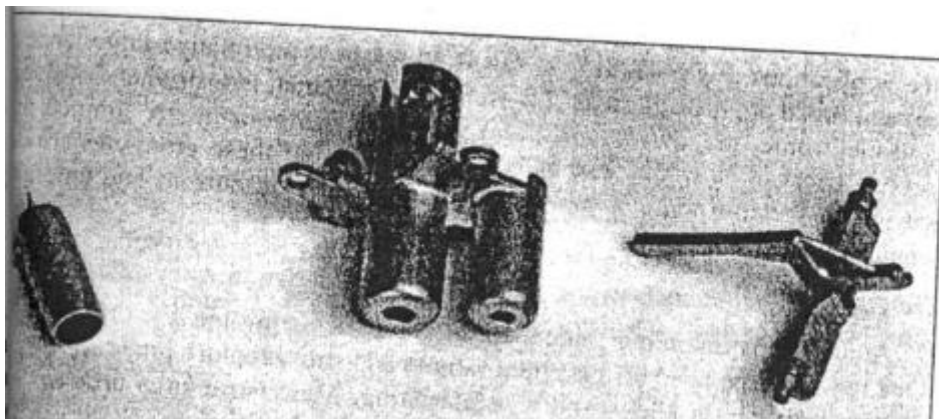
Преко пројекта Истраживање и развој и преконкурентских истраживачких пројеката, *NIV-IIM* сарађује са компанијама и користи трансфер напредних технологија како би им осигурао технолошку конкурентску предност.

8.2. Примери примене у аутомобилској индустрији

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 8 .



Слика 8. Аутомобилски сензори ваздушних јастука компоненти произведени *PIM* технологијом [23]

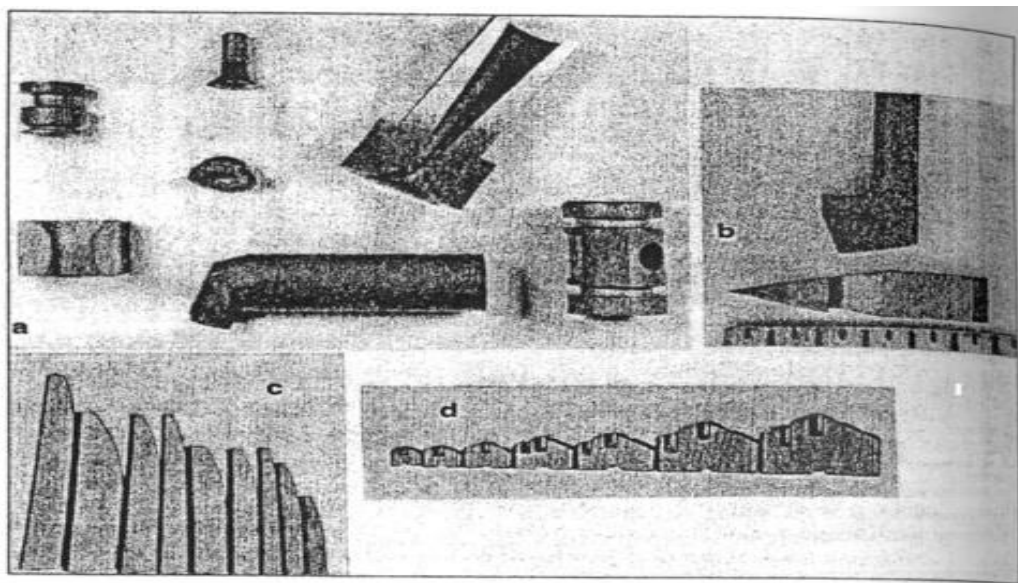
Приказане су компоненте које се користе при склапању сензора за активирање ваздушних јастука. Остале примене укључују турбокомпресоре, зупчанике за електрично подешавање седишта, механизме за мењање брзина, браве и сензоре кочионог система. Претходних неколико година, керамички турбокомпресори (на бази 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 уклањају везујућих адитива као и при синтеровању. 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.

8.3. Алати за сечење

Цементиран карбиди ($WC-Co$) обрађени путем *PIM*-а 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, педиљке, 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 8.1. 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 8.1. Облици формирани *PIM* технологијом:

- a) млазнице и водич компоненте;
- b) писар од 18 mm дужине;
- c) алати за сечу дрвета који су до 35mm дужине,
- d) зидарске бушилице ширине до 20mm [23]

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, цементиран 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.

8.4. Индустијска керамика

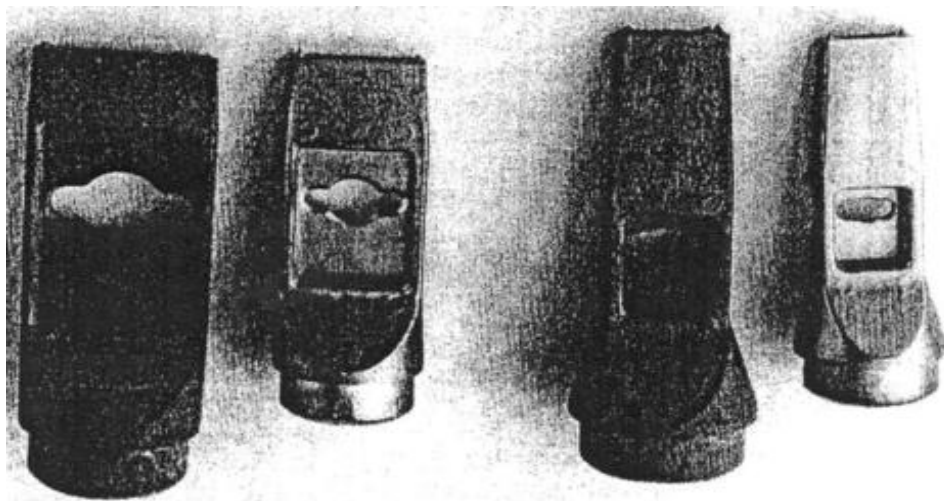
Једна од често потцењиваних области примене *PIM* је област индустијске керамике. Ту спадају компоненте које су у широкој употреби у вези са заваривањем, топљењем легура, топлотним баријерама, сензорима, термопаровима, постољима за печење керамике и електричним изолаторима. Делатност индустијске керамике 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.

8.5. 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 8.2., пре и после синтеровања.



Слика 8.2. Скупљање медицинских компоненти након синтеровања [23]

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.

9. ПРИМЕР ИСПИТИВАЊА УЗОРАКА ДОБИЈЕНИХ PIM 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.)

Табела 9. Испитивани узорци

	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 9.1.)

Табела 9.1. Хемијски састав испитиваних 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 9.,9.1.,9.2. су приказани уређаји, на којима се вршило испитивање датих узорака, у лабораторији фирме „СИНТЕР“.



Слика 9. Уређај за испитивање тврдоће



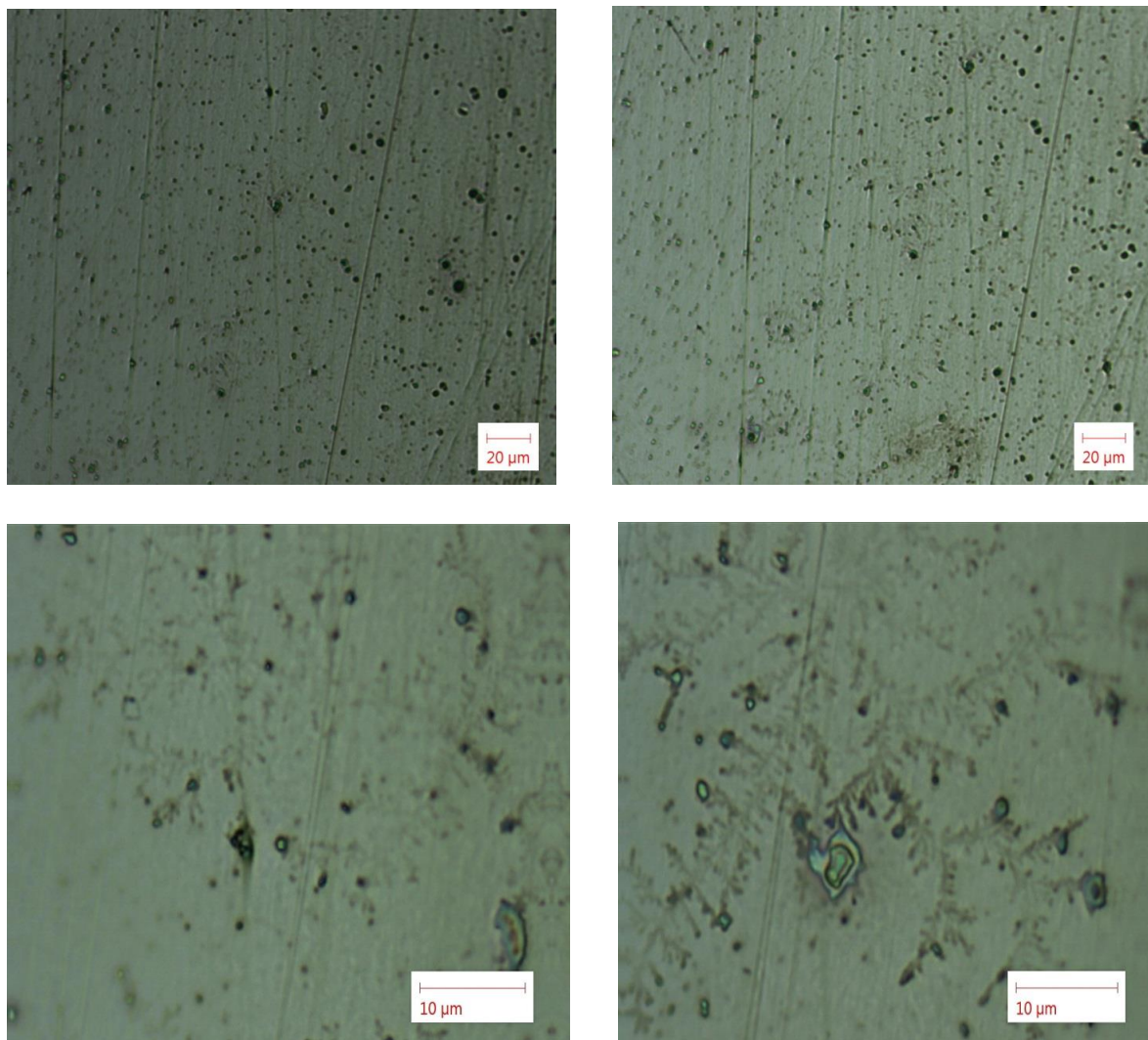
Слика 9.1. Уређај за одмашћивање узорака



Слика 9.2. Спектрометар за одређивање хемијског састава

На следећим сликама 9.3. су приказане полиране површине узорака, на којима се јасно уочава порозност, дендритна структура али није вршено разарање тако да се не може изводити коначни закључак о структури узорака.

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



Слика 9.3. Полиране површине узорака

10. ЗАКЉУЧАК

Садржај и карактеристике војног позива су у великој мери одређени врстама и карактеристикама средстава савремене ратне технике. Због свега тога улога војске у војно-техничким достигнућима је и у спознаји, разматрању, анализирању најновијих достигнућа светске науке на подручју војнотехничких и војноинформатичких наука, као и оснивање научних тимова ради даљег истраживања и развоја.

У раду су приказане неке од савремених експерименталних метода за анализу густине, порозности, тврдоће и хемијског састава и то Факултета инжењерских наука, у Крагујевцу у сарадњи са фирмом „СИНТЕР“ из Ужица. Осим тога, утврђено је да је први узорак највеће густине и тврдоће од три испитивана узорка имао најмању порозност.(табела 9.)

Узорак 2 који је имао најмању густину и тврдоћу имао је највећу порозност.(табела 9.1.). Такође у раду су приказани и уређаји на којима су се вршила ова испитивање као што су : уређај за испитивање тврдоће , уређај за одмашћивање узорака и сектrometer за одређивање хемијског састава.(слика 9., 9.1., 9.2.).

Друга врста испитивања је рађена у сарадњи са Факултетом инжењерских наука, у Крагујевцу, у лабораторији за испитивања где је требало утврдити порозност и дендритну структуру материјала на полираним површинама узорака.Није могао да се изведе коначни закључак о коришћеним узорцима , јер није вршено разарање узорака.

Током последње деценије *PIM* технологија (бризгање композита - 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. За регион југоисточне Европе је од посебног интереса да усвоји ову технологију, а досадашње искуство и знање из сродних области омогућава релативно једноставно усвајање технологије инерционог бризгања керамичких прахова (*CIM*) које је нашло широку примену у електроници, авио-индустрији, аутомобилској индустрији, хемијској индустрији, медицини, војној индустрији 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.

Даљи напредак ове технологије се огледа у усвајању и развоју *Micro-- PIM* и *2C-Micro-PIM* технологија које представљају улазницу за тржиште микромашинства, микрофлуида, микросистемске технологије, медицинске технологије и биосензора.

11. ЛИТЕРАТУРА

- [1] R. M. German, Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industries Federation, 2nd Ed, Princeton, New Jersey (1994).
- [2] M. Mitkov, D. Božić, Z. Vujović, Metalurgija praha, Beograd (1998)
- [3] W. Schatt, K.-P. Wieters, *Powder Metallurgy – Processing and Materials*, European Metallurgy Association, Technical University Dresden, Germany (1997).
- [4] P.C. Angelo, R. Subramanian, *Powder Metallurgy : Science, technology and Applications*, PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2008.
- [5] W. J. Huppmann, K. Dalal, *Metallographic Atlas of Powder Metallurgy*, Verlag Schmid GmbH (1986).
- [6] M. M. Ristić, G. V. Samsonova, *Metalurgija praha*, Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu (1973).
- [7] H. Tummeler, R. Oberacker, *An Introduction to Powder Metallurgy*, The Institute of Materials, London, 1993.
- [8] J. Radulovic, *Powder Injection Moulding Technology: Properties, Possibilities and Starting Activities*, Scientific Technical Review, 2015, Vol.65, No.2, pp.20-28,
- [9] 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.
- [10] Joamin Gonzalez, Gustavo Beutke Stringari and Igor Emri: „Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts”, Center for Experimental Mechanics, University of Ljubljana, Slovenia.
- [11] Сколар Љ. *Металургија праха и синтер материјали – скрипта*, Металуршки факултет, Загреб, 2015. Metalurgija praha, skripta, 2008
- [12] Интернет адреса: http://www.flomet.com/capabilities_metal_injection.php, приступљено 12.8.2020.
- [13] Joamin Gonzalez, Gustavo Beutke Stringari and Igor Emri: „Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts”, Center for Experimental Mechanics, University of Ljubljana, Slovenia.
- [14] <http://www.magnetomachinery.com/magnet-field-injection-machine-1.htm>, приступљено 12.8.2020.
- [15] <http://injection-molding-machine.tayu.cn/Vertical-injection/260.html>, приступљено 12.8.2020.
- [16] <http://injection-molding-machine.tayu.cn/Vertical injection/131.html>, приступљено

12.8.2020.

[17] <https://www.uni-due.de/kkm/arburg.shtml>, приступљено 12.8.2020.

[18] http://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/Mediathek/Technische_Daten/ARBURG_ALLROUNDER_470C_GOLDEN_EDITION_TD_523679_en_GB.pdf, приступљено 12.8.2020.

[19] <http://www.pharmaceuticalonline.com/doc/charles-ross-announces-automated-powder-mixing-skid-system-0001>, приступљено 12.8.2020.

[20] http://www.flomet.com/capabilities_metal_injection.php, приступљено 12.8.2020.

[21] <http://dinagent.com/index.php/pei-za-posebne-namene/pei-za-sinterovanje-metal-a-i-keramike>, приступљено 12.8.2020.

[22] <http://www.ceramicindustry.com/articles/87509-batch-kilns-for-binder-removal>, приступљено 12.8.2020.

[23] Randall M.German, Animesh Bose: "Injection Molding of Metals and Ceramics, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 1997.

[24] <http://www.epma.com/mim>