



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Неконвенционални поступци обраде

Број индекса: 430/2018

Филип М. Савић

Карактеристике делова добијених технологијом бризгања прахова (MIM)

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Богдан Недић - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Мастер студије: **Машинско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Производно машинство**

Име и презиме: **Филип Савић**

Број индекса: **430/2018**

ПРИЈАВА МАСТЕР РАДА

Тема рада: **Карактеристике делова добијених технологијом бризгања прахова (МІМ)**

Задатак: У оквиру мастер рада кандидат треба да изврши прикупљање и систематизацију података о технологијама металургије праха, технологијама добијања делова бризгањем прахова (МІМ технологије) и машинама које се користе у овим технолошким линијама. Извршити анализу примене ове технологије израде делова за различите индустрије. У посебном делу рада потребно је извршити могућа испитивања узорака добијених овом технологијом.

Мастер рад треба да садржи следеће целине:

1. Уводна разматрања,
2. Примена и предности металургије праха,
3. Преглед поступака металургије праха,
4. Инјекционо бризгање метала – основне карактеристике и примена,
5. Опрема и алати. Параметри процеса,
6. Дефекти код МІМ делова,
7. Експериментално истраживање,
8. Закључак,
9. Литература.

Ментор:

Др Богдан Недић, редовни професор

Крагујевац, 11.03.2020.

Резиме

У оквиру рада описана је технологија израде делова бризгањем прахова, са посебним освртом на МИМ технологију. Овај поступак објашњен је кроз производне фазе као што су инјекционо бризгање, процес одстрањивања везива, синтеровање, параметре производног процеса, алате који се користе у производњи и материјале металног праха. Циљ овог мастер рада је упознавање са триболошким карактеристикама МИМ делова кроз експеримент, што доприноси даљем развоју ове технологије будућности.

Кључне речи: *МИМ технологија, одстрањивање везива, синтеровање, параметри, алати, материјали праха, триболошке карактеристике МИМ делова*

Summary

The paper describes the technology of producing parts by powder injection, with special reference to MIM technology. This process is explained through the production phases such as injection molding, debinding process, sintering, manufacturing process parameters, tools used in production and metal powder materials. The aim of this master thesis is to get acquainted with the tribological characteristics of MIM parts through experiment, which contributes to the further development of this technology of the future.

Key words: *MIM technology, debinding process, sintering, parameters, tools, powder materials, tribological properties of MIM parts*

Садржај

1. Уводна разматрања	1
2. Примена и предности металургије праха	2
3. Преглед поступака металургије праха	3
4. Инјекционо бризгање метала – основне карактеристике и примена.....	6
4.1 Метални прах и материјали.....	8
4.2 Величина и облик честица.....	10
4.3 Расподела честица по величини.....	11
4.4 Састав везива и карактеристике.....	11
4.5 Однос праха и везива	17
4.6 Синтеровање	18
5. Опрема и алати. Параметри процеса	21
5.1 Одстрањивање везива	31
5.2 Опрема за синтеровање	32
5.3 Параметри процеса.....	34
5.3.1 Запреминско скупљање.....	37
5.3.2 Фазе попуњавања калупа и деловања накнадног притиска	38
6. Дефекти код МИМ делова. Линеарно скупљање. Дилатационе промене након синтеровања	43
6.1 Линеарно скупљање и PVT ефекат.....	46
6.2 Карактеристике МИМ делова након синтеровања и дилатационе промене.....	50
7. Експериментално истраживање	54
7.1 Циљ истраживања и начин спровођења експеримента	54
7.2 Мерна опрема	54
7.2.1 Трибометар TR-95	54
7.2.2 Универзални мерни микроскоп UIM-21.....	57
7.2.3 Контактни пар	58
7.3 Резултати експеримента	60
8. Закључак	67
9. Литература	69

1. Уводна разматрања

Металургија праха (енгл. *Powder metallurgy* – *PM*) је појам који обухвата технологије за производњу делова од метала који је у облику праха. Може се дефинисати и као начин производње делова од метала, легура или керамике у облику ситних честица без накнадне обраде. Упоредо са развојем индустрије, 1930-их појавили су се нови материјали, који су створили потребу за новим начинима производње. Такође, потреба за бржим начином производње, са што мање производних операција и без накнадне обраде резултирала је истраживањем на пољу развоја металургије прахова. Тако је дошло до замене конвенционалних поступака производње делова неконвенционалним, па металургија прахова у све већој мери потискује прецизни лив. Бројне су предности инјекционог бризгања у односу на прецизни лив [1]:

- Производња танкозидних делова,
- Боља површинска обрада,
- Погоднија за производњу делова са отворима малог пречника,
- Мали захтеви завршне обраде,
- Бржа производња и нижа цена.

Веома велику улогу у процесу производње имају прахови који се користе за инјекционо бризгање, тј. материјал праха који одређује карактеристике будућег производа. Процес производње прахова за инјекционо бризгање је доста скуп, па је улагање у развој јефтинијих прахова од примарног значаја. Технологија којом се издваја везиво користи материјале који загађују околину, али постоје бројни начини за трансформацију оваквог начина производње у „зелену технологију“. Синтеровање је процес који има огроман значај за особине финалног производа и паковања металног праха, а изводи се у неколико фаза. Током синтеровања долази до линеарног скупљања и дилатационих промена. Правилно пројектовање калупа за инјекционо бризгање је могуће ако се узму у обзир запреминске промене комада, тј. скупљање након синтеровања. Правилним конструисањем алата и правилном употребом параметара процеса могу се избећи грешке које се могу јавити током производње, које су описане у тачки 6. Мала отпорност на динамичка оптерећења и велика запреминска скупљања и даље представљају кључни проблем код оваквих производа.

Испитивања карактеристика делова који се добијају овом технологијом омогућавају стално унапређивање квалитета и начина производње. У тачки 7. описан је експеримент где су вршена испитивања триболошких карактеристика делова добијених МИМ технологијом. Циљ овог истраживачког рада је упознавање са триболошким карактеристикама МИМ делова, што доприноси проширивању области примене и омогућава проналажење најбоље комбинације материјала.

2. Примена и предности металургије праха

Технологије за производњу делова металургијом праха су први пут кориштене 1920-их година, за потребе аутомобилске индустрије. Делови произведени овом технологијом и начин производње показали су боља својства од ливења, што је довело до улагања у даљи развој. Нарочито је на то утицала могућност аутоматизације производње делова сложене геометрије, што је немогуће постићи другим технологијама [2].

Делови који се добијају металургијом праха су малих димензија. Разлог томе је велико запреминско скупљање, које ограничава примену РМ технологије на производњу ситних делова. Тежина производа добијених овим поступцима обично је до 2,5 kg [1, 2].

Предности металургије праха су [2]:

- Постиже се уједначена ситнозрнаста микроструктура,
- Постижу се тачне димензије готових производа,
- Могућа је производња смеше метала и других материјала,
- Могућа је производња делова готовог облика без накнадне обраде,
- Могу се обликовати делови од метала које је немогуће обликовати другим поступцима,
- Могуће је произвести једноставне и сложене облике,
- Аутоматизацијом процеса могуће је постићи велику продуктивност,
- Велики је степен искоришћења материјала,
- Могуће је развити материјале нових микроструктура,
- Велика уштеда енергије и трошкова производње.

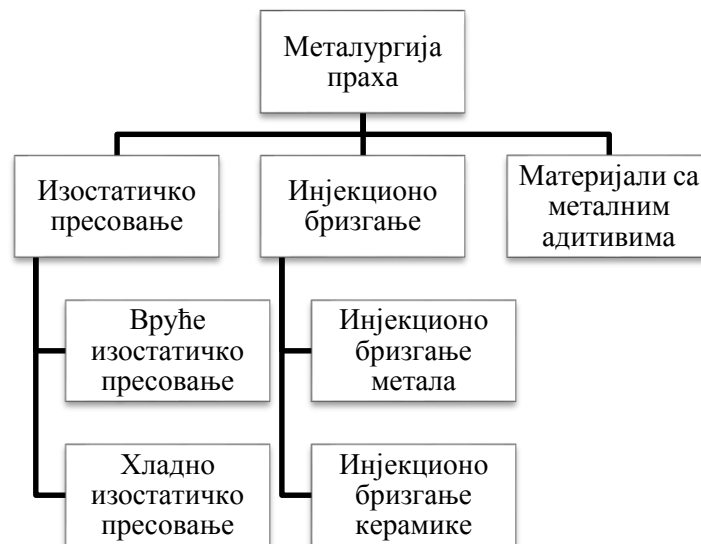
Како би се добиле горе наведене предности производа добијених металургијом праха, неопходно је прецизно дефинисати и употребити параметре процеса и алате који се користе у производњи. На пример, за ову технологију карактеристична су велика запреминска скупљања, која захтевају прецизност у димензијским толеранцијама калупа. Овакве производе карактерише велика порозност, па је од изузетног значаја процес термичке обраде. Такође, алати који се користе у РМ производњи морају бити отпорни на велике притиске, јер се деловањем притиска смањује порозност.

Велика порозност делова добијених металургијом праха није увек непожељна особина. Код делова који се користе као филтри управо је то примарни захтев. Поред тога, порозност смањује укупну тежину дела од којих се не захтева отпорност на ударну жилавост. Металургијом праха је могуће развити материјале нових структура комбинацијом честица праха најпогоднијих особина за конкретан производ. У већини случајева не постоји накнадна обрада, а процес је аутоматизован, па је од изузетне важности правилно извођење производног процеса у свим фазама.

Највећу примену делови произведени металургијом праха имају у аутомобилској индустрији, информатичкој, војној, спортској и ваздухопловној индустрији [2].

3. Преглед поступака металургије праха

Различити поступци производње развијени су на бази металургије праха, као што је изостатичко пресовање прахова, инјекционо бризгање прахова, као и нове технологије производње делова са металном матрицом (слика 3.1). Први производи добијени металургијом праха били су од керамике [2]. До данас је развијен велики број нових материјала са металним адитивима који су заступљени у свим гранама индустрије. Овим технологијама добијају се порозни делови малих димензија.



Слика 3.1 Технологије у металургији праха [2, 3]

Сви наведени РМ поступци имају исти редослед технолошких операција. Након што се изабере метални прах и везиво, први корак је мешање праха и везива, како би се смањило трење између металних честица у даљем обликовању. Металне честице сједињене са адитивима се загревају и транспортују до јединице за пресовање или калупа. Трећа производна операција је издвајање везива, што је пресудног значаја за даљи ток производње. Последњи корак у производњи је синтеровање. На слици 3.2 дати су кораци у производњи металургијом праха. Кроз цео производни циклус металне честице се не загревају изнад температуре топљења [2, 3, 4].



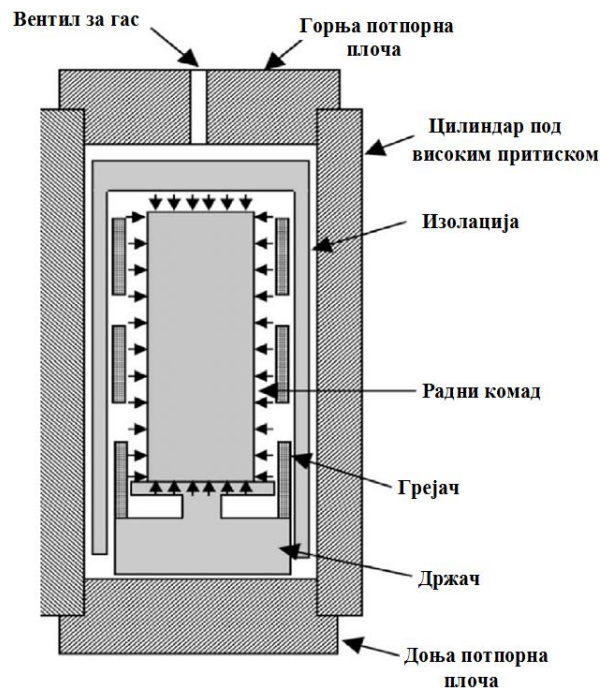
Слика 3.2 Шема производног процеса у металургији праха [2]

Изостатичко пресовање је поступак у металургији праха где се делови формирају дејством притиска чија је вредност иста у свим правцима на метални прах у калупу. На тај начин добијају се делови једнаке густине и микроструктуре у свим правцима. Производи добијени овом технологијом имају бројне предности у односу на оне који се добијају једноосним пресовањем. Изостатичко пресовање се може користити за смањивање порозности комада добијених металургијом праха [2, 3]. Постоје две врсте изостатичког пресовања [3]:

- Вруће изостатичко пресовање и
- Хладно изостатичко пресовање.

Хладно изостатичко пресовање (*енгл. Cold isostatic pressing – CIP*) је поступак где се великим притисцима делује на комад при на собној температури [2, 3].

Вруће изостатичко пресовање (*енгл. Hot isostatic pressing – HIP*) изводи се на исти начин као и CIP, а једина разлика је у томе што се дешава на повишеним температурама [2, 3]. При том долази до дифузије између материјала металног праха. На слици приказан је поступак изостатичког пресовања.



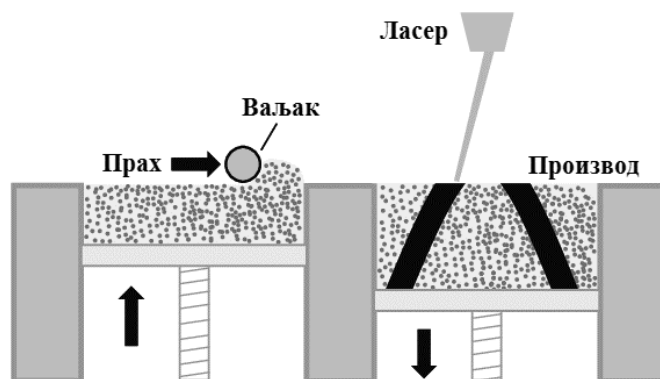
Слика 3.3 Алат за вруће изостатичко пресовање [5]

Инјекционо бризгање керамике (*енгл. Ceramic injection molding – CIM*) користи се за производњу делова од смеше керамичких честица и везива. Поступак бризгања се изводи на сличан начин као и инјекционо бризгање пластике, с тим што постоје разлике у

параметрима процеса, који одређују квалитет коначног CIM производа. Најчешће се користе материјали Al_2O_3 , SiC, SiN, AlN [2, 3, 4].

Код инјекционог бризгања метала (*енгл. Metal injection molding – MIM*) сировина за бризгање састоји се од металног праха и везива. Неизоставни корак у MIM производњи након бризгања је синтеровање. Због великог запреминског скупљања ова технологија је ограничена на ситне делове обично мање од 250 g. Ова технологија у све већој мери потискује класично ливење [1, 3].

Производња делова са металним адитивима је неконвенционални поступак за производњу ситних делова који садрже металне честице. Један од таквих поступака је 3D штампа. Ове технологије за производњу делова карактерише једноставност компоненти и склопова и велика брзина испоруке. За разлику од конвенционалних начина производње, где се производ добија уклањањем материјала са почетног полупроизвода, код ових поступака се делови добијају додавањем материјала у слојевима, прецртавајући 3D модел. Главна предност је у томе што се у процесу производње не користе материјали који се касније уклањају, то што нема калупа и додатних трошкова. У почетку су се ове технологије користиле за израду прототипова. Сада се користи за директну производњу медицинских имплантата, делова за моторе авиона, накит итд [3].



Слика 3.4 Производња делова LPF поступком [3]

Постоје и друге технологије за производњу делова од металног праха. Неке од њих су ласерско синтеровање (LM), ласерско обликовање прахова (LPF), обликовање електронским снопом (EBM), селективно везивање честица (SIB), слојевита екструзија (FDM) итд [1, 3].

Прахови за PM производњу могу бити најразличитијих димензија и карактеристика, зависно од производње и начина употребе. Карактеристике праха ће се одразити на особине финалног производа. У току процеса производње карактеристике честица се мењају и те промене је неопходно пратити и контролисати ради добијања што бољих особина.

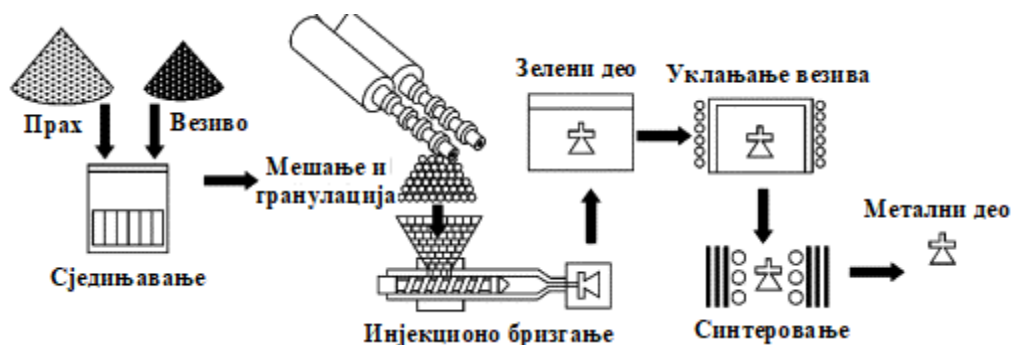
4. Инјекционо бризгање метала – основне карактеристике и примена

Инјекционо бризгање метала је поступак познат под крилатицом MIM – Metal Injection Molding. Код овог поступка сједињене су предности различитих технологија. Од класичне РМ технологије (бризгање прахова) преузета је могућност вишеструког легирања мешањем и пресовањем најразличитијих прахова, као и могућност производње делова од неливљивих или високорастопних метала и њихових легура. Од прераде полимера користи се могућност израде производа сложеног облика.

Инјекционо бризгање метала или MIM технологија користи се за производњу делова комплексних облика, који у већини случајева не захтевају накнадну обраду. MIM технологија је спој класичне металургије прашкастих материјала и технологије инјекционог пресовања пластике. Принцип технологије инјекционог пресовања пластике омогућава обликовање компоненте и остваривање комплексности облика, док синтеровање омогућава постизање одговарајућих механичких својстава производа. MIM процес се састоји од четири основне фазе [6]:

- Мешање и гранулација,
- Инјекционо бризгање,
- Издвајање везива,
- Синтеровање.

На слици 4.1 приказани су кораци у производњи делова инјекционим бризгањем метала, од мешања везива и металног праха па све до коначног производа, тј. металног дела.



Слика 4.1 Кораци у MIM производњи [6]

MIM процес производње почиње мешањем металног праха у хомогену смесу која се у овој технологији зове „feedstock“. Обично је величина честица у распону 0,1-20 μm , а количински удео металног праха се креће од 60% до 65%. Након што се у фази мешања и гранулације постигне feedstock са одређеним хомогеним својствима у облику пелета, следи фаза инјекционог бризгања. У овој фази се гранулирани feedstock загрева до температуре топљења, а потом се инјектира у затворени калуп. Када се калупна шупљина

испуни до одређеног процента (најчешће 95 – 99%) следи фаза деловања накнадног притиска. Након што компонента довољно очврсне врши се отварање калупа и избацивање. Профилисана компонента која се добија назива се „зелени део“ . Након избацивања зеленог дела из калупа следи фаза издвајања везива [1, 2, 6].

Везиво треба издвојити као флуид (течност) или пару, без утицаја на форму и облик дела. Након што се везиво потпуно издвоји добија се порозна компонента, која се у МИМ технологији назива „смеђи део“. После издвајања везива следи синтеровање као завршни корак. Током поступка синтеровања компоненте су изложене високим температурама, што доводи по повећања густине. Компоненте се током фазе синтеровања скупљају за око 15%. Густина материјала компоненте је близу апсолутне теоријске, око 95% , а искоришћеност материјала је готово 100% , док постоји и регранулација материјала уколико је било неуспешно обликовање током производње [1, 2, 6].

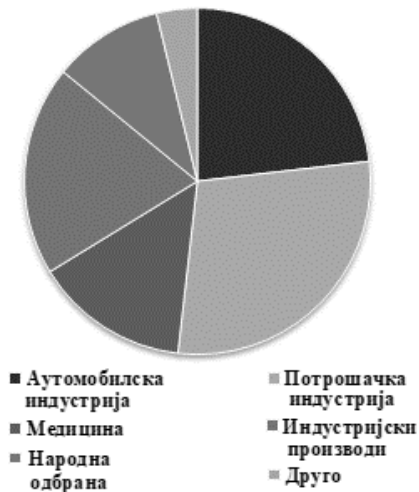
Упоређујући својства производа израђених МИМ поступком са производом израђеним поступком ливења или ковања, МИМ поступак је идеалан за производњу сложених делова са одличним механичким својствима. Инјекционо бризгање метала се у протеклој деценији показало као конкурентна производња за мале и прецизне производе.

МИМ поступак обједињује сложеност облика и структурне предности метала. Мешавина праха и везива која се убризгава у калуп мора бити хомогена. Прахови за МИМ су углавном сферичног облика и много ситнији од оних за конвенционално пресовање у хладном калупу [7]:

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

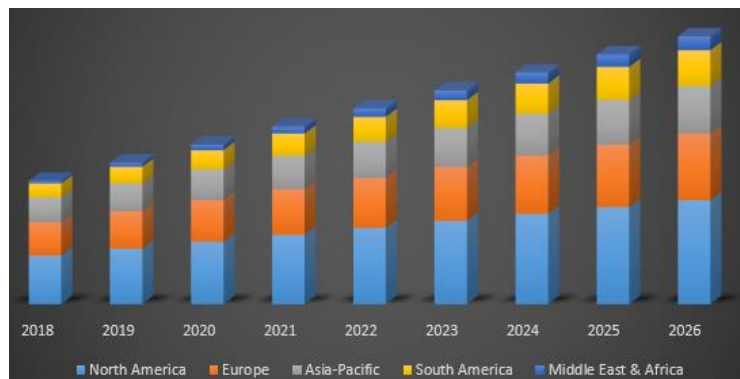
Различити поступци производње су развијени на бази металургије праха, као што су бризгање метала или керамике (СИМ и МИМ технологија), вруће изостатичко пресовање (HIP), хладно пресовање, врућа екструзија, распршивање итд [2]. За све ове поступке допринео је развој индустрије праха, који има могућност прераде различитих напредних материјала у сложене облике, баш као у процесима бризгања пластике.

Прашкасти материјали добијају се поступком познатим под именом металургија прахова. Металургија прахова је технолошки поступак помоћу којег се производе чврсти метални делови сједињавањем честица прашка једног или више метала. Прахови могу бити различитих облика и својстава, зависно од производње и начина употребе. Карактеристике праха ће се касније одразити на својства финалног производа. У току процеса производње карактеристике честица праха се мењају и те промене се морају пратити ради добијања што бољих особина. Обично се прах прерађује у виду гранулата који се користе као сировина за многе машине. Ти гранулати такође могу имати различите облике и димензије у зависности од намене. РМ претвара честице прашка специфичне величине и облика у чврсте, прецизне и високо квалитетне производе. Два основна недостатка РМ поступка су релативно висока цена производа добијених металургијом праха и порозност делова, која се умањује, али не и отклања. И поред тих недостатака овај поступак има врло велику примену у аутомобилској индустрији и у медицини, на коју одлази између 25 и 30% укупне РМ производње (слика 4.2) [2, 8].



Слика 4.2 Заступљеност MIM производње у индустријским гранама [8]

На слици 4.3 се може видети да је заступљеност производње MIM највећа у земљама Северне Америке, али и прогресија у заступљености овог начина производње од 2018. до 2026. године. Предвиђа се да ће свеобухватна употреба делова добијених инјекционим бризгањем метала да порасте за 50% у блиској будућности, што ће довести и до промена у начину производње и промена у карактеристикама материјала [8].



Слика 4.3 Пораст MIM тржишта од 2018. до 2026. године [8]

У последње време је развој електротехнике и њених компоненти нешто што захтева употребу MIM производа као делова малих димензија и сложене геометрије, па је експанзија у развоју метода производње и примене оно што ће обележити индустрију широм света.

4.1 Метални прах и материјали

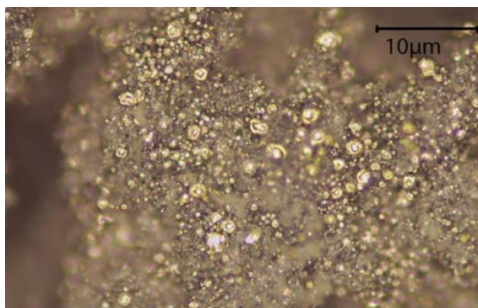
Особине металног праха, који је део сировине за MIM производњу, одређују механичке особине финалног производа. Произведени део показује слична својства као и метал од ког се прави прах. У принципу, било који метални прах се може користити за MIM производњу ако испуњава одређене критеријуме. Величина 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. На слици 4.4 дат је увећан приказ микрочестица метала у металном праху.



Слика 4.4 Приказ сировине за МИМ бризгање (сјајне честице су честице метала) [6]

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 таложње 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 1. дате су карактеристике материјала од којих се праве МИМ прахови.

Табела 1. МІМ материјали и њихова својства [9]

Особине МІМ материјала		Густина (103 kg/cm ³)	Тврдоћа	Затезна чврстоћа (МПа)
Легуре гвожђа	МІМ-2200 (синтеровано)	7.5	45-64HRB	310
	МІМ-2700 (синтеровано)	7.6	70-90HRB	410
Нерђајући челик	МІМ-316L (синтеровано)	7.75	110-160Hv1	498
	МІМ-316 Duplex (синтеровано)	7.65	70-100HRB	732
	МІМ-178-4 PH (синтеровано)	7.5	20-25HRC	900
	МІМ-178-4 PH (термичка о.)	7.5	35-40HRC	1160
	МІМ-304 (синтеровано)	7.65	110-160 Hv1	480
	МІМ-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
	МІМ-4605 (синтеровано)	7.5	70-HRB	700
	МІМ-4605 (термичка о.)	7.5	45-50HRC	1610

4.2 Величина и облик честица

У теорији, величина честица може бити већа од 45µм, али идеална величина честица за већину легура је мања од 22 µм у пречнику. Пожељне су што мање честице, јер ће повећати густину паковања и повећати хомогеност материјала. Неки материјали као што су цементиран карбиди могу имати честице мање од 5 µм. Прах са малом величином честица такође даје глатке површине, као и мање абразиво над машином. Једини разлог за одабир праха са већом величином честица су мањи трошкови за сировину. Међутим, веће честице могу изазвати проблеме у процесу производње, током бризања [1, 2, 6].

Облик честица има велики утицај на успешност МІМ процеса. Честице добијају облик у зависности од производних метода. Сферичан облик је пожељан из бројних разлога. Кугличаст облик је повољан јер брже истиче из алата за бризање. Сферичне честице се добро слажу са везивним материјалом и равномерно се распоређују, што даје добру хомогеност материјала. Метални прахови са неправилним облицима честица се такође користе у МІМ производњи. На слици 4.5 могу се видети неки од најчешћих облика честица метала [2, 6].



Слика 4.5 Облици металних честица [2]

Показало се да честице које имају неправиан облик помажу да део након уклањања везива задржи структуру коју је добио у калупу. Кугличасте честице имају велику додирну површину са другим честицама између којих се јавља трење које помаже да део задржи облик. Међучестично трење се може повећати смањењем димензија честица, јер ће се остварити већи контакт међу честицама. Сферичан облик омогућава велику густину паковања и формирати чврсту форму са материјалом везива. Узајамно трење честица може се утврдити према углу нагиба гомиле праха која се формира при изливању праха кроз уски левак. Већи углови указују на веће узајамно трење честица [2].

4.3 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 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

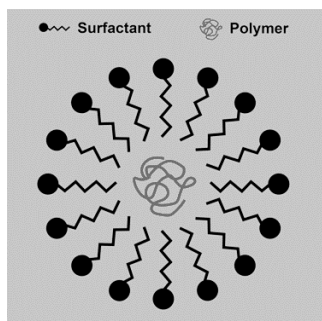
Другим речима, 50% честица су испод величине 11 μm . Вредност D90 је величина која обухвата 90% честица, а то значи да је само 10% честица изнад ове величине [1].

4.4 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.

Полимер и пуниоци чине већи део састава. Материјал за пуњење је обично нека врста воска или материјал који је сличан воску. Полимер и восак су обично у истим пропорцијама у везиву. Иако је пожељна добра повезаност компоненти, потпуно мешање није. Разлике између компоненти су у молекулској тежини и хемијској структури, температури топљења итд. Елементи који формирају заштитну опну на површини стварају мрежу пора која омогућава лако уклањање полимера у каснијој фази (слика 4.6) [1].



Слика 4.6 Заштитна опна честице полимера [10]

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 растворљиви у води. Одвајање везива од метала је процес који претходи синтеровању. Обично се састоји из две фазе [1, 6]:

- 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. На основу густине и запремине компонената металног праха може се израчунати средња вредност густине смеђег дела на основу израза [1]:

$$\rho_1 = \frac{\{(V_{p1} \times \rho_{p1} + V_{p2} \times \rho_{p2} + \dots + V_{pn} \times \rho_{pn}) + (V_{B1} \times \rho_{B1} + V_{B2} \times \rho_{B2} + \dots + V_{Bn} \times \rho_{Bn})\}}{\{(V_{p1} + V_{p2} + \dots + V_{pn}) + (V_{B1} + V_{B2} + \dots + V_{Bn})\}} \\ = \frac{(M_{p1} + M_{p2} + \dots + M_{pn}) + (M_{B1} + M_{B2} + \dots + M_{Bn})}{\{(M_{p1}/\rho_{p1}) + (M_{p2}/\rho_{p2}) + \dots + (M_{pn}/\rho_{pn})\} + \{(M_{B1}/\rho_{B1}) + (M_{B2}/\rho_{B2}) + \dots + (M_{Bn}/\rho_{Bn})\}} \quad (4.1)$$

$$\rho_2 = \frac{\{(V_{p1} \times \rho_{p1} + V_{p2} \times \rho_{p2} + \dots + V_{pn} \times \rho_{pn}) + (V_{B2} \times \rho_{B2} + V_{Bn} \times \rho_{Bn})/(100 - V_{B1})\}}{\{(V_{p1} + V_{p2} + \dots + V_{pn}) + (V_{B1} + V_{B2} + \dots + V_{Bn})\}} \\ = \frac{(M_{p1} + M_{p2} + \dots + M_{pn}) + (M_{B2} + \dots + M_{Bn})}{\{(M_{p1}/\rho_{p1}) + (M_{p2}/\rho_{p2}) + \dots + (M_{pn}/\rho_{pn})\} + \{(M_{B2}/\rho_{B2}) + \dots + (M_{Bn}/\rho_{Bn})\}} \quad (4.2)$$

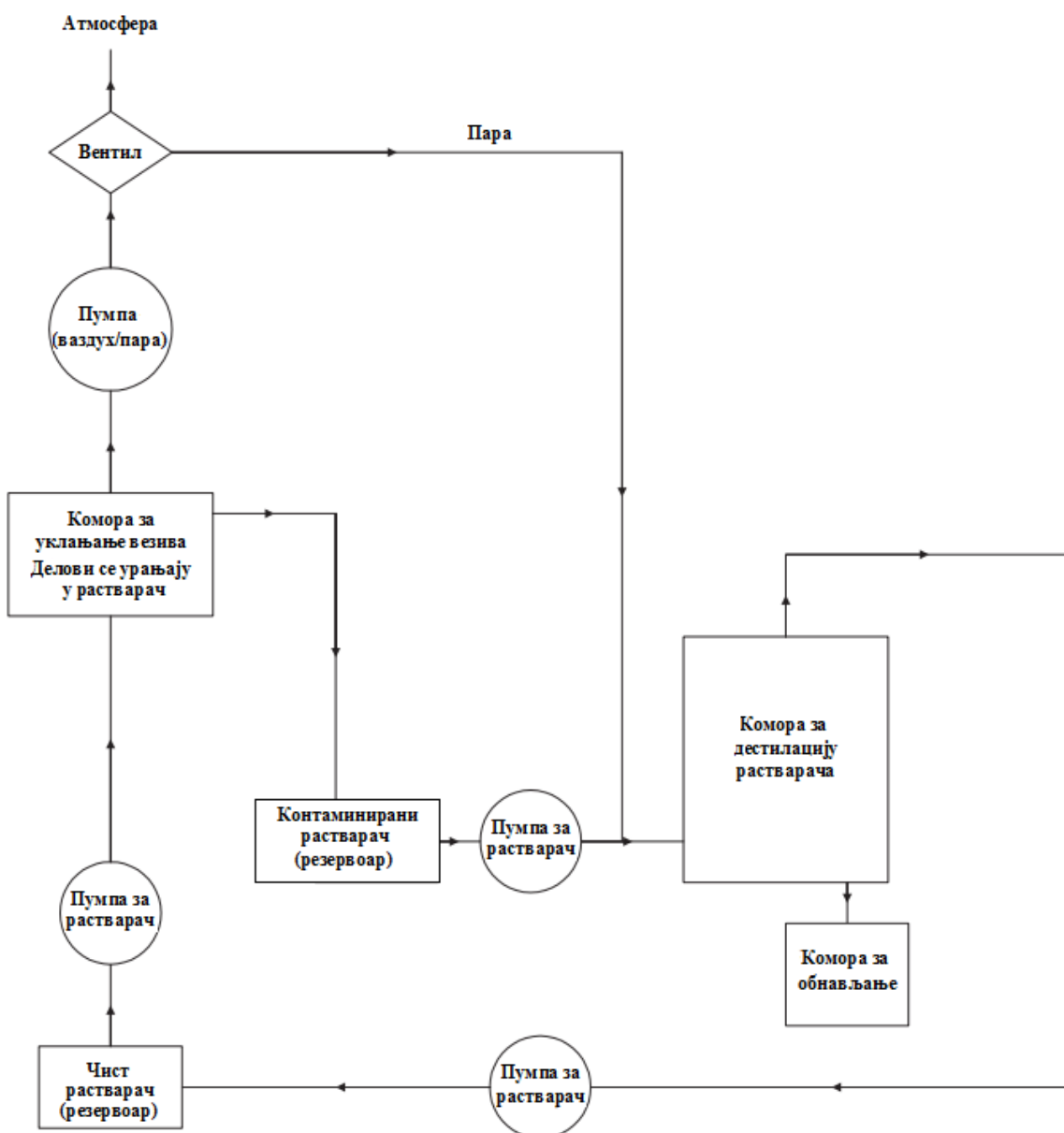
где V означава запремину, M масу, ρ густину; $p1$ представља метални прах 1, $p2$ – прах 2, pn – метални прах, $B1$ – примарно везиво, $B2, Bn$ – секундарно везиво; ρ_1 – густина зеленог дела; ρ_2 – густина смеђег дела;

Време које је потребно да се уклони везиво зависи од следећих фактора [1, 6]:

- Методе уклањања везива,
- Величине комада,
- Величине металних честица.

У зависности од састава сировине (величине металних честица) одвајање везива може потрајати од 3 h до 22 h.

За уклањање везива користе се растварачи који услед загревања ослобађају отровна испарења, па је неопходно пројектовати затворени систем издвајања везива са вентилацијом. Такође, апаратуру треба пројектовати тако да се исти растварач може употребити више пута. Неки од растварача који се употребљавају су трихлоретилен, тетрахлоретилен и *n*-пропил бромид. Њихова испарења су канцерогена и оштећују озон, па је од изузетне важности да систем у потпуности буде затворен. На слици 4.7 дата је шема уклањања везива коју користи већина система.



Слика 4.7 Шематски приказ поступка за уклањање везива [6]

Први корак након вађења из калупа је уклањање примарног везива, тако што се МИМ делови урањају у суд са чистим растварачем, где се задржавају одређено време док

се не уклони примарно везиво. Растварач је након овог процеса контаминиран воском и шаље се на пречишћавање, док се део са уклоњеним примарним везивом пребацује у комору где се суши. Након тога, поступак се понавља за следећи МИМ део, за који се користи исти растварач који је пречишћен. Та тај начин се добија затворени кружни циклус који омогућава огромну уштеду [6].

Када је у питању овакав поступак уклањања везива, као растварач се углавном користи угљен-диоксид. Као растварач, угљен-диоксид мора бити у течном агрегатном стању. Комора у којој се налази има температуру од 50 до 70 °C. Да би растварач био у течном стању на овој температури притисак у комори мора имати велику вредност. Након уклањања везива, притисак у комори се постепено смањује, што омогућава испаравање угљен-диоксида [1, 6].

Најједноставнија и економски најоправданија метода издвајања везива је метода која користи воду као растварач. У овом случају обично је примарно везиво растворљиво у води, док секундарно није [1]. Након одстрањивања везива, делови се суше у ваздушним пећима. За разлику од других поступака, време потребно за одстрањивање везива је дуже.

Поред горе наведених, постоје и други поступци одстрањивања примарног везива, као што је каталитичко одвајање – *CD поступак*. Опрема за каталитичко одвајање описана је у поглављу 5.1.

Издвајање примарног везива из МИМ дела је веома важан корак у производњи и захтева велику пажњу. Код свих наведених поступака постоје неке заједничке карактеристике система издвајања везива које гарантују успешност самог процеса. На пример, температура коморе са растварачем је параметар од изузетног значаја. Такође, код примарног уклањања везива потребно је онемогућити реакцију растварача са секундарним везивом. То би довело до нарушавања структуре [1, 6].

Табела 3. Карактеристике растварача примарног везива [1]

Растварач	Тачка кључања (°C)	Тачка сагоревања паре (°C)
Ацетон	56	-20
Хексан	70	-7
Хептан	98,5	-5
Изопропил	82	12
<i>n</i> -пропил бромид	70	/
Трихлоретилен	88	/
Тетрахлоретилен	121	/

Притисак у комори не сме имати вредност која би могла да изазове испаравање раствора и формирање запаљиве смеше. Из тог разлога комора са растварачем је обично са дебљим зидовима и добром изолацијом. У табели 3. дате су основне карактеристике растварача који се користе за примарно уклањање везива.

Након уклањања примарног везива остају шупљине на местима где су првобитно биле честице везива. За одржавање облика и форме дела у међуфази заслужно је

секундарно везиво. Обично је на бази полипропилена, полиетилена и полиацетала. Формирање шупљина у првом кораку омогућава уклањање секундарног везива без оштећења. Секундарна везива се уклањају термички. Поред тога, висока температура омогућава и делимично стапање честица МИМ комада и одржавање облика [1, 6].

Код металних делова се загревање врши у комори без присуства кисеоника, тако да везива не сагоревају. У другом случају, код СИМ-а, издвајање секундарног везива се обавља у коморама где је присутан кисеоник, па долази до сагоревања везива. У табели 4. приказане су температуре уклањања секундарног везива за различите материјале.

Табела 4. Температуре за уклањање секундарног везива [1]

Секундарно везиво	Температура коморе за уклањање везива (°C)
Полипропилен	450-500
Полиетилен	500-600
Полиацетал	300-450

У случају керамике (СИМ) честице су мање него код МИМ-а, па је величина пора након уклањања везива мања, што омогућава боље одржавање облика. Мање поре код СИМ-а отежавају процес уклањања везива, за шта је потребно више времена.

Параметри процеса уклањања везива одавно су предмет истраживања како би се добили „смеђи“ делови што бољих карактеристика и који диктирају квалитет МИМ производа.

При одабиру материјала за везиво треба узети у обзир велики број фактора који се односе на могућност извођења самог процеса (конструисање машине и састављање апаратуре), заштиту радника и околине од негативног дејства растварача, на обновљиве изворе енергије и материјала растварача итд. Постоји велики број растварача који имају изузетно добре карактеристике са становишта растварања везива, али се не користе, јер деградирају или контаминирају делове, што се испољава тек у каснијим фазама обраде [6].

Табела 5. Параметри процеса уклањања везива [6]

Примарно везиво	Секундарно везиво	Одвајање примарног везива	Температура раствора (°C)	Брзина (mm/h)
Парафински восак	Полипропилен	Хептан	50	1.5
Синтетички восак	Полипропилен	Тетрахлоретилен	70	2
Полиетилгликол	Полипропилен	Вода	40	0.3
Полиетилгликол 200	Полиацетал	Вода	60	0.5
Полиацетал	Полиетилен	Азотна киселина	120	1.5

Многе супстанце се не користе као растварачи у процесу издвајања везива због канцерогеног дејства на околину и уништавања озонског омотача, као и немогућности пречишћавања и поновне употребе (кружни циклус).

Уклањање везива изводи се постепено, а квалитет примарног уклањања одређује секундарно уклањање везива, тако да особине примарног и секундарног растварача, као и

параметри процеса морају одговарати једно другоме. У табели 5. дати су параметри процеса примарног и секундарног уклањања везива за различите материјале. Ако се поступак издвајања везива не изведе према наведеним правилима, могу настати бројни дефекти. Најчешћи узроци дефеката су [1]:

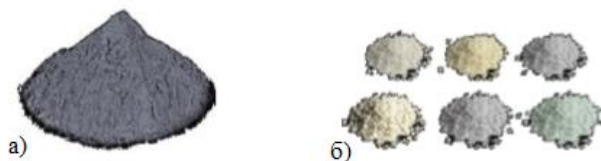
- Неодговарајућа температура коморе,
- Кратко време задржавања зеленог дела у комори и
- Проток гаса.

Време задржавања унутар коморе зависи од материјала везива, величине честица, дебљине зида комада итд. Температура унутар коморе мора буде изједначена, што се може контролисати помоћу уређаја инсталираних на машини [1].

Потпуно издвајање везива је изузетно важно, јер и мале количине везива у току синтеровања могу створити бројне проблеме. Наиме, процес синтеровања обавља се на високим температурама, које су много више од температура коморе за издвајање везива. Висока вредност температура може да доведе до наглог испаравања везива из комада у току синтеровања, што може проузроковати крти лом. Поред тога, сагоревањем везива на температурама синтеровања формира се угљеник, који је веома непожељан у материјалу производа. Постоје и други проблеми који се могу јавити услед заостале количине везива, као што је стварање мехура, дефеката у зиду итд [1].

4.5 Однос праха и везива

Однос између количине праха и везива у сировинама ће утицати на њене перформансе. Да би имали успешан процес калупирања, две компоненте требају имати одговарајућу пропорцију. Превише праха изазиваће проблеме са задржавањем облика, као и трење на опреми за бризгање и абразивне процесе. Мешањем металних и керамичких прахова са органским везивима, „рецепт“ у процесу производње је кључни корак да се осигура квалитетан производ. Како би се добила погодна смеша која одговара завршним захтевима и толеранцијама производа, постоји металургија која ствара органска влакна која би омогућила најпогоднији производ. На слици 4.8 приказане су компоненте за производњу гранулата – честице праха и органска везива [6, 11].



Слика 4.8 Компоненте за производњу гранулата – честице праха (а) и органска везива (б) [11]

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

4.6 Синтеровање

До синтеровања и спајања зрна долази услед смањивања површинске енергије честица праха, те збоггибања атома при високим температурама у зони додира честица. До смањивања волумена комада током синтеровања долази услед смањивања димензија пора. Што је време синтеровања дуже, прах постаје све чвршће металуршки везан, док не постигне својства упоредива са својствима ливених или кованих материјала истог хемијског састава. Фазе операције синтеровања приказане су на слици 4.9 [1, 7].



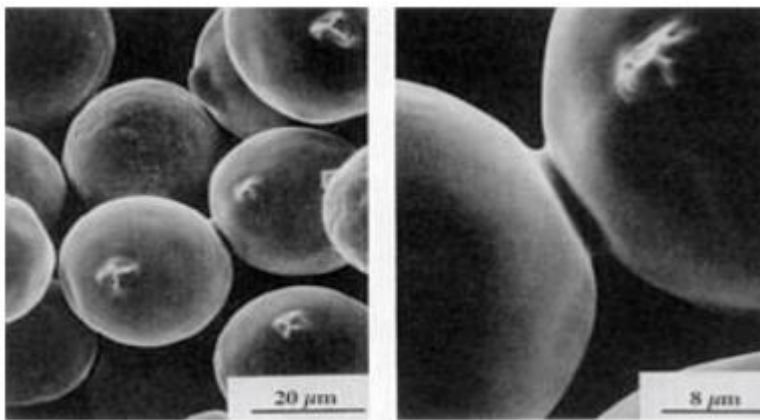
Слика 4.9 График циклуса током синтеровања и пресинтеровања у четири фазе за нерђајући челик [7]

Модел синтеровања међу првима је проучавао Ј. И. Frenkelj. Он је утврдио да за синтеровање две кугле механизмом вискозног тока важи следећа зависност [7]:

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

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

На слици 4.10 приказано је срашћивање честица током процеса синтеровања.

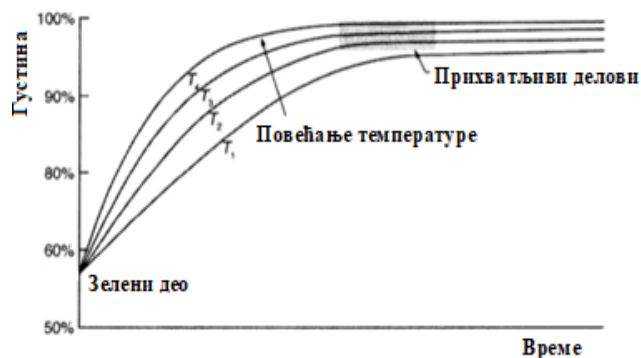


Слика 4.10 Процес „срашћивања“ приликом синтеровања Ni честица величине 22 μm, при 1030 °C у трајању од 30 min [11]

У области виших температура, када су дифузиона покретљивост атома и напон пара материјала довољно велики, раст површине контакта може да буде последица пет механизма [1, 7]:

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

Температура и притисак су два кључна параметра процеса синтеровања. Променом температуре и притисака мењају се и особине материјала који се синтерује. На слици 4.11 је дијаграм који показује зависност између температуре и густине делова, тј. повећањем температуре обраде и времена дејства те температуре, повећава се и густина обрађеног дела [1, 7].



Слика 4.11 Зависност густине од температуре и времена синтеровања за различите вредности температура [1]

Честице срашћују кретањем атома који смањују високу површинску енергију честица. Што су честице мање, имају вишу површинску енергију те срашћују брже. Код металних прашкова то је дифузија атома кроз површину честице на месту контакта. Будући да је дифузија температурни процес, функција је температуре и времена. Следећа слика шематски приказује различите фазе процеса спајања. С временом честице срашћују, поре се смањују и обликују се границе зрна. Контролисано и равномерно скупљање компоненти је до 20% у завршној фази све до њихове задане величине облика и толеранцијских параметара. Даље, делови могу бити топлотно обрађени, полирани, обложени или заварени. Међутим, многи начини производње не захтевају скупе секундарне операције [1, 7].

Скупљање материјала након синтеровања и одређивање коефицијента скупљања били су предмет многих истраживачких радова из области синтеровања. У том погледу највише успеха имали су научници *Luque* и *Aldazabal*, који су у свом раду „*Geometrical model of liquid – phase sintering, Mathematics and Computers in Simulation*“, из 2010. године успели да развију модел математичких формула и компјутерских симулација синтеровања. Такође, они су дефинисали оптималне вредности температуре и времена синтеровања за различите материјале, који су дати у табели 6 [1, 7].

Табела 6. Температура и потребно време за синтеровање [1]

Материјал	Температура (°C)	Време (min)
Бакар, месинг, бронза	760-900	10-45
Челик и челични графит	1000-1150	8-45
Никл	1000-1150	30-45
Нерђајући челик	1100-1290	30-60
Легуре Al, Ni и Co	1200-1300	120-150
Ферит	1200-1500	100-600
Карбиди	1430-1500	20-30
Молибден	2050	120
Волфрам	2350	480

Поред температуре и времена синтеровања, веома значајан елемент у процесу синтеровања представља процентуална концентрација металног праха у сировини за бризгање, тј. однос метални прах – везиво. *Rudolf Zauner* (2002) је у свом раду о линијској промени дужине зеленог комада („*green part*“) испитивао утицај количине металног праха у сировини на величину линијске промене димензије комада након синтеровања. У свом раду је показао димензиону варијабилност процеса инјекционог бризгања метала за нерђајући челик 316 L. запремински удео металних честица био је 60% и 65% . запремински удео металних честица је био 60% и 65% . Такође, у експерименту је користио два типа металног праха, са правилно обликованим честицама (тип 1) и један са неправилно обликованим честицама (тип 2) [7].

5. Опрема и алати. Параметри процеса

Упркос великом броју различито конструисаних модела машина за инјекционо бризгање метала, прилагођених производњи различитих индустријских делова, све ове машине садрже неке заједничке елементе. Машина за инјекционо бризгање метала суштински се не разликује од машине за бризгање пластике. Две основне целине ових машина су јединица за бризгање и јединица за стезање (слика 5.1). Подсклопови које садрже ове јединице су [1, 6]:

- Уливни левак,
- Мотор,
- Компјутер за управљање,
- Пуж,
- Цилиндар са грејачима,
- Хидраулични погон,
- Контролна табла,
- Калупи,
- Елемент за контролу калупа и
- Посуда за произведене делове.

Јединица за бризгање и јединица за стезање обично се монтирају у хоризонталном положају, као што је приказано на слици 5.1. Овакав начин производње је најприкладнији и користи се у серијској производњи. Међутим, код неких машина су јединица за стезање и јединица за бризгање постављене у вертикални положај. У том случају је неопходно да постоје додатни елементи који спречавају да делови слободно падају и тако се оштећују.



Слика 5.1 Елементи машине за инјекционо бризгање метала [6]

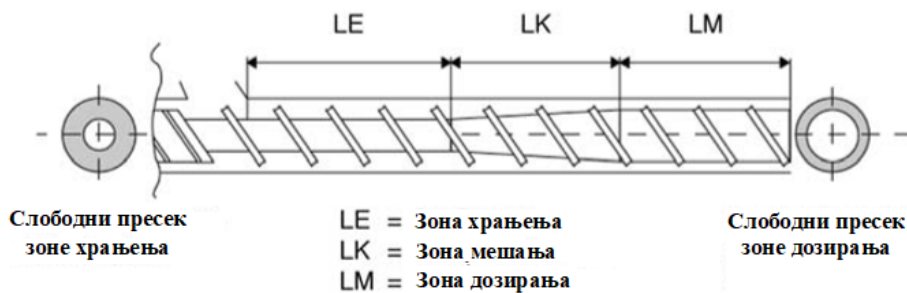
Хидраулични погон омогућава затварање и отварање стезне јединице машине и онемогућава отварање калупа услед притиска масе која се убризгава у калуп. У општем случају, максимална сила стезања главна је карактеристика машине, која одређује снагу

машине за инјекционо бризгање. Сви остали елементи машине обично имају електрични погон. Данас постоје машине које су у потпуности електричне. Ове машине садрже и инструменте за надгледање притиска и температуре процеса у појединим деловима, а рачунар контролише рад читаве машине. Након отварања калупа, готови МИМ производи падају у посуду за скупљање. За ову сврху се може користити и покретна трака, уколико је у питању висок степен аутоматизације [1, 6].

Јединицу за бризгање чини грејни суд са пужним клипом, који транспортује сировину кроз бризгалку у калуп. Ротацију и аксијално кретање пужа омогућава мотор на задњем крају. Гранулати сировине се кроз уливни левак уносе у цилиндар са грејачима. Унутар цилиндра се сировина загрева, меша, хомогенизује и транспортује кроз млазницу у калуп. Клип за бризгање или пуж може се поделити на три карактеристичне зоне приказане на слици 5.2 [1]:

- Зона дозирања,
- Зона мешања и
- Зона храњења.

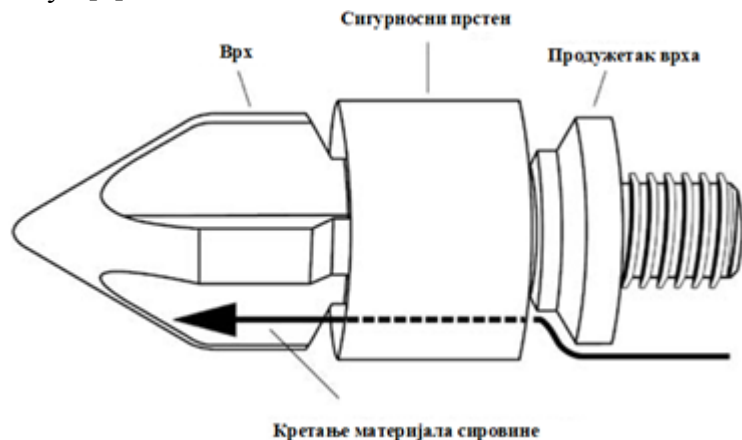
Зона дозирања одваја и усмерава кроз цилиндар према калупу одређену количину сировине која се користи за бризгање. Рачунар омогућава подешавање температуре у цилиндру у неколико независних зона. Температурске разлике у појединим зонама су карактеристичне за различите фазе обликовања сировине. Постепеном обрадом се постижу боље особине сировине која се убризгава у калуп [1].



Слика 5.2 Приказ појединих зона и пресека на клипу [1]

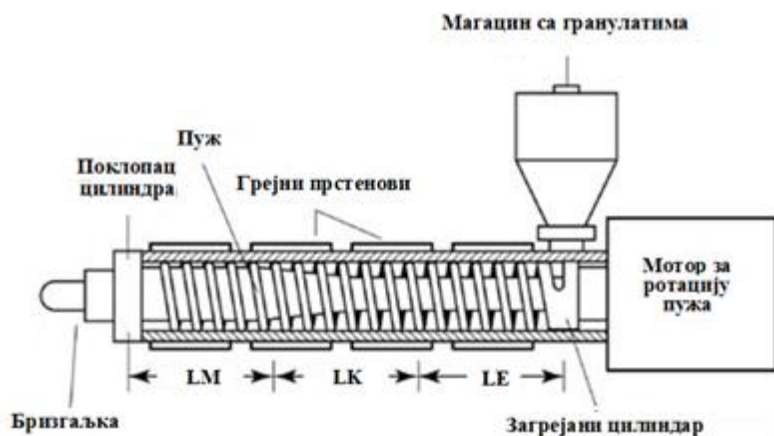
Прва грејна зона служи за топљење сировина и превођење гранулата у растопљено стање. У наредним зонама температура се постепено повећава, а маса се хомогенизује и потискује ка калупу. Уколико је температура нижа од оптималне вредности за овај процес, може доћи до тога да растопљени материјал у калупу очврсне, при чему неће у потпуности испунити унутрашњост калупа. Супротно томе, ако је температура већа од оптималне, то може довести до врло високог вискозитета, проблеме приликом истискивања на глави алата за бризгање, продуженог времена хлађења алата итд. Врх клипа је изузетно осетљив део алата и на њему је хабање најинтензивније. Промена његовог облика би у великој мери пореметила исправан начин бризгања, па је неопходно

стално контролисати и пратити промену димензија. На слици 5.2 приказани су делови врха алата за бризгање – клипа. Посебно осетљиви делови су прстен за навођење и задњи део врха клипа. Ово је нарочито значајно како би се омогућило убризгавање по високим притиском. Такође, ови делови алата су одговорни за убризгавање хомогене смеше у калуп [1].



Слика 5.2 Конфигурација врха клипа – пужа [1]

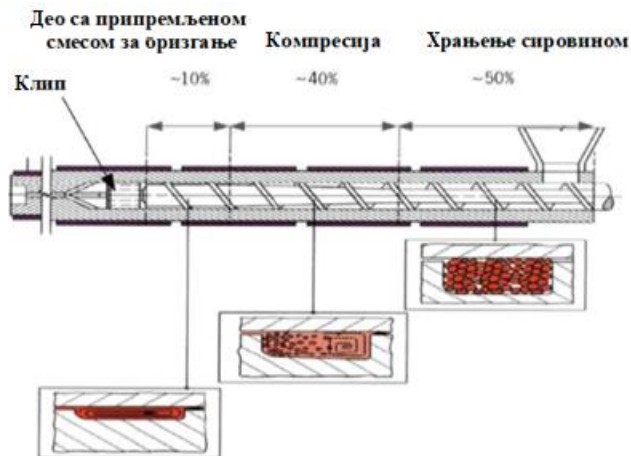
Склоп јединице за бризгање је најважнији део машине. Он одређује квалитет делова. На слици 5.3 се може видети да су грејачи цилиндра равномерно распоређени дуж цилиндра. На врху цилиндра се налази поклопац, који омогућава поуздано заптивање дела према млазници [1].



Слика 5.3 Подсклоп система за бризгање [7]

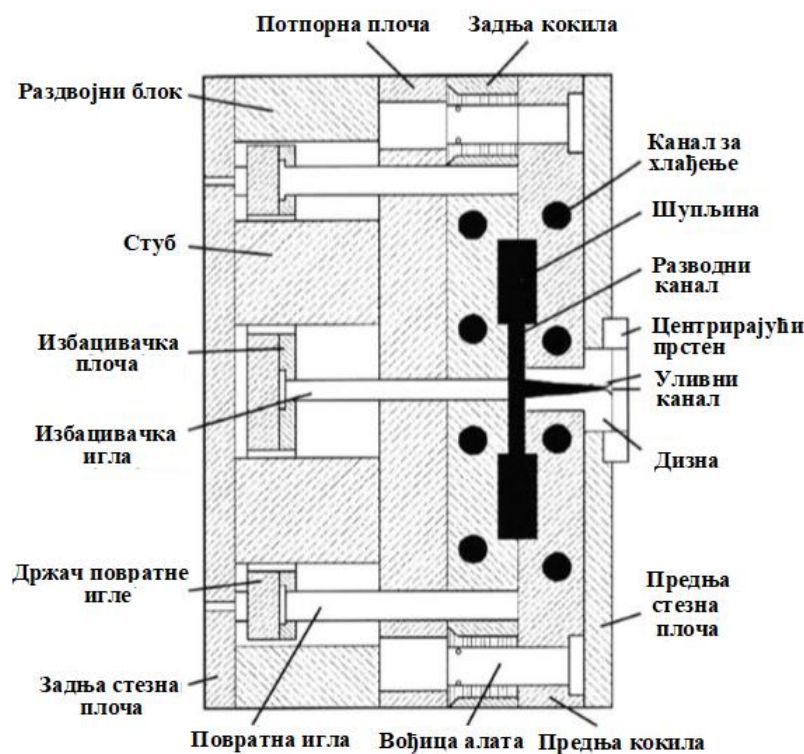
Пуж је конструисан тако усмерава масу да се креће напред према калупу, тако да у свим деловима постоје строго дефинисани зазори између пужа и унутрашњости цилиндра. Клип је обично конструисан тако да постепено смањује запремину смеше која се транспортује кроз цилиндар (слика 5.3) [1, 7].

Сировина доспева у зону храњења у којој се загрева и пластификује. Пуж транспортује сировину до зоне мешања и сабијања, где је попречни пресек пужа већи, па је самим тим зазор између пужа и цилиндра константног попречног пресека мањи. Постепено смањивање простора између пужа и цилиндра има за циљ мешање услед компресије, тј. повећања притиска услед смањивања попречног пресека. Притисак унутар цилиндра се одређује параметрима ротирања пужа, а његово аксијално кретање напред и назад има функцију да убризгава тачно одређену количину сировине у калуп са сваким циклусом. На крају цилиндра постоји неповратни вентил, који спречава да се растопљена сировина поново врати у цилиндар [7]. На слици 5.4 дат је шематски приказ промене структуре и облика гранулата приликом бризгања.



Слика 5.4 Промена структуре сировине у цилиндру [7]

Две плоче које се налазе иза предње стезне плоче садрже шупљине које формирају облик коначног дела, тј. калупне шупљине, које се налазе између њих. Калупне плоче се израђују од метала и називају се кокилама. Предња кокила је причвршћена за предњу стезну плочу и креће се заједно са њом, а задња кокила је причвршћена за задњу стезну плочу. Покретни део калупа често се означава као „А страна“, а непокретни део „Б страна“ [1].



Слика 5.5 Шема калупа за МИМ бризгање [1]

Када је реч о калупним шупљинама, оне морају бити дизајниране тако да материјал више пријања за задњу шупљину него за предњу шупљину калупа. На овај начин

У општем случају, алати који се користе за бризгање метала приказани су на слици 5.5. Састоје се од низа челичних плоча које су између стезних плоча на оба краја. Предња стезна плоча се налази одмах иза јединице за бризгање. Често је и непокретна [1].

Предња стезна плоча садржи централни отвор у који се монтира центрирајући прстен. Ту се поставља млазница која служи за убризгавање материјала у калуп.

Температура унутар шупљина контролише се помоћу воде или уља, која циркулишу каналима за хлађење у калупу. Правилна конструкција канала за хлађење и оптимална температура су веома битни параметри, који зависе у великој мери од материјала. У том погледу се још увек већим делом инжењери ослањају на претходно стечено искуство. Температура калупа мора бити довољно ниска да омогући отврдњавање растопе, а и довољно висока како би се калуп исправно попунио [1].

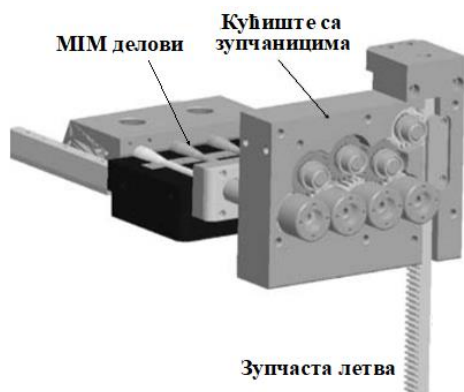
обликовани делови ће се залепити за задњу кокилну плочу када се плоче одвоје, а део се избацује из шупљине избацивачким иглама. Неки алати могу да садрже опружне игле на предњој страни калупа, како би се осигурало да делови остану на Б страни кад се калупи отворе. Ово повећава сложеност алата и целокупног склопа, па самим тим и цену алата. Даља истраживања су усмерена на упрошћавању конструкције алата за инјекционо бризгање метала, уз задржавање оптималних параметара бризгања [1].



Док је предња кокила чврсто везана за предњу стезну плочу, задња кокилу држи потпорна плоча (слика 5.5). Прецизно вођење и позиционирање кокила омогућава четири стуба вођица на угловима гарнитуре алата. Раздвојни блокови постављају кокилне плоче на одређено растојање од избацивача.

У зависности од конструкције кокила и модела, калуп може имати једну или неколико избацивачких игли. Број избацивачких игли зависи и од адхезивних сила између калупа и модела. Ово укључује и анализу скупљања током хлађења. Пријањање материјала за калуп је карактеристично за моделе са сложеном геометријом. Одвајање материјала од калупа се регулише одговарајућим угловима нагиба између њих. Обично се узима угао нагиба од 18 степени [1].

Слика 5.6 Калупи за МИМ бризгање [1]



Већина алата у склопу сета за инјекционо бризгање је стандардизована и може се набавити код специјалних добављача по пристојним ценама. Међутим, само се кокиле интерно израђују према потреби произвођача.

За сложеније делове неретко се користе језгра и различите врсте уметака. Између њих и калупних шупљина се убризгава растоп материјала, а по очвршћивању растопа, језгра се извлаче, а на њихово место остаје шупљина.

Слика 5.7 Подсклоп алата за МИМ бризгање [1]

Понекад се уводи додатна плоча између ове две кокиле, како би се направила преграда или неки други елемент на моделу. На слици 5.7 приказан је алат који се користи за израду навоја.

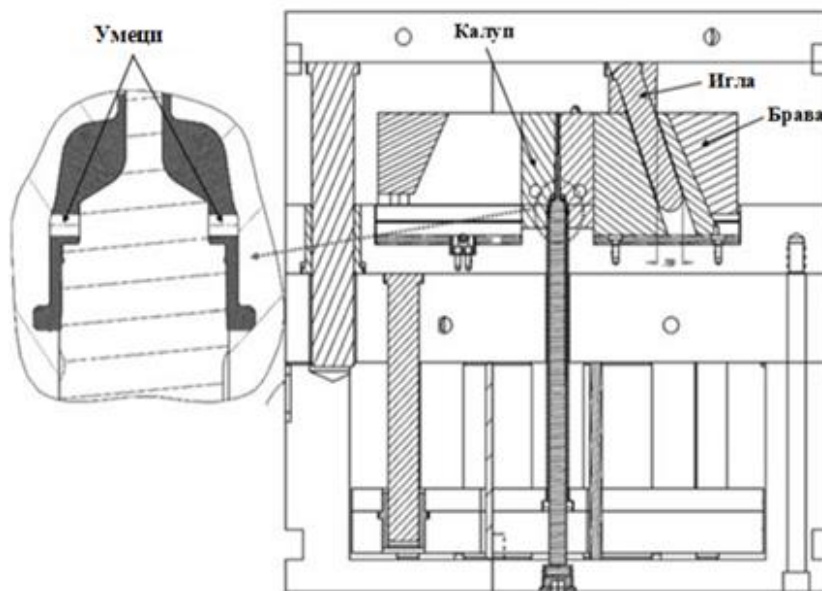
Производња МИМ делова се обавља у неколико фаза. Прва фаза је ваза убризгавања у калуп која захтева одређену температуру и притисак, а на крају је фаза хлађења у калупу. У табели 7. дати су неки од параметара процеса [12].

Табела 7. Промена параметара у различитим фазама процеса [12]

Фактор који се контролише (МПа)	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3
Притисак убризгавања (°C)	50	60	70
Температура убризгавања (°C)	140	150	160
Температура у калупу (°C)	45	50	55
Накнадни притисак (МПа)	65	70	75
Брзина убризгавања (cm/s)	5	10	15
Количина металног праха (%)	60	61.5	63
Време накнадног притиска (s)	5	10	15
Време хлађења (s)	5	8	11

Иако сваки од ових фактора утиче на механичке особине коначног дела, није исти ниво утицаја на поменуте особине. Нпр. највећи утицај на ударну жилавост дела има притисак убризгавања, а најмањи утицај време накнадног притиска. Оптимална вредност сваког фактора подразумева најбољу комбинацију ових фактора [1, 12].

Механизам за избацивање дела из калупа има функцију да омогући поуздано избацивање готовог дела из калупа након завршеног производног циклуса, када се калупи отворе. Због тога овај механизам мора синхронизовано да ради са отварањем и затварањем калупа. Избацивачке игле, које су већ споменуте, чине само један део овог склопа, који омогућава правовремено избацивање готових комада [1]. На слици 5.8 приказан је калуп који је вертикално постављен.

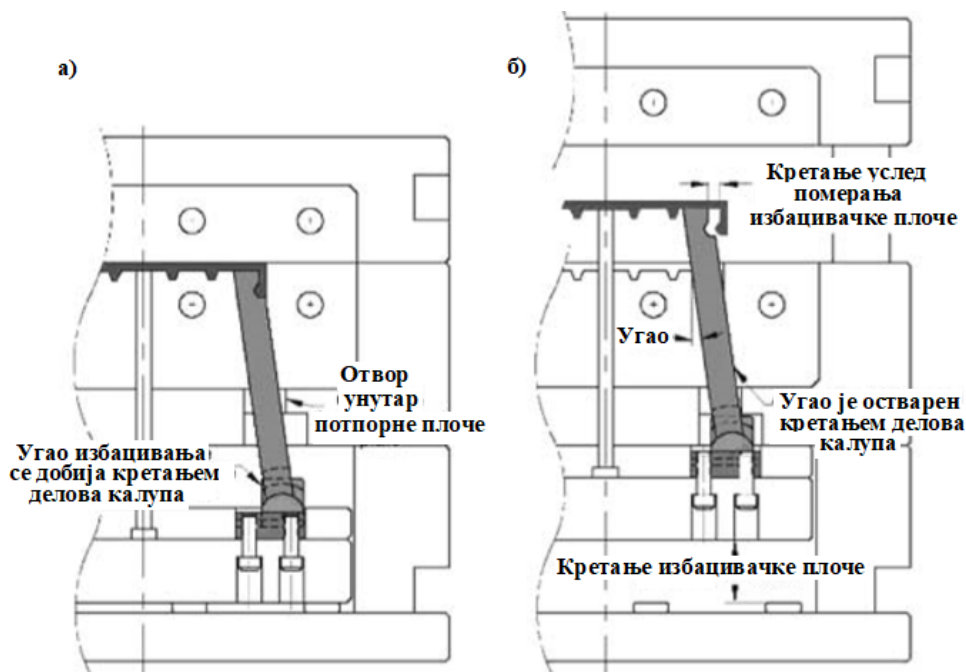


Слика 5.8 Механизми за избацивање дела из калупа [1]

На овом примеру се може видети да избацивачке игле носи задња стезна плоча, а механизми за регулацију њиховог правовременог деловања су везани за предњу – горњу стезну плочу. Ове две плоче повезују вођице или стубови алата, а између њих су метални калупи или кокиле.

Када је реч о механизмима избацивања дела из калупа, нарочиту пажњу треба поклонити деловима сложене геометрије, који захтевају тз. уметке. У том случају посебну пажњу треба посветити начину на који се уметак одваја од дела, како не би дошло до оштећења. Због тога је неопходно да ова врста уметака има одређени угао нагиба зида. Најчешће су физички одвојени од калупа. Понекад су део калупа, па се крећу синхронно са њим (слика 5.8). На овом примеру умеци су синхронизовани са кретањем калупа и при отварању калупа бочним кретањем ослобађају МИМ део који пада у посуду за полупроизводе [1]. Механизми који омогућавају ово кретање причвршћени су за предњу стезну плочу. Када се отвори калуп, откључавају се умеци који се померају у страну и део се може избацити из калупа.

Постоје и други начини производње делова са сложеном геометријом. Такви су нпр. угаони подизачи за обликовање делова, који раде на принципу полука, а њихово закретање за одређени угао ослобађа део који слободно пада из калупа. Они су приказани на слици 5.9.



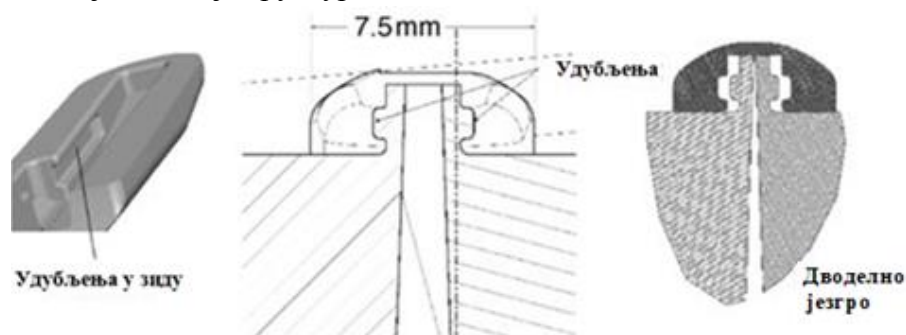
Слика 5.9 Угаони подизачи, а) отворени калуп и б) затворени калуп [1]

Ови механизми се монтирају за плочу за избацивање (*ejector plate*) и врше синхронно кретање са плочом за избацивање. У овом случају калуп је у вертикалном положају и отварање калупа се врши вертикалним кретањем горње и доње стезне плоче. На слици 5.9 а приказан је затворени калуп и положај полуке док траје процес бризања. Тада је плоча за избацивање у доњем положају. За избацивачку плочу је зглобно везана полука са зарезом који одређује сложенији део облика дела. Полука пролази кроз више плоча на алату, па оне морају садржати отворе који су прецизно дефинисани и који омогућавају правилно закретање полуке. Када се калуп отвори, избацивачка плоча се помера на горе, при чему се полука закрене за одговарајућу угао, тз. „угао избацивања“.

Механизам је тако конструисан да само крајњи положај избацивачке плоче остварује потребан угао полуге, која ослобађа део из калупа (слика 5.9 б) [1].

Уколико су у питању делови са удубљењима веома сложене геометрије, могу се применити дводелна или вишеделна језгра. На слици 5.10 приказана је производња делова са удубљењем у зиду, где се примењује дводелно језгро. Алат је конструисан тако да раздваја крајеве ове две половине када је затворен калуп [1]. Када се калуп отвори, ови делови језгра се приближавају један другом и тако ослобађају део.

Када је реч о млазницама за бризгање, велика пажња се посвећује стању материјала унутар бризгалке, тј. његовој структури.

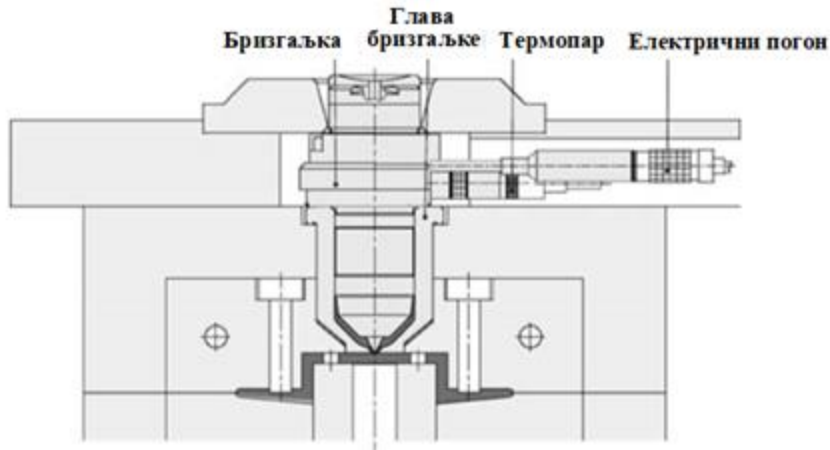


Слика 5.10 Производња делова са удубљењима у зиду помоћу језгара [1]

Сировина која улази у калуп има такву структуру да је њена унутрашњост течна, а спољашњи део тока материјала при уласку у калуп може отврднути или се контаминирати реаговањем са спољашњом средином. Због тога постоје посебни делови алата који спречавају овакве појаве. На слици 5.11 приказана је бризгалка напредније технологије. Код оваквих бризгалки користе се електрични грејачи, који омогућавају равномерно загревање растопа у свим деловима пре уласка у калуп, како би се спречило непожељно очвршћивање растопа. Ове бризгалке су интегрисане у калуп. Имају стални извор напајања и термо-елементе за контролу температуре. На слици 5.12 приказан је склоп алата бризгалке и калупа, који чине јединствену целину. На тај начин је омогућено контролисање температуре у свим деловима алата [1].



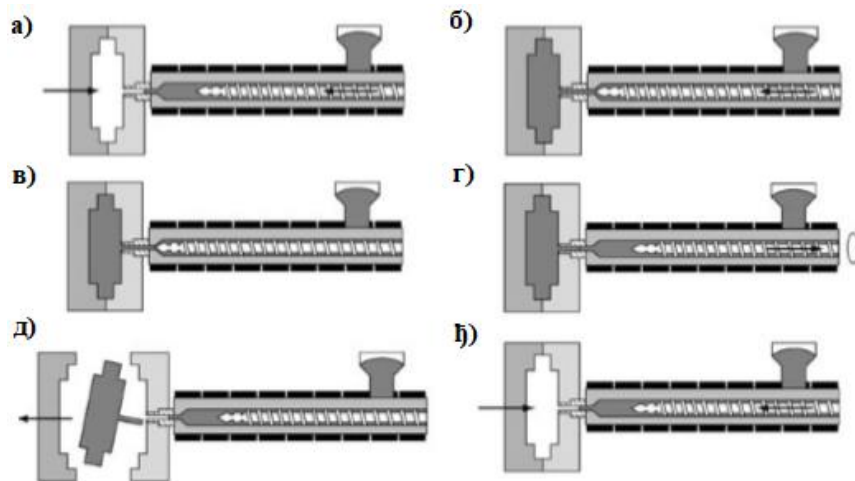
Слика 5.11 МММ бризгалка са електронским компонентама [1]



Слика 5.12 Склоп алата бризгаљке и калупа [1]

На овом примеру се може видети да се материјал у калуп убризгава одозго. Бризгаљка чини део шупљине калупа. У овим алатима је минималан губитак температуре од млазнице до калупа, што повећава хомогеност смесе за бризгање. Алати за овакав начин бризгања морају бити високо-квалитетне израде и углавном су вишеслојни и заштићени превлакама. Углавном су састављени од алатних челика и титанијума. Због високих температура морају бити добро изоловани [1].

Оно што карактерише сваку машину за инјекционо бризгање је трајање једног циклуса производње делова, тј. време које је потребно за затварање калупа, бризгање, отварање и поновно затварање калупа. То је, у суштини, време које је потребно за производњу једног дела [1]. На слици 5.13 приказан је циклус производње МИМ делова.



Слика 5.13 Производни циклус МИМ делова [1]

На почетку се калупи затварају, а клип гура растопљену масу према калупу (слика 5.13 а). У другој фази калуп се пуни масом растоп, коју убризгава клип (слика 5.13 б). Трећа фаза је деловање накнадног притиска, како би се калуп исправно попунио, а

шупљине дела смањиле у што већој мери (слика 5.13 в). Затим се калуп постепено хлади, а клип се враћа назад како би нову масу припремио за бризгање (слика 5.13 г). Након тога, калупи се отварају и део се избацује из калупа (слика 5.13 д). На крају, калуп се поново затвара и тиме је завршен један циклус (слика 5.13 ђ). Приликом пуњења калупа можемо разликовати две главне фазе. У првој фази се растоп убризгава у калуп, где се калупна шупљина попуни за 92 – 98% .У другој фази, која се зове фаза деловања накнадног притиска, калуп се попуни за преосталих 2 – 8% . На слици 5.14 приказан је начин попуњавања калупа, преко криве зависности количине материјала у калупу и времена, где прва фаза траје једну секунду.



Слика 5.14 Маса убризгана у калуп у функцији од времена [1]

При пројектовању калупа треба имати у виду величину скупљања МИМ делова у фазама обраде које следе након вађења из калупа, тј. уклањања везива и синтеровања. Скупљање комада се емпиријски одређује као линеарно скупљање шипке дужине 26 – 30 mm и ширине 4 – 6 mm. Ако се дужина калупне шупљине означи са L , а дужина шипке након синтеровања означи са L_0 , онда се скупљање израчунава према обрасцу [1]:

$$\delta = \frac{L_0 - L}{L_0}, \quad (5.1)$$

где је δ фактор скупљања. Процентуално смањивање комада се добија када се δ помножи са 100. Често се при пројектовању алата користи фактор експанзије Z , који представља однос почетне и крајње димензије комада [1]:

$$Z = \frac{L_0}{L}. \quad (5.2)$$

Фактор скупљања и фактор експанзије повезани су формулом [1]:

$$Z = \frac{1}{1 - \delta}. \quad (5.3)$$

Захваљујући фактору експанзије конструктор за дати материјал и услове производње може израчунати димензије комада након бризгања, на основу формуле [1]:

$$L_0 = Z \cdot L, \quad (5.4)$$

а дефинисани углови се не мењају у току производње. Након синтеровања, када су промене димензија највеће, помоћу ових формула се коригују димензије калупа, како би се добио комад тражених димензија.

5.1 Одстрањивање везива

За одстрањивање везива се може користити пећ са каталитичким одвајањем (*CD*). Систем за одстрањивање везива садржи два главна састојка – полиоксиметилен (*POM*), који је такође познат као полиацетал или полиформалдехид и полиетилен. *POM*, чија је формула $(-H_2C-O-)_n$, распада се на формалдехид ($H_2C=O$) у присуству азотне киселине између 100 °C и 140 °C и остаје „метални костур“ [1].



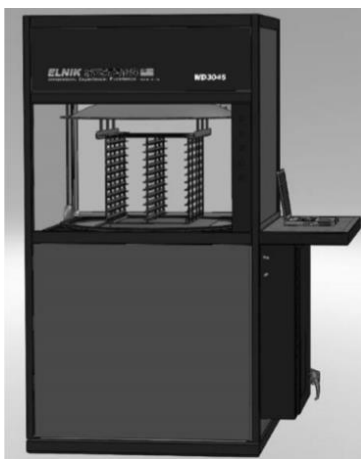
Слика 5.15 Опрема за одстрањивање везива катализом – Elnik Systems [1]

Новоформирани формалдехид је експлозиван у присуству ваздуха, па се користи азотна киселина како би се уклонио сав кисеоник из коморе. Однос паре азотне киселине и азота мора бити испод 4% за правилну каталитичку реакцију. На слици 5.15 приказана је комора за одстрањивање везива марке *Elnik* [1].

Постоје многи произвођачи који праве *CD* пећи и сви они раде по истом принципу. Овакве *CD* пећи су једине које контролише рачунар. Компјутер користи *Excel* прорачунску табелу. Такође, кориснику је омогућено да израђује програме користећи нове променљиве у процесу и омогућава меморисање свих програма који су кориштени. Машина ради на принципу минималног губитка тежине при потпуном одстрањивању везива [1].

У другом случају, постоје машине код којих је радно тело вода. Вода се користи за уклањање везива. На слици 5.16 приказана је једна таква машина. Овде се вода користи за уклањање примарног везива, док секундарно везиво није растворљиво у води. Делови направљени од делова који су растворљиви у води уроњени су у резервоар док се не уклони примарно везиво. Након уклањања везива, они се стављају у пећ да се осуше. За сушење се користе одвојене ваздушне пећи [1].

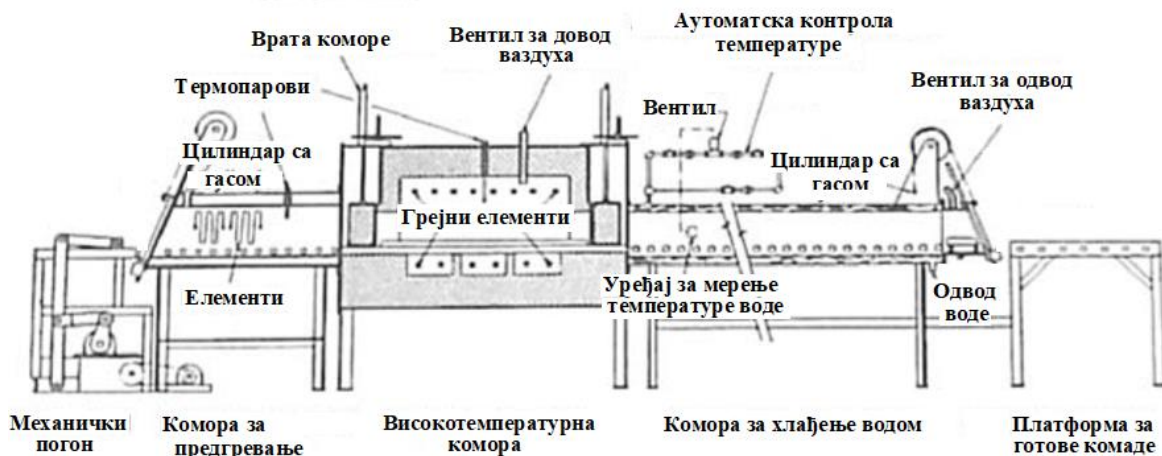
*Elnik Sitem*s је фирма која је преузела овај концепт и прва произвела специјализовани систем за одвајање воде, где се делови суше у истој комори са врућим ваздухом или вакуумом. Јединица омогућава контролу температуре воде до температура од 70 °C. Уређај дозвољава аутоматизовано кретање кроз уграђену *PLC* контролу и рачунар. На слици 5.16 приказана је машина *VD 3045*, која има радну запремину од 127 литара.



Слика 5.16 Машина за уклањање везива са радном запремином од 127 литара [1]

5.2 Опрема за синтеровање

За процес синтеровања све чешће су у употреби континуиране пећи (*continuous furnaces*). Континуиране пећи у МИМ производњи су високотемпературне пећи за синтеровање, које се користе у конвенционалном синтеровању, али су прилагођене за велике количине делова. Оне се надограђују на пећи за одстрањивање везива. Између њих је комора са гасом, која одваја остатке везива ако се задрже након процеса одвајања везива, како везиво не би доспело у комору за синтеровање. Брзина кретања делова мора бити таква да се омогући потпуно одстрањивање везива. Делови се потом транспортују у комору за синтеровање са високом температуром. Температуре које се користе за синтеровање су у распону од 1300 °C до 1400 °C. Затим следи фаза хлађења делова док не напусте комору за синтеровање, како услед наглог хлађења металних делова не би настала крта мартензитна структура. Прве континуиране пећи су направљене у САД-у [1, 6]. Шема такве пећи је приказана на слици 5.17.



Слика 5.17 Шематски приказ континуиране пећи СМ [6]

Континуиране пећи се праве од металне шкољке, унутар које се постављају плоче од опеке које су ватросталне. Стога је потребно неко време како би се у пећи стабилизовала температура, због чега је потребно да прође извесно време након стартовања машине. У масовној МИМ производњи континуирана пећ је најбоља опција. На слици 5.18 приказана је СМ пећ која је потпуно аутоматизована [1, 6].



Слика 5.18 Аутоматизована СМ пећ модела 368-72-3Z [6]

За производњу делова инјекционим брызгањем метала у употреби су коморе са графитним елементима, тз. „графитне пећи“, које су у развоју. Због осетљиве опреме неопходно је стално контролисати унутрашњост коморе помоћу посебних инструмената (слика 5.19).



Слика 5.19 Пећ са графитним елементима [1]

Elnik Sistems је познат по производњи оваквих пећи. На слици 5.20 приказана је пећ која користи молибден у грејној зони. За контролу параметара у самој комори користи се рачунар који је инсталиран поред машине [1].



Слика 5.20 Пећ компаније Elnik Sistems са молибденским елементима [1]

5.3 Параметри процеса

Постоје бројни параметри процеса бризгања, од којих су најважнији [1]:

- Температура калупа и растопа сировине,
- Брзина инјектирања,
- Тренутак замене главног параметра процеса,
- Притисак у калупу и време задржавања и
- Време хлађења.

Приликом обликовања МИМ делова, права комбинација наведених параметара даје комаде који задовољавају критеријуме производног процеса. Параметри процеса су повезани на тај начин да промена вредности једног параметра мора бити испраћена променом вредности других параметра, како би се добили исти услови производње МИМ делова. На пример, повећавање притиска у калупу омогућава боље попуњавање. Међутим, исти ефекат се постиже и ако се повећа брзина инјектирања или температура у калупу [1, 6].

Температура калупа и растопа сировине мора имати вредност која омогућава производњу МИМ комада без оштећења. Оштећења која могу настати услед неодговарајуће вредности температуре процеса су шупљине, грешке на улазном каналу, линије заваривања итд. Температура растопа је обично 10 до 20 °C изнад температуре топљења материјала који има највишу температуру топљења у МИМ смеси. Ниска температура смеше растопа може узроковати лошу течљивост, па се могу видети линије течења на комаду. Такође, при ниској температури, полимер највише тачке топљења се не истопи и долази до издвајања његових честица од остатка растопа, па настају шупљине у

коначно синтерованом делу. До дефеката може доћи и услед прекратког времена мешања. Ниска температура се може одразити на масу зеленог дела [1, 6].

Када температура има већу вредност од оптималне скупљање материјала у калупу се повећава, што може довести до пуцања. Такође, висока температура може узроковати стварање мехура, сагоревање полимера ниске температуре топљења у растопу и на местима контакта са бризгаљком и калупом, при чему се материјал задржава на алату. Ово може створити огромне проблеме у функционисању јединице за бризгање, ако се задржава на прстеновима пужа за бризгање. Температура калупа утиче на то како ће материјал напунити калуп и на производњу делова без грешака. Ниска температура може узроковати недовољно попуњавање калупа и грешке услед течења материјала. Вредност температура топљења за восак (полимер) су 150 до 190 °C, док је температура калупа од 25 до 55 °C. Типичне температуре топљења за каталитичке системе су 200 до 260 °C, а температура калупа 100 до 150 °C [1, 6].

Када је реч о брзини инјектирања, она мора бити већа од брзине инјектирања чистих полимера. Разлог за то је већа проводљивост МИМ смеше у односу на чисте полимере, због присуства металних честица. Мала брзина инјектирања може изазвати дефекте – видљива линија течења, линија заваривања и недоливеност. Превелике брзине инјектирања могу довести до издвајања праха и везива у смеси, која даје шупљине и порозност. Такође, велика брзина убризгавања онемогућава одвођење ваздуха из калупа, па се тако ваздух у облику мехурића може наћи заробљен у телу зеленог дела, што је веома непожељна појава код МИМ делова [1, 6].

Најбоља опција је да за прву фазу инјекционог бризгања, где се попуни 98% запремине калупа, главни параметар процеса буде брзина бризгања, а за преостала 2% запремине главни параметар процеса буде померање калупа. Постоје четири главна параметра процеса који се смењују током бризгања [1]:

- Позиција,
- Хидраулички притисак,
- Време и
- Притисак у калупу.

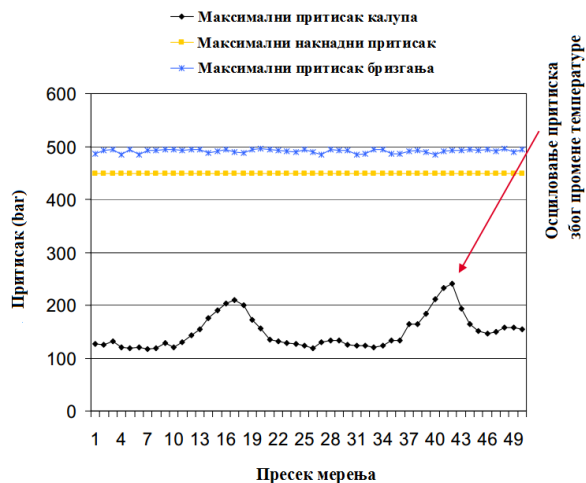
Притисак у калупу је веома битан параметар. Унутар калупа постоје сензори који мере притисак и када достигне одређену вредност, врши се промена главног параметра, па се уместо брзине контролише померање калупа. На тај начин се калуп правилно попуњава и избегавају шупљине. Како би се остварила промена са једне контроле на другу, неопходно је да свака компонента алата садржи уређаје који препознају рад сензора [1, 6].

Главни параметар процеса контролише остале параметре у процесу. Кретање пужног клипа унутар цилиндра се прати помоћу линеарних претварача, који сигнализирају да је пуж у одређеном положају. Ова техника обезбеђује да пужни клип достигне исти положај у одређеном временском тренутку и онемогућава грешке. Услед

оваквог праћења кретања помоћу сензора, остали сигурносни контролници, као што су обртни момент пужног преносника и притисак клипа приликом транспорта сировине омогућавају да не дође до оштећења пужног преносника [1, 6].

Тренутак замене главног параметра је веома битан за цео производни процес. Тренутак промене из контроле брзине у контролу притиска као параметра процеса је веома карактеристичан. Приликом транспорта кроз цилиндар, материјал може имати различите притиске због другачијег понашања растопа материјала. Измењивач хидрауличног притиска узима вредност притиска у јединици за бризгање као сигнализатор за притисак који је потребан у калупу. Уколико дође до квара контролног прстена, клип – пуж неће заузимати исти положај за исту вредност притиска, што може довести до бројних проблема и дефеката производа [1].

Притисак у калупу и време задржавања су параметри од којих зависи пуњење калупа. На пример, притисак у калупу се мења како би се постигло правилно попуњавање калупа. Имајући у виду геометрију алата, притисак није исти у свим деловима калупа. За попуњавање танких пресека неопходно је да притисак има већу вредност приликом испуњавања тог дела сировином, након чега је потребна мања вредност притиска како би се у том делу формирао правилан облик. Из тог разлога је неопходна промена притиска у калупу током времена. Време задржавања у калупу зависи од времена очвршћивања уливног канала. Мала вредност притиска узрокује недоливеност и шупљине. Превелико време задржавања у калупу може створити заостале напоне у зеленом делу, који изазивају бројне проблеме током каснијих процеса одстрањивања везива и синтеровања [1, 4].



Слика 5.21 Притисци у калупу и јединици за бризгање [4]

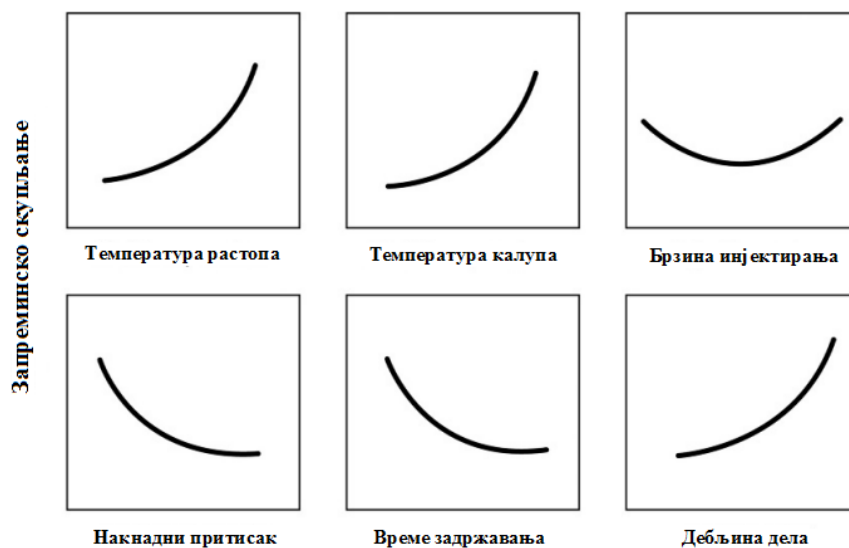
Време хлађења комада у калупу је важно да би се осигурало правовремено избацивање зеленог дела из калупа. Уколико је време хлађења дуже или краће од оптималног, део може претрпети већа оштећења приликом вађења из калупа. Краћа времена хлађења су понекад и пожељна, јер одржавају еластичност појединих делова

комада, тако да се без оштећења може извадити из калупа, услед недовољног очвршћавања и крутости. Након вађења МИМ дела из калупа, алат мора да се врати на првобитну температуру како би се припремио за следећи производни циклус [1, 6, 4].

5.3.1 Запреминско скупљање

Једна од основних карактеристика МИМ делова је велико скупљање и одступање у димензијама делова на почеку и крају производног процеса. То у великој мери компликује начин производње и ограничава употребу МИМ технологије. Из тог разлога велику пажњу треба посветити изучавању запреминског скупљања комада током производње. Предвидети запреминско скупљање комада значило би правилно пројектовање. На процес скупљања делова утиче температура растопа. Како температура расте, расте и температура алата калупа и дебљина дела, па се повећава и количина скупљања. Коефицијент запреминског ширења и скупљања смеше зависи од полимера у смеси, јер су полимери веома стишљиви на високим температурама у стању растопа [1, 2, 6].

Поред температуре, на стишљивост утиче време задржавања комада у калупу, као и притисак у калупу. Повећани притисак калупа смањује запреминско скупљање зеленог дела. На слици 5.22 приказани су дијаграми зависности запреминског скупљања комада од различитих параметара током процеса бризгања МИМ делова. Треба приметити велику сличност ових дијаграма са дијаграмима код инјекционог бризгања пластике [1, 2, 6].



Слика 5.22 Скупљање дела у зависности од различитих параметара процеса [1]

Квалитет МИМ делова у великој мери зависи од поступка бризгања. Због тога је важно да се разлике у температури и притиску у свим деловима калупа смање на најмању могућу вредност. Када су у питању сложенији делови, овај проблем се решава тако што су

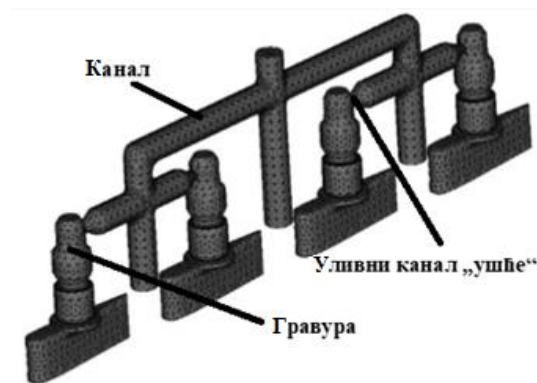
путеви сировине до сваке шупљине у калупу приближно исти, тј. преферира се симетрична гравура у калупу. Пожељно је да се у калупу налази велики број сензора који омогућавају праћење температуре. Повратне информације из ових сензора регистроване на рачунару омогућавају подешавање параметара као што су притисак и температура, које уносимо у систем и поново контролишемо. На тај начин ове параметре можемо одржавати константним док траје процес бризгања [1, 2, 6].

5.3.2 Фазе попуњавања калупа и деловања накнадног притиска

За анализу фаза попуњавања калупа неопходно је дефинисати улазне податке, као што су [13]:

- Облик и димензије компоненте,
- Параметри рада машине,
- Својства материјала алата,
- Параметри процеса.

При одређивању геометрије неопходно је дефинисати мрежу коначних елемената. Она обухвата све структуре које се формирају у калупу при бризгању. Мрежа коначних елемената приказана је на слици 5.23 [13, 14].



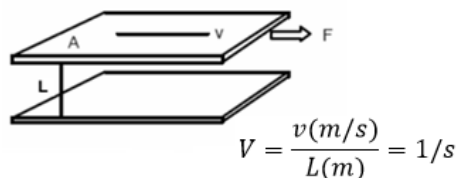
Слика 5.23 Мрежа коначних елемената [13]

За описивање и анализу пуњења потребно је описивање основне карактеристике МИМ материјала, а то је његова вискозност. Вискозност је унутрашњи отпор течности и игра веома важну улогу у процесу бризгања. Вискозност зависи од [15]:

- Врсте материјала,
- Температуре и
- Брзине смицања.

Вискозност која се јавља између сва слоја има одређену брзину смицања. За одређивање брзине смицања неопходно је познавати растојање између та два слоја и

вредност силе вискозности [15]. Шема за одређивање брзине вискозности дата је на слици 5.24.



Слика 5.24 Шема смицања и брзина смицања [16]

За описивање вискозности у зависности од температуре и брзине смицања најчешће се користи модел другог реда [14]:

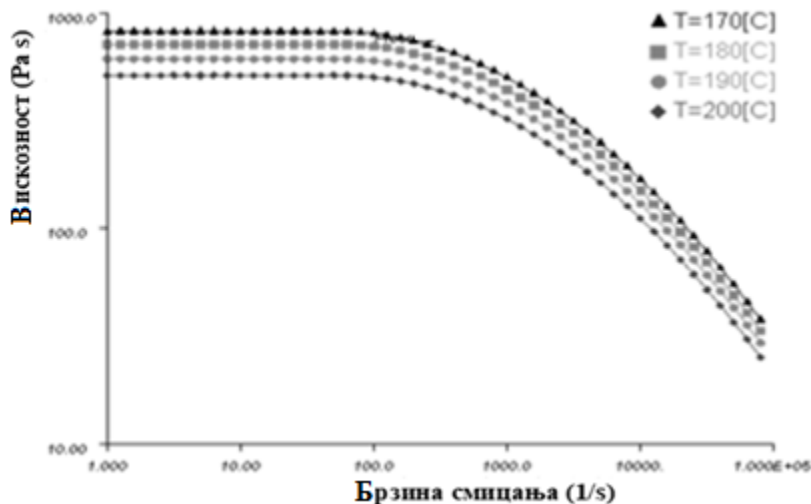
$$I_n(\eta) = A + BI_n(\gamma) + CT + D[I_n(\gamma)]^2 + EI_n(\gamma)T + FT^2, \quad (5.5)$$

где су: η -вискозност; γ – брзина смицања; T –температура; A, B, C, D, F – коефицијенти вискозности; Материјал који се испитује носи ознаку *BASF CATAMOLD 310N*. Везиво је базирано на полиацеталу са полиетиленом, чији је састав након синтеровања:

Табела 8. Састав материјала *BASF CATAMOLD 310N* [14]

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

Карактеристике вискозности за распон температура од 170 до 190 °C приказане су на следећем дијаграму, а добијене експерименталним путем [14].

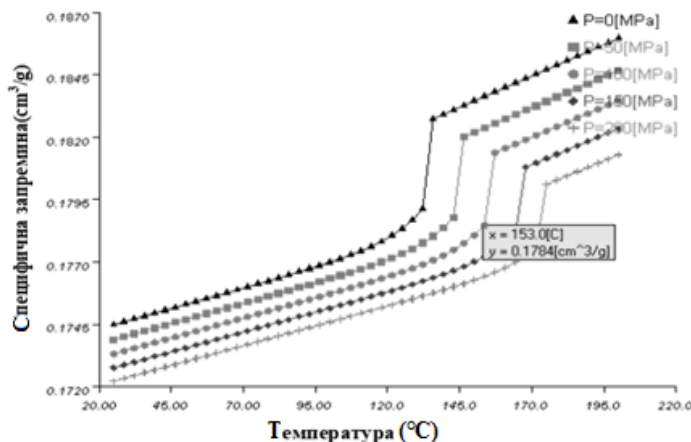


Слика 5.25 Вискозност у функцији температуре и брзине смицања [14]

Да би се описао процес формирања дела, неопходно је описати понашање запремине у зависности од притиска и температуре. Промена запремине у зависности од притиска и температуре дата је следећим изразом [14]:

$$V(T, P) = V_0(T) \left[1 - CI_n \left(1 + \frac{P}{B(T)} \right) \right] + V_t(T, P), \quad (5.6)$$

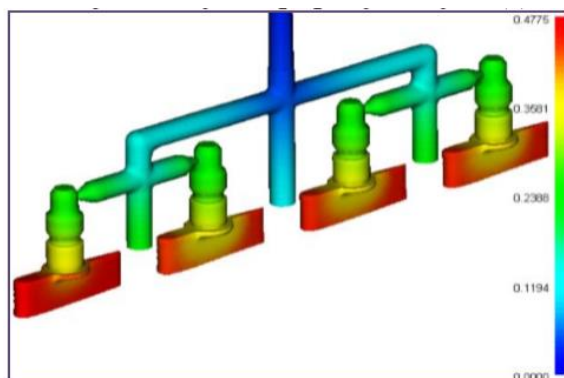
где су: $V(T, P)$ – специфична запремина на температури T и притиску P ; V_0 – специфична запремина на нула притиску; T – температура; P – притисак; $C=0.0894$ – константа; B – осетљивост материјала на притисак;



Слика 5.26 Зависност специфичне запремине од температуре за различите вредности притиска [14]

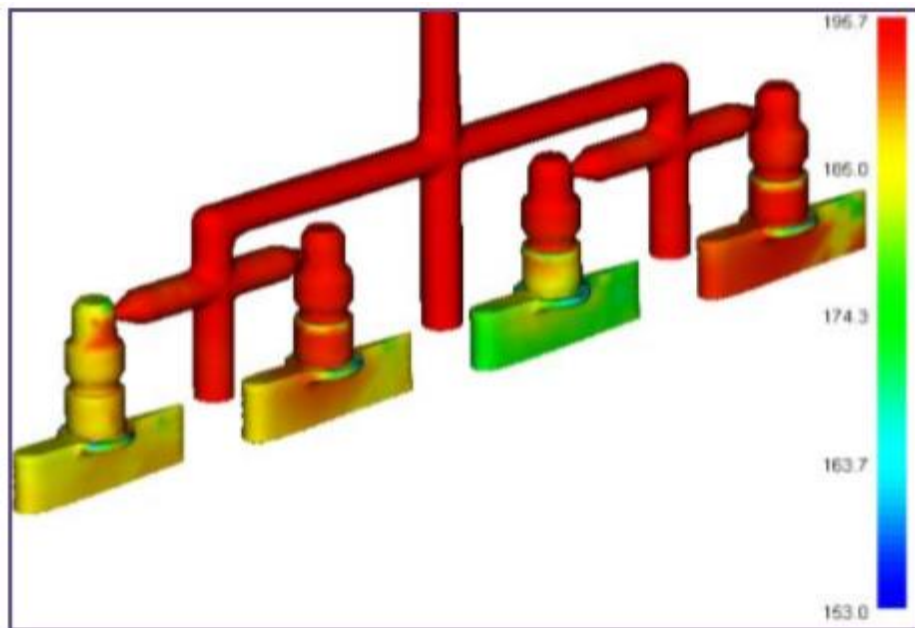
Након успешног дефинисања почетних услова, неопходно је анализирати расподелу температура унутар калупа, расподелу притиска и време попуњавања калупа. Време инјектирања је време које је потребно да се калупна шупљина испуни у потпуности. Пожељно је да процес траје што краће, најчешће до једне секунде. Дуже време попуњавања захтева мању брзину бризгања а резултира бржем очвршћавању *feedstock*-а са повећањем вискозности. Краће време инјектирања захтева веће брзине инјектирања које захтевају дуже одржавање температуре *feedstock*-а [14].

Када је реч о времену попуњавања калупне шупљине, компоненте се не попуњавају истовремено и постоје подручја отежаног течења материјала (5.27).



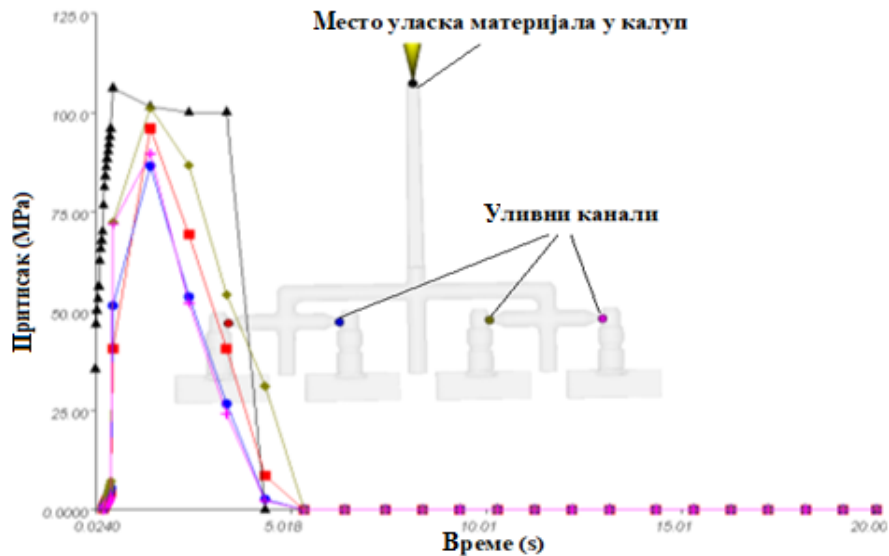
Слика 5.27 Разлике у времену попуњавања делова калупа са легендом [14]

Поред времена попуњавања друго важно својство понашања материјала је расподела температурског поља. На следећој слици приказана је расподела температура на крају попуњавања калупа. Изузетно вруће зоне указују на повишено смицање, јављају се на карактеристичним местима и око уливног канала. Хладна места указују на отежано попуњавање. Веће температуре јављају се при вишим брзинама инјектирања због краћег времена попуњавања. Веће температуре јављају се и због повећаног трења између честица металног праха, које се повећава при већим брзинама инјектирања. Будући да се *feedstock* брже хлади у подручјима ближе контакту са унутрашњим деловима калупа, температура спољашње површине је нижа од температуре у унутрашњости дела. Када се заврши фаза попуњавања, наступа фаза накнадног притиска. У тој фази се у калупну шупљину инјектира нова количина материјала веће температуре, која уноси нову количину топлоте у калупну шупљину, чиме се одржава виша температура у појединим подручјима [14]. Деловањем накнадног притиска и одржавањем температурног поља спречава се прерано очвршћавање улазног канала (слика 5.28).



Слика 5.28 *Расподела температуре на крају процеса пуњења калупа (°C) [14]*

Притисак у калупу делује на крају фазе пуњења и у периоду накнадног дејства. Максимални притисак се увек јавља на месту убризгавања материјала у калуп. Већина машина за инјекционо брызгање није опремљена сензорима за праћење притиска и то је основни проблем код ове методе. Веће вредности и дуже време деловања притиска узрокује отежано избацивање из калупа, као и заостала напрезања у том делу. Поред тога, постоји и разлика у притиску у уливним каналима који су исте конфигурације, што објашњава понекад другачија својства различитих делова и оштећења. На слици 5.29 приказана је различита вредност притисака за различита места у алату, тј. неједнака расподела притисака у калупу, због које се јављају накнадни проблеми и потреба за додатном обрадом комада [14].



Слика 5.29 Расподела притиска у различитим деловима калупа [14]

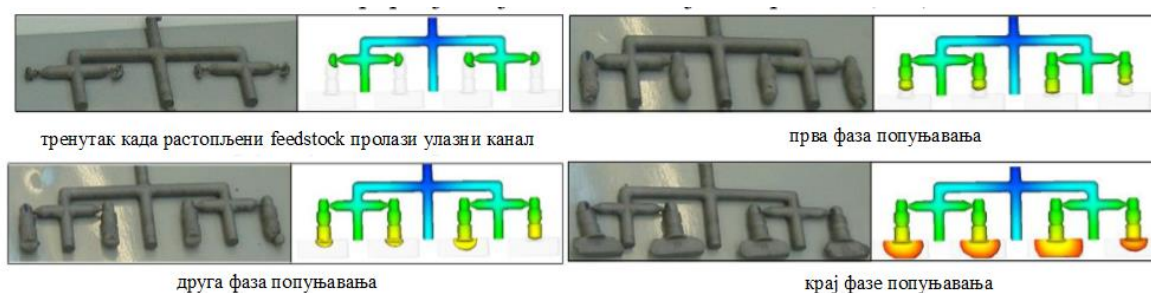
Експеримент инјекционог пресовања метала је рађен на машини *ARBURG 320C*. Параметри рада машине дати су у табели 9.

Табела 9. Улазни подаци процеса [14]

Параметри	Јединица	Ниво 1	Ниво 2	Ниво 3
Температура алата	°C	110	120	130
Брзина инјектирања	cm ³ /s	5	10	15
Накнадни притисак	bar	900	1000	1100

Остали подаци [14]:

- Температура *feedstock*-а – 195 °C;
- Време инјектирања – 20 s;
- Време деловања накнадног притиска – 20 s;
- Време хлађења – 20 s;
- Температура околине – 20 °C;



Слика 5.30 Фазе пуњења калупа [14]

На основу анализе утврђено је да већа брзина инјектирања повећава отпоре течењу а тиме и потребан притисак, док мања брзина даје растопљеном материјалу више времена

за очвршћавање, што смањује попречни пресек разводних канала и повећава вискозност, што поново доводи до потребе за већим притисцима. Решење је оптимална брзина, која треба да буде довољно мала да смањи хидродинамичке отпоре течењу, а довољно велика да спречи прекомерно хлађење и очвршћавање и пораст притиска.

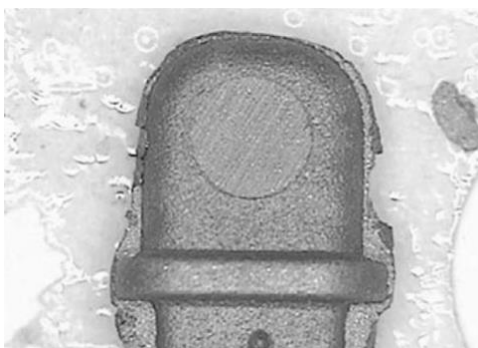
6. Дефекти код МІМ делова. Линеарно скупљање. Дилатационе промене након синтеровања

Као и код ливења, током МІМ производње могу настати разне врсте грешака, које могу бити последица неисправности алата или због параметара процеса. Заостали напони могу представљати велики проблем ако се не открију на време, грешке које праве алати су веома честе због великих притисака, а грешке због МІМ смеше настају када се метални прах одвоји од везива [1, 6].

Грешке које настају у току МІМ производње могу се сврстати у неколико група [1, 6]:

- Заостали напони,
- Цурење на саставу калупа,
- Одвајање праха од везива,
- Други дефекти.

У већини случајева грешке код делова узрокују алати и њихова неадекватна употреба. Код МІМ производње то су углавном калупи. Грешке могу настати када се промене димензије калупа у току самог процеса и уколико постоји зазор између алата. За производњу МІМ сложене геометрије потребни су калупи са сложеном гравуром. Такође, приликом производње оваквих делова користе се велики притисци у калупу. Услед великих притисака могу настати грешке као што је цурење на саставу калупа, приказано на слици 6.1 [1].

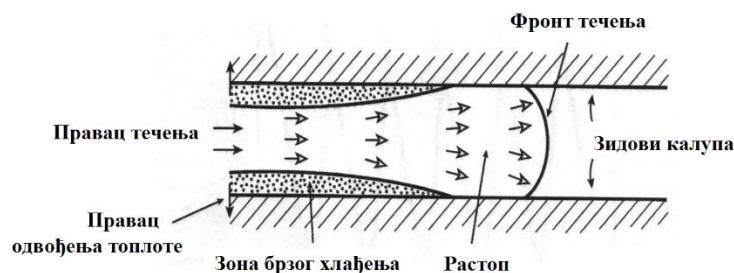


Слика 6.1 Венац услед цурења на саставу калупа [1]

Овакав тип грешака је понекад тешко предвидети. У току самог процеса велики притисци у калупу могу изазвати пластичну деформацију калупа, па се појављују зазори

кроз које материјал излази из калупа. Грешке се манифестују линијама на месту где се састављају алати, а код већих грешака се око зеленог дела образује венац (слика 6.1). Понекад се због ове појаве користе мањи алати, код којих је и деформација изазвана великим притисцима мања [1].

Током процеса инјекционог бризгања калуп мора да се загрева на одређену температуру како не би дошло до образовања непожељних мартензитних структура метала, који је у додиру са калупом. Ипак, температура језгра увек је већа од температуре спољашње стране дела, који је у додиру са калупом [1, 4]. На слици 6.2 могу се видети зоне које се брже хладе у додиру са алатом.



Слика 6.2 Критичне зоне при попуњавању калупа [4]

Заостали напони код МИМ делова су уобичајена појава. Могу бити у облику термичких и структурних напона, а јављају се услед неодговарајућих параметара процеса производње. Наиме, термички напони настају као последица додира растоп метала и хладних површина алата. Из тог разлога алат не сме бити на собној температури, него се загрева. Такође, они могу настати и због других околности, нпр. због великих притисака. Материјал сировине се током МИМ поступка много пута деформише, па је постојање заосталих напона неминовно [1].



Слика 6.3 Иницијална прсина услед заосталих напона [1]

Када је реч о заосталим напонима, највећи проблем је у томе што се они откривају тек у каснијим корацима производње. Код делова добијених инјекционим бризгањем метала, заостали напони се откривају после одстрањивања везива. Такође, заостали напони могу изазвати мале прсине, које се могу уочити само помоћу ултразвука, а које могу да доведу до лома у експлоатацији [1].

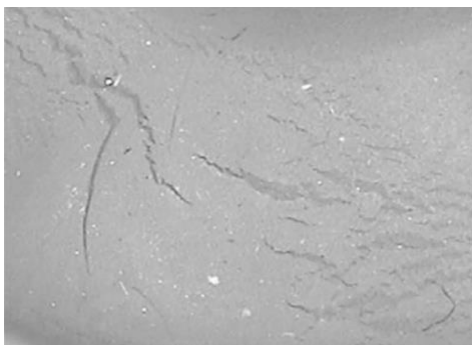
Одвајање металног праха од везива је још једна појава карактеристична за делове који се производе МИМ технологијом. Она настаје у тренуцима убризгавања масе у калуп и током деловања накнадног притиска. Одвајање везива од праха настаје када се због веће вискозности металне честице задржавају – успоравају на уским пресецима калупа, док честице везива пролазе кроз исти пресек већом брзином. Са друге стране, у периоду дејства накнадног притиска, честице везива због мањег трења лако попуњавају регије малих пресека у калупу, као и места контакта алата и сировине (површина комада) [1, 4].

Све ово доводи до неједнаке расподеле металног праха и везива у производу, тј. слабих подручја са већом концентрацијом везива и мањом концентрацијом металног праха. Ако је на површини дела восак доминантан, може доћи до одвајања комплетне површине, као што је приказано на слици 6.4.



Слика 6.4 Одвајање површине дела при бушењу услед мале концентрације металних честица у том подручју [1]

Ова појава се може ублажити накнадном обрадом као што је пескарење, што додатно компликује и поскупљује процес производње. У складу са горе поменутих, све већи значај се придаје везивима, тј. развоју нових материјала везива [1].

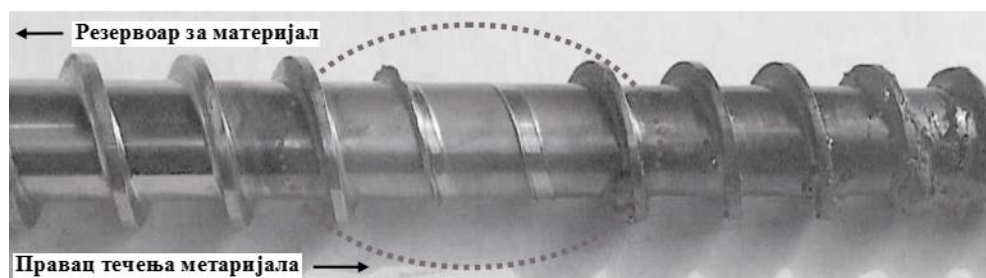


Слика 6.5 Линије течења материјала [1]

Осим наведених, код МИМ бризгања се могу јавити и други дефекти, које изазивају параметри процеса, слично као код бризгања пластике. Услед недовољног притиска у калупу поједине зоне калупа могу остати празне. Резултат тога је зелени део који не прати

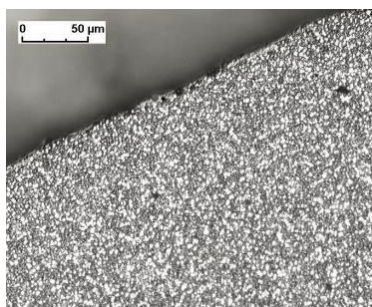
гравуру калупа. Услед ниске температуре у калупу или бржег хлађења појединих зона могу настати линије течења, које су приказане на слици 6.5 [1].

У току процеса производње не долази само до оштећења МИМ делова, већ и до оштећења алата који се користе у МИМ производњи, као што су јединица за бризгање и калупи. На слици 6.6 приказан је један такав пример оштећења [4].



Слика 6.6 Абразивно хабање клипа након једне године рада [4]

Због веома агресивне средине и високих температура може доћи до разних врста оштећења пужа за инјекционо бризгање. Нека од њих су адхезивно, корозивно, заморно и абразивно хабање [4, 15].



Слика 6.7 Ситнозрнаста структура отпорна на абразију [4]

Ради спречавања оваквих врста оштећења развијали су се различити материјали алата за инјекционо бризгање, као и превлаке. Нарочито се посвећивала пажња развоју материјала површинског слоја отпорног на абразивно хабање. То су превлаке са ситнозрномом структуром, приказано на слици 6.7 [4].

6.1 Линеарно скупљање и PVT ефекат

Приликом димензионисања алата за инјекционо бризгање неопходно је упознати се са особинама материјала сировине, а нарочиту пажњу треба посветити изучавању линеарног скупљања комада. У зависности од вредности линеарног скупљања, конструише се калуп који се повећава за ту вредност скупљања комада. Линеарно

$$Y_S = 1 - \left(\frac{\Phi}{\rho/\rho_t} \right)^{1/3} \quad (6.1)$$
$$Z_c = \frac{1}{1 - Y_c} \quad (6.2)$$

47

На слици 6.8 приказан је PVT дијаграм који прати материјал током производног циклуса, од тренутка кад је материјал у стању растопа до собне температуре. Запреминско скупљање комада (од 4 до 5 на дијаграму) се завршава када произведени МІМ део достигне стање равнотеже [1].

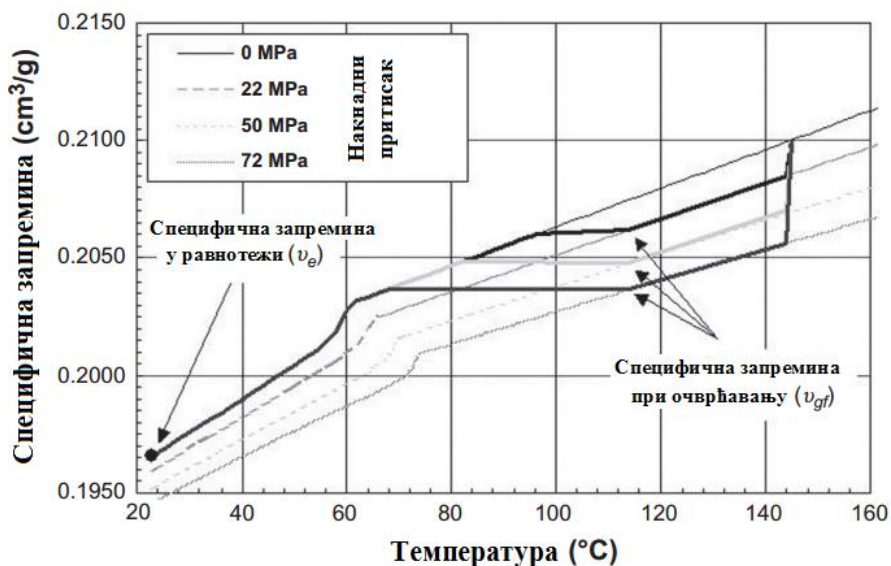
Приликом конструкције алата, најзначајнија особина је линеарно скупљање комада, које се добија на основу запреминског скупљања. Ако се специфична запремина комада у равнотежи означи са v_e , а специфична запремина на почетку очвршћивања растопа са v_{gf} , запреминско скупљање комада S_v се рачуна на основу следећег израза [1]:

$$S_v = 1 - \left(\frac{v_e}{v_{gf}} \right). \quad (6.3)$$

На основу израза 6.3 израчунава се линеарно скупљање комада:

$$Y_S = 1 - (1 - S_v)^{1/3} \quad (6.4)$$

Скупљање се може контролисати познавањем особина материјала који се обликује. Поред тога, од изузетног је значаја познавати зависност параметара који утичу на запреминско скупљање. На слици 6.9 приказана је једна таква зависност између накнадног притиска и температуре на запреминско скупљање комада [1].

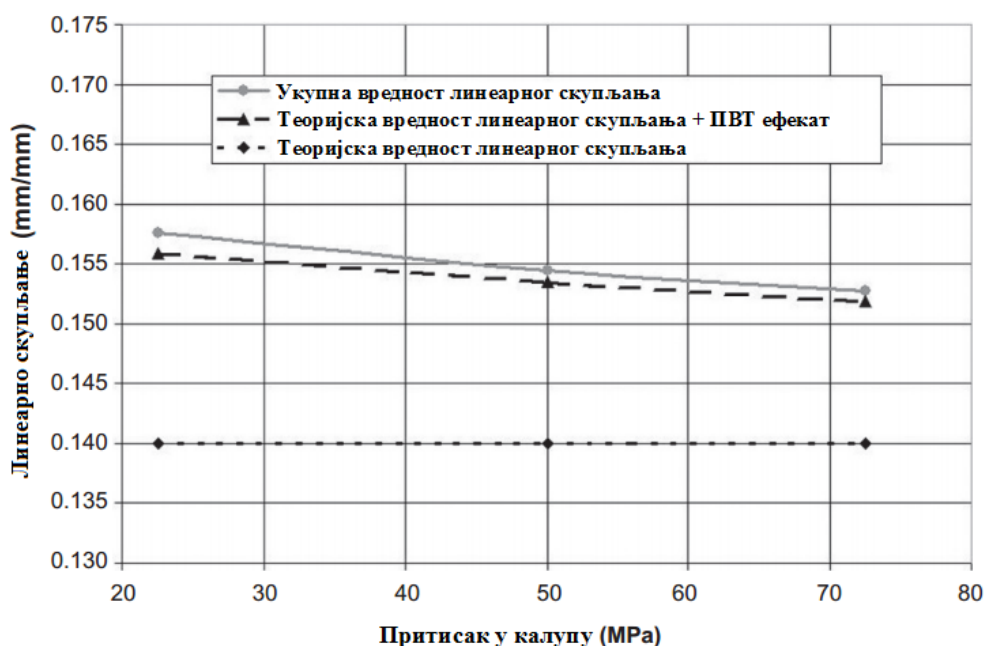


Слика 6.9 PVT дијаграм – специфична запремина у функцији притиска за материјал сировине од карбонилног гвожђа [1]

На основу дијаграма може се закључити да већа вредност накнадног притиска доводи до повећања специфичне запремине комада.

Следећи корак у проучавању МИМ процеса јесте усаглашавање понашања теоријског МИМ модела са реалним делом. При прорачуну укупног скупљања комада, треба имати на уму линеарно скупљање комада, о коме је раније било речи, као и PVT ефекат [1, 7].

PVT ефекат је запреминско скупљање комада које се додаје линеарном скупљању како би се добила укупна вредност скупљања на крају. На слици 6.10 приказано је скупљање комада у функцији притиска у калупу [1].



Слика 6.10 Упоредни приказ теоријског линеарног скупљања и укупног линеарног скупљања у реалним условима [1]

Поређењем вредности теоријског линеарног скупљања, које се рачуна на основу формуле 6.1 и скупљања након синтеровања, примећује се велика разлика у предвиђању резултата, па се PVT ефекат мора узети у обзир. Понекад је вредност сабраног теоријског линеарног скупљања и PVT скупљања већа од укупне вредности линеарног скупљања, што није случај на дијаграму.

Рад на истраживању линеарног скупљања и предвиђање резултата омогућава правилно конструисање МИМ алата и делова, као и технолошког процеса. Појава линеарног скупљања је у тачки 6. окарактерисана формулама, а у наставку ће бити речи о практичном примеру и мерним инструментима за испитивање скупљања МИМ делова.

6.2 Карактеристике MIM делова након синтеровања и дилатационе промене

Промена запремине синтерованог комада, тј. скупљање након синтеровања, испитује се помоћу вертикалног дилатометра. Дилатометар је, уопштено речено, мерни инструмент који се користи за мерење промене запремине или волумена предмета због загревања или неких других физичких и хемијских процеса [7].

За потребе овог експеримента коришћен је дилатометар типа „SETSYS evolution“. У овом случају врши се мерење скупљања комада који се синтерује након инјекционог бризгања. У експерименту се врши мерење једноосног скупљања помоћу наведеног дилатометра [7]. У питању је уређај који поседује мерно језгро, чији се део са узорком греје помоћу грејача. Овај уређај поседује једну или две шипке, у зависности од модела, које служе као пипци који су у додиру са узорком чија се дилатација мери. Ове шипке или пипци у контакту су са мерачем који је ван пећи. Цело мерно језгро са штаповима израђено је од алуминијумовог оксида (Al_2O_3).



Слика 6.11 Дилатометар „SETSYS evolution“ [7]

Мерење промене линеарних димензија узорка се врши диференцијално, као разлика између почетне и крајње дужине шипке или пипка. Регистровање овог померања врши се помоћу линеарног варијабилног диференцијалног трансформатора, који носи ознаку LVDT. Овај трансформатор садржи један примар, два секундара и покретно језгро. У табели 10. дате су основне карактеристике овог дилатометра [7].

Табела 10. Карактеристике дилатометра „SETSYS“ [7]

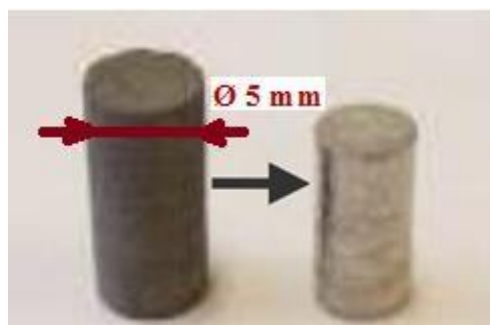
Распон температура (°C)	0-2400
Максимална величина узорка (mm)	50
Резолуција (μW)	0.4
RMS (μW)	20
Запремина суда (μL)	30-100

Примар је прикључен на стални извор једносмерне струје, а положај језгра утиче на магнетни флуks кроз оба секундарна кола. Секундари су унакрсно везани, па је струја кроз електрично коло у коме су везани линеарно зависна од померања језгра.

Епрувета за испитивање је добијена поступком инјекционог бризања метала, чији је метални прах од нерђајућег челика са ознаком 316 L. Од тог материјала је уз додатак везива и других адитива добијен зелени комад цилиндричног облика, висине 10 mm и ширине 5 mm [7].

У овом експерименту коришћена су три узорка са запреминским уделом металног праха од 62%, 64% и 66% . У експерименту се показало да ова карактеристика има изразити утицај на коефицијент скупљања узорка [7].

Током процеса синтеровања комада, прати се промена дужине узорка по оси која пролази кроз шипку за притискивање, тј. мерни пипак и комад. Промена димензија прати се у току загревања узорка на температуру синтеровања, када започиње промена његових димензија, тј. скупљање. Мерења су вршена за три различита узорка и три различите брзине загревања – 5 °C/min, 10 °C/min и 15 °C/min. На слици 6.12 приказана је епрувета које је кориштена за испитивање линијског скупљања [7].



Слика 6.12 Приказ промене димензија епрувете [7]

На основу промене дужине комада по оси, добија се линијско скупљање комада, а коефицијент линијског скупљања може да се представи формулом [7]:

$$a_L = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}, \quad (6.5)$$

где је L почетна дужина, а dL/dT промена дужине у зависности од температуре синтеровања. Синтеровање се одвија у затвореној и изолованој средини (вакууму), где се константно прати промена температуре унутар коморе за синтеровање. До спајања металних зрна долази услед смањивања површинске енергије честица праха, те због губања атома при високим температурама у зони додира честица. До смањивања волумена, тј. запремине комада, долази услед смањивања порозности зеленог несинтерованог комада након синтеровања [7].

Табела 11. Састав челика металног праха [7]

316 L						
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
0.03	2.0	0.75	0.045	0.03	16-18.0	2.0-3.0

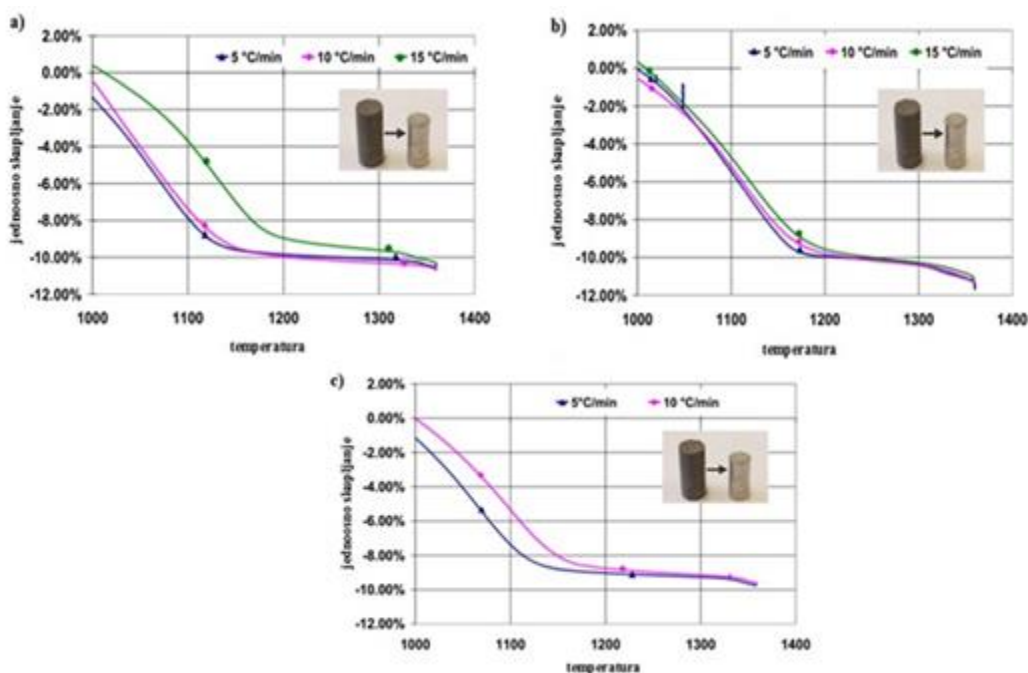
Као што је раније споменуто, овај експеримент је спроведен како би се пратило понашање материјала 316 L у току синтеровања, а у табели 11. приказане су компоненте његовог састава. Удео појединих хемијских елемената дат је у процентима.

Треба напоменути да је за процес синтеровања од великог значаја и структура материјала, тј. сировине за инјекционо бризгање метала. У табели 12. приказана су својства сировине металног праха који се испитује [7].

Табела 12. Својства испитиваног комада [7]

D50 (μm)	3.4
PVL (%)	62
	64
	66

Када је реч о сировини металног праха од ког је сачињен радни комад, велики утицај на својства материјала има величина честица металног праха. За потребе овог експеримента коришћена су три узорка сачињена од материјала који има величину честица металног зрна $3,4 \mu\text{m}$ (50%), са запреминским уделом 62%, 64% и 66% респективно. Следећа три дијаграма (a,b,c) на слици 6.13 приказују зависност једноосног скупљања епрувете од температуре синтеровања [7].



Слика 6.13 Дијаграми зависности једноосног скупљања од температуре за различите вредности концентрације металног праха [7]

На дијаграмима се могу видети различите брзине загревања током синтеровања, изражене у $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, као и утицај тих брзина на једноосно скупљање материјала. Материјал

за бризгање који има 66% концентрације металног праха показао је најбоља својства, тј. најмању промену димензија или најмању толеранцију у димензијама. Како се смањује концентрација металног праха у материјалу комада, тако су добијене интензивније промене у запремини, па самим тим и веће скупљање. Нај основу претходног дијаграма може се установити неколико међузависности [7]:

- Скупљање почиње да се јавља на око 1000°C и нагло расте изнад 1050 °C до 1200 °C. Након те температуре скупљање материјала је доста мањег интензитета, када је промена дужине узорка занемарљива;
- При истој температури синтеровања добијају се већа скупљања узорака са мањом концентрацијом металног праха;
- Највећа густина је добијена са најмањом брзином загревања;

На основу резултата добијених током овог експеримента, може се закључити да постоје одређене димензионе промене комада који се синтерује на рачун повећања његове густине у току синтеровања. Значај овог експеримента је у дефинисању параметара у току синтеровања (температура, брзина загревања, концентрација металног праха) који дају производе најбољег квалитета, тако и дефинисање најбољих услова за производе. Када је у питању материјал металног праха 316 L, основни закључци након експеримента су:

- Већа концентрација металног праха смањује коефицијент скупљања у току синтеровања;
- Мања брзина загревања у току синтеровања даје већу густину комада;
- Линеарно скупљање комада се нагло смањује када температура синтеровања пређе 1200 °C, а на температури већој од 1300 °C густина почиње да расте;

Један од основних проблема код производа који се добијају поступцима металургије прахова јесте управо порозност, па самим тим и мала отпорност на динамичка оптерећења [2, 6]. Производи добијени металургијом праха приказани су на слици 6.14.



Слика 6.14 Делови добијени МИМ поступком [17]

Примена производа ове технологије је у великој мери ограничена, управо због наведене мале отпорности на динамичка оптерећења и промене запремине током синтеровања, односно велике толеранције димензија.

7. Експериментално истраживање

Испитивање карактеристика делова који се добијају металургијом праха је веома важан корак за даље развијање ове технологије. Као што је већ поменуто, постоје бројне предности оваквог начина производње у односу на друге, али има и недостатака који ограничавају употребу ових делова. Постоји велики број истраживања у циљу побољшања карактеристика делова који се добијају технологијом инјекционог бризгања прахова, заснованих на испитивању запреминског скупљања и отпорности на динамичка оптерећења. У оквиру овог рада извршено је прикупљање података о триболошким карактеристикама делова добијених МИМ технологијом.

7.1 Циљ истраживања и начин спровођења експеримента

Како би се боље упознале триболошке карактеристике делова који се добијају бризгањем метала, потребно је прикупити податке о основним величинама које карактеришу понашање материјала унутар триболошког система, а то су коефицијент трења и ширина трага хабања. Опрему за испитивање чине трибометар *TR-95*, контактни пар на трибометру (плочица и диск) и универзални мерни микроскоп *UIM-21*. Испитивање је обављено у лабораторијским условима. Како би се добили што реалнији резултати, испитивање коефицијента трења и ширине трага хабања вршено је за три различите вредности нормалне силе F_n и три различите вредности брзине клизања v – укупно девет мерења. Сваки од узорака се оптерећује нормалном силом од 3 N, 6 N и 10 N, при брзини клизања 0.25 m/s, 0.5 m/s и 0.75 m/s. Приликом испитивања се на узорцима праве по три трага хабања.

7.2 Мерна опрема

7.2.1 Трибометар TR-95

Компјутерски подржан трибометар *TR-95* је намењен за триболошка испитивања одређивања силе и коефицијента трења за одговарајуће контактне услове – нормално оптерећење и брзину клизања, према *ASTM G77* стандарду. Испитивања се могу вршити у условима са подмазивањем и без подмазивања. Овакав трибометар омогућава варирање услова контакта триболошког пара са аспекта облика, димензија и материјала, нормалног контактнег оптерећења и брзине клизања. Основну конфигурацију трибометра чине [18]:

- Погонски систем,
- Систем за оптерећење,
- Систем за вођење,
- Систем за подмазивање,
- Систем за самоподешавање блока и
- Мерни систем.

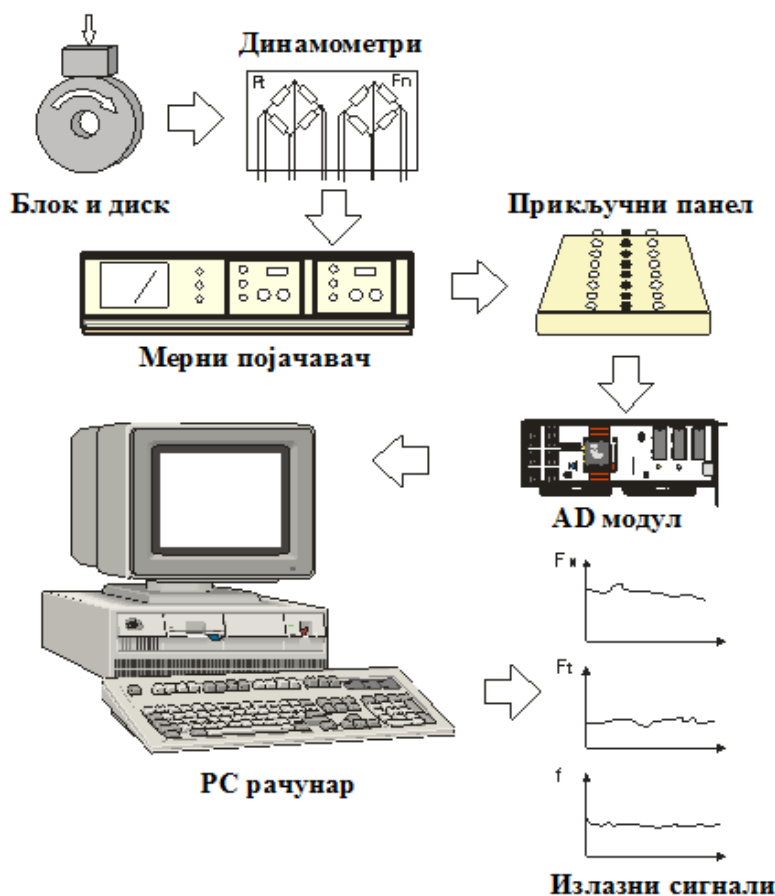
Погонски систем се састоји од електромотора са ременицама, каишем и варијатором, који омогућавају варирање бројева обртаја од 100 до 1200 обртаја у минути. На главном вратилу се налази ротациони диск [18].

Систем за оптерећење помоћу тегова или навојног пара омогућава оптерећење контактних парова од 0 до 50 daN. Вођење се остварује помоћу линеарних ваљкастих лежајева, код кога нема зазора услед преднапрезања [18].

Систем за подмазивање чине посуде за мазиво или систем за довод уља у зону контакта [18].

Систем за самоподешавање блока и диска има улогу да у сваком тренутку обезбеди преношење нормалног оптерећења у правцу осе диска и контакт целом дужином блока на диску. То омогућава специјални ротирајући носач блока.

Мерни систем за испитивање се састоји од динамометара, мерног појачавача, прикључног панела, AD претварача и РС рачунара [18].



Слика 7.1 Шема мерног система трибометра TR-95 [18]

Мерни систем омогућава мерење нормалне силе притиска и силе трења. Измерени сигнали са давача сила се појачавају и уводе у рачунар помоћу двоканалног мерног моста - појачавача и A/D конвертора. Пре почетка мерења се врши калибрација динамометара.

Коефицијент трења као рачунски сигнал се добија преко нормалне силе (F_n) и силе трења (F_t), које се добијају AD конверзијом. То су основне триболошке карактеристике сваког триболошког пара. На слици 7.2 приказан је мерни ланац трибометра на ком су обављена испитивања [18].



Слика 7.2 Приказ мерног система трибометра TR-95

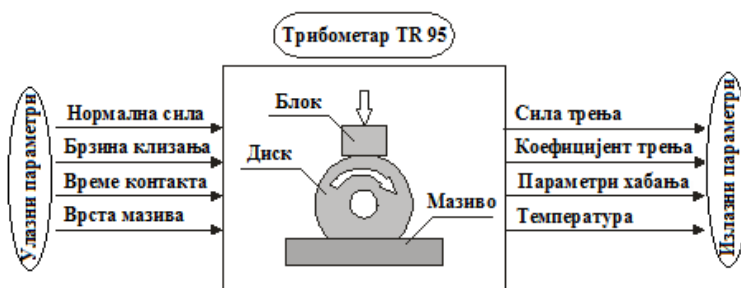
Аналогни сигнали сила F_n и F_t доводе се са динамометара (мерних давача), преко појачавача на прикључни панел, који служи као интерфејс између рачунара и уређаја. Са прикључног панела се сигнали доводе на AD конвертор или претварач, који је израђен у виду модула - картице и смештен у слот рачунара [18].



Слика 7.3 Мерни појачавач

Подаци са AD конвертора се прикупљају помоћу посебног софтвера о вредностима мерених величина, а то су нормална сила и сила трења. Овај софтвер омогућава да се врши креирање нових података на бази мерених вредности. Коефицијент трења (f) се добија аутоматски помоћу математичке операције дељења тренутних вредности нормалне силе и силе трења. Поред тога, формирају се и средње вредности нормалне силе и силе трења - $F_n(sr)$ и $F_t(sr)$. То се постиже на тај начин што се уместо сваке реалне измерене

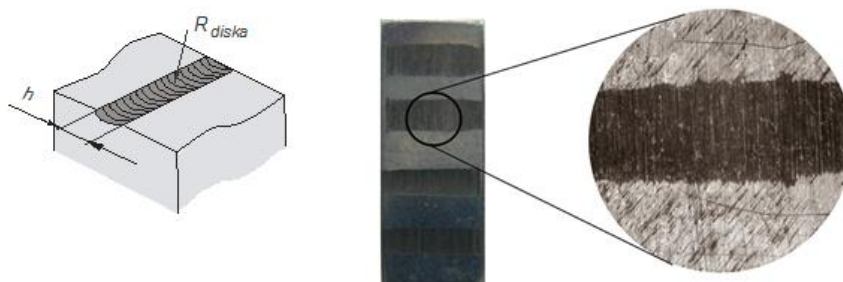
величине неке временске серије узима аритметичка средина низа података у коме је она средња. Ако нпр. се током експеримента користи аритметичка средина 5 тачака, то значи да се првом аритметичком средином замењује трећа тачка, потом аритметичком средином од друге до шесте тачке замењује се четврта тачка итд. Оваква метода има за циљ уједначавање линија трења. Подаци се заједно са подацима о мереним силама приказују на екрану монитора. Софтвер пружа графички приказ сигнала мерене величине и тренутну нумеричку вредност величине [18].



Слика 7.4 Трибомеханички систем са улазним и излазним параметрима [18]

7.2.2 Универзални мерни микроскоп UIM-21

Као основни параметар хабања користи се ширина трага хабања на контактної површини блока. Мерење ширине трага хабања се врши за интензитет нормалне силе од 3N, 6 N и 10 N, при брзини клизања 0.25 m/s, 0.5 m/s и 0.75 m/s. Мерење ширине трага хабања на контактним површинама блока се изводи на универзалном мерном микроскопу UIM-21. Трагови који су снимљени на универзалном мерном микроскопу UIM-21 приказани су на слици 7.5 [18].



Слика 7.5 Трагови хабања на блоку [18]

Универзални мерни микроскоп UIM-21 је осим за мерење ширине трага хабања намењен и за мерење дужина, углова, параметара спољашњих и унутрашњих завојница,

контролу алата и објеката сложене геометрије [18]. На слици 7.6 приказан је микроскоп где су обаљена мерења ширине трага хабања.



Слика 7.6 Универзални мерни микроскоп UIM-21

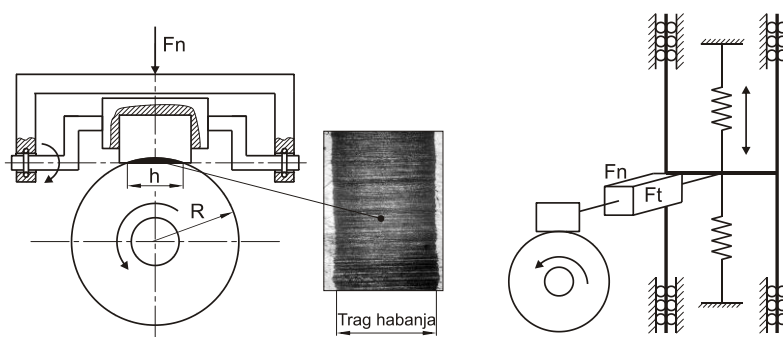
7.2.3 Контактни пар

Контактни пар чине ротациони диск и блок или плочица (*block-on-disc* контактна геометрија). Начин формирања трага на плочици приказан је на слици 7.7 [18].

Табела 13. Основни подаци испитивања на трибометру TR-95

Контактна геометрија	Block on disc
Нормална сила	3 N, 6 N, 10 N
Брзина клизања	0.25 m/s, 0.5 m/s, 0.75 m/s

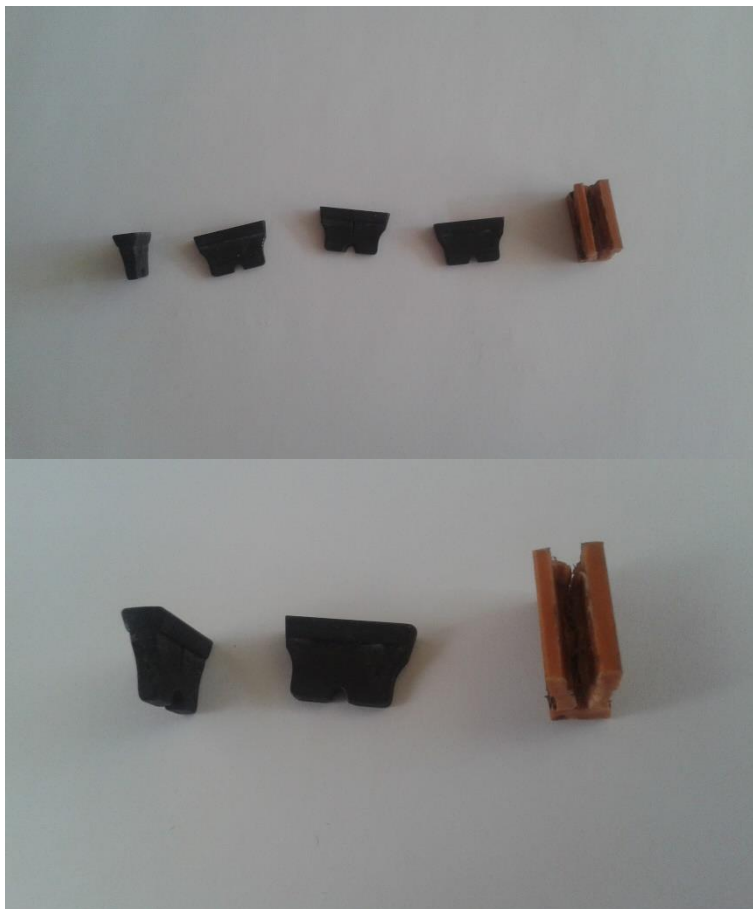
Дискови су израђени од челика $\check{S}$ 3840, тврдоће 63 HRC са брушеним површинама, а блокови су израђени МИМ технологијом.



Слика 7.7 Шема формирања трага хабања у зони контакта [18]

Сила која се остварује у зони контакта је пропорционална нормалној притисној сили која делује на плочицу. На слици 7.8 су МИМ узорци који се испитују и носач узорака

који се користе у експерименту. Повећавањем вредности нормалне силе F_n , као улазног параметра, расте вредност силе трења F_t . Ове две величине представљају основне карактеристике триболошког пара [18].



Слика 7.8 Узорци и носач узорака за триболошка испитивања

Табеле 14. и 15. дају основне карактеристике МИМ делова који се користе у експерименту, као што је густина, порозност, тврдоћа и хемијски састав.

Табела 14. Карактеристике делова који се испитују [19]

	Узорак 1	Узорак 2	Узорак 3
Густина (g/cm³)	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 (cm³)	0.1320	0.1330	0.1285

Табела 15. Хемијски састав узорака за испитивање [19]

Количински удео у %	
C	0.75
Ni	1.912; 1.890;
Cu	0.0288; 0.0101;
Mo	0.5047; 0.499;
Fe	Остатак

На слици 7.9 приказан је контактни пар дискова и узорака који су направљени МИМ технологијом. Након испитивања јасно се уочавају трагови хабања на узорцима. После три мерења, са три различите вредности нормалне силе F_n и брзине клизања v , формира се по три трага хабања на свакој плочици.



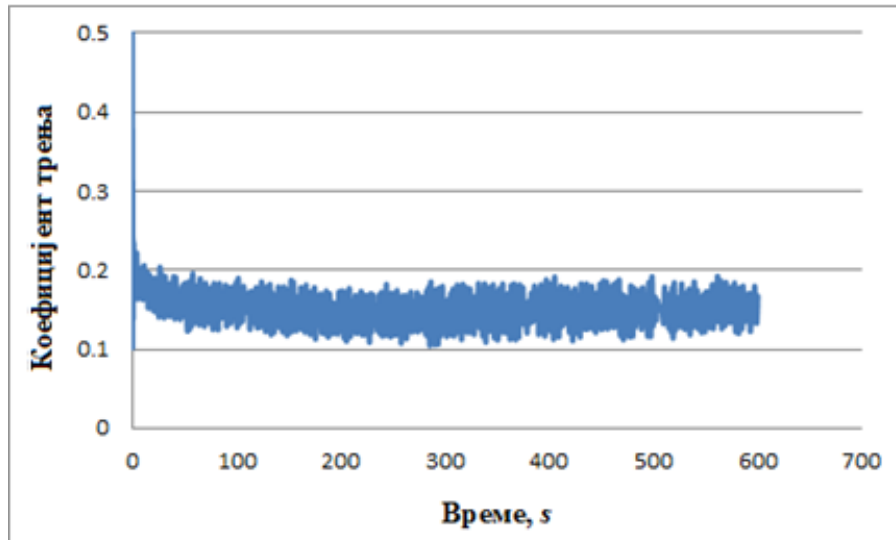
Слика 7.9 Приказ триболошког пара – узорци са траговима хабања и дискови након испитивања

7.3 Резултати експеримента

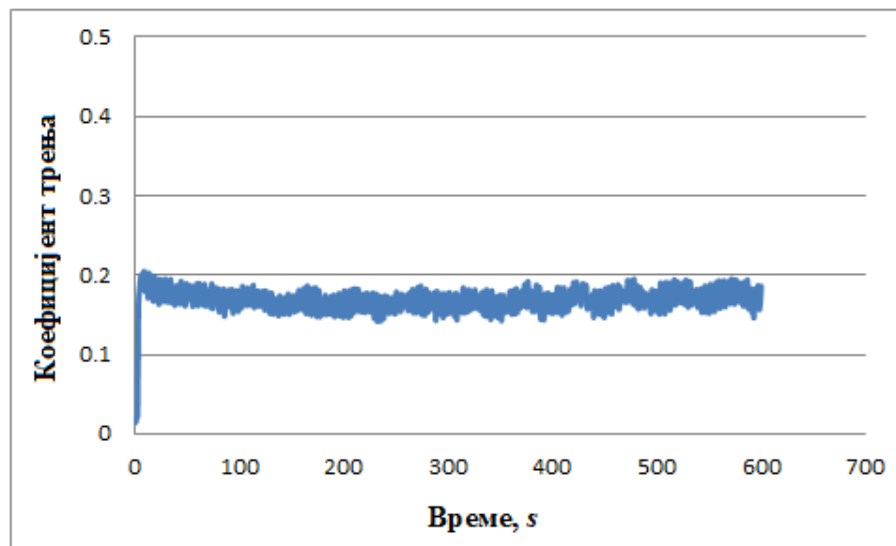
Након обављених испитивања триболошких карактеристика делова добијених МИМ технологијом сумирају се резултати и даје коначна оцена. Резултати испитивања узети су из рада наведеног у литератури под редним бројем 19. На сликама у наставку су дијаграми који приказују сигнал излазних величина мерног система трибометра.

На дијаграмима који следе може се видети промена коефицијената трења у функцији нормалне силе и брзине клизања. Почетни део криве представља ткз. период уходавања (енгл. *Runing in period*). Код периода уходавања интензитет хабања опада са временом трајања контакта. Најмањи интензитет хабања је на крају периода хабања [18]. Затим коефицијент трења расте до одређене вредности, што одговара периоду у ком се

јављају адхезионе силе и скидање највеће количине материјала. Након тога коефицијент трења се доста спорије мења, тако што се смањује са пређеним путем, што одговара другој фази хабања – период успореног хабања. За коначну оцену се користи средња вредност ових кривих.



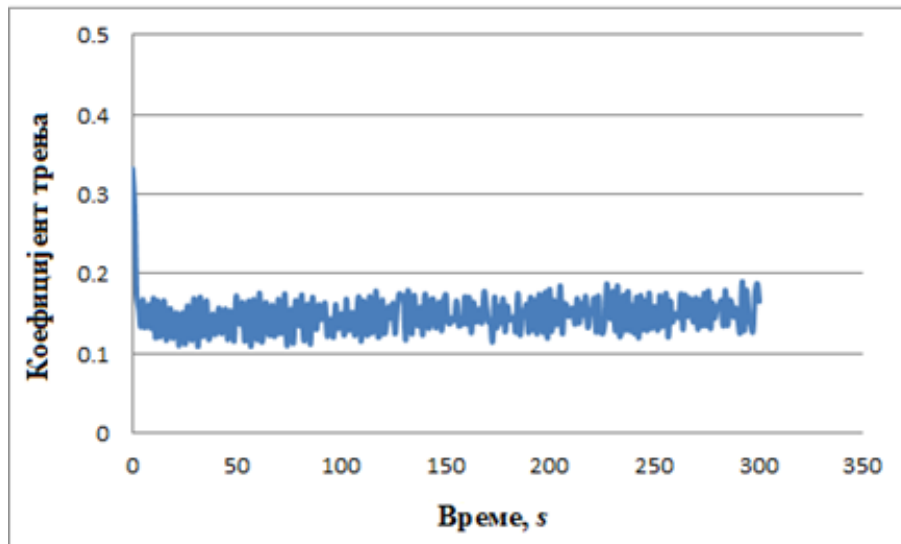
Слика 7.10 Мерење бр. 1: $F_n = 3 \text{ N}$, $n = 145 \text{ o/min}$, $v = 0,25 \text{ m/s}$, *pripremak 1*, disk 1M;



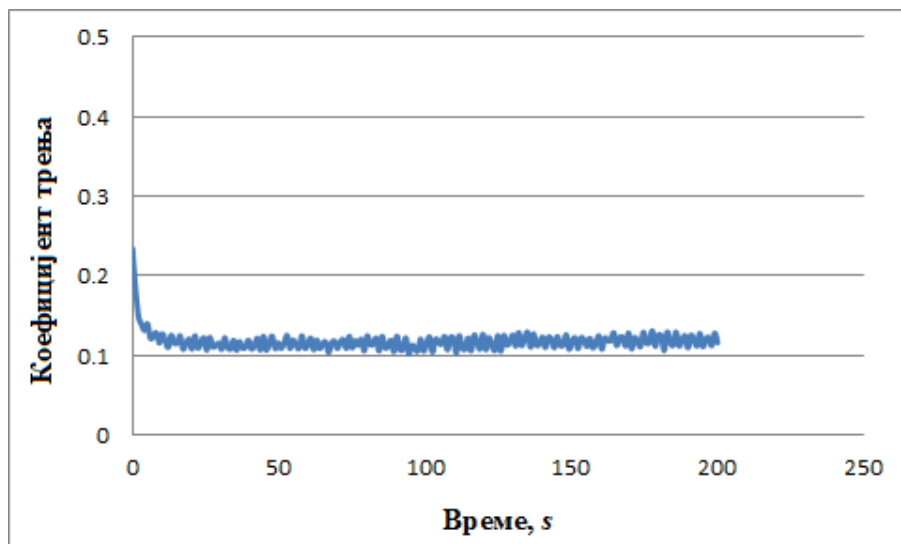
Слика 7.11 Мерење бр. 3: $F_n = 10 \text{ N}$, $n = 145 \text{ o/min}$, $v = 0,25 \text{ m/s}$, *pripremak 1*, disk 1M;

У првом случају вредност нормалне силе је 3 N, брзина клизања је 0.25 m/s, а број обртаја 145 rpm. Период уходавања је јако кратак и врло брзо долази до смиривања излазног сигнала, који осцилира између 0.1 и 0.2. Средња вредност излазног сигнала је 1.5.

Други дијаграм прати коефицијент трења за мерење број 3, где се користи исти диск и припремак за испитивање. При том се формира трећи траг хабања на првој плочици, приказан на слици 7.9. У другом случају смиривање излазног сигнала је за нијансу спорије. Праћење коефицијента трења је око 600 s, при чему је уочено да су осцилације у оквиру вредности 0.15 – 0. 20. Дакле, вредност коефицијента трења у овом мерном опсегу је 0.17. Вредност нормалне силе је 10 N са истим бројем обртаја у минути.



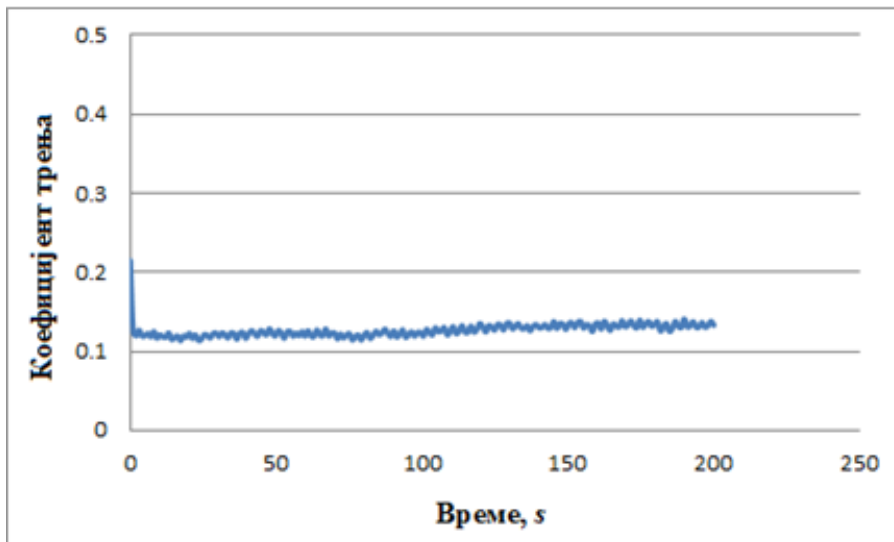
Слика 7.12 Мерење бр. 5: $F_n = 6 \text{ N}$, $n = 270 \text{ o/min}$, $v = 0,5 \text{ m/s}$, pripremak 2, disk 2M;



Слика 7.13 Мерење бр. 8: $F_n = 6 \text{ N}$, $n = 410 \text{ o/min}$, $v = 0,75 \text{ m/s}$, pripremak 3, disk 3M;

Дијаграм на слици 7.12 приказује сигнал добијен мерењем број пет. Испитивање је обављено са другим контактним паром, где се користи други диск и припремак. Брзина

клизања је 0.5 m/s, а нормална сила 6 N. Константне вредности пикова осциловања у овом случају су у интервалу од 0.1 до 0.2, као у првом случају, са малим разликама у стабилности излазног сигнала. Мерење број осам прати вредност коефицијента трења за силу од 6 N и број обртаја 410 грм. На дијаграму на слици 7.13 се може видети осциловање сигнала при мерењу коефицијента трења за ове улазне величине. За разлику од претходног дијаграма амплитуда осциловања је око два пута мања. Врло брзо долази до константне вредности осциловања на 0.12. Код овог мерења кориштена је трећа плочица, при чему се формира други траг хабања.



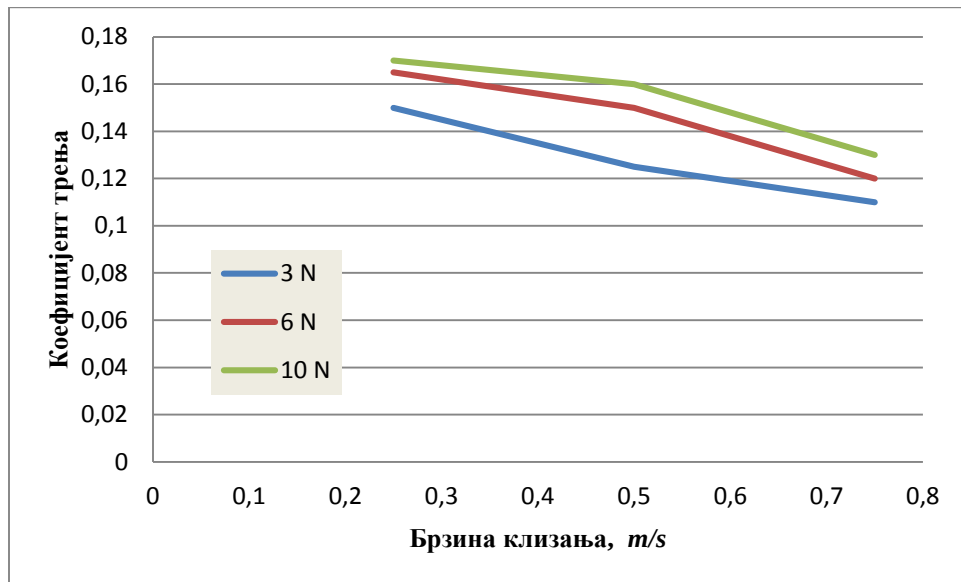
Слика 7.14 Мерење бр. 9: $F_n = 10 \text{ N}$, $n = 410 \text{ o/min}$, $v = 0,75 \text{ m/s}$, *pripetak 3*, *disk 3M*;

Триболошки пар који се користи за девето мерење је трећи диск и плочица, при вредности нормалне силе од 10 N и брзине клизања 0.75 m/s. При овом мерењу образује се трећи траг хабања на трећој плочици. Коефицијент трења који се може прочитати на сигналу има приближну вредност око 0.13. За девето мерење запажају се најмање амплитуде осциловања (слика 7.14).

На основу претходних дијаграма формира се табела са резултатима испитивања коефицијента трења за различите вредности нормалне силе и брзине клизања и одговарајући дијаграм, који обухвата сва мерења.

Табела 16. Коефицијент трења у зависности од брзине клизања

Нормална сила (N)	Брзина клизања (m/s)		
	0.25	0.5	0.75
Коефицијент трења			
3	0.15	0.125	0.11
6	0.165	0.15	0.12
10	0.17	0.16	0.13



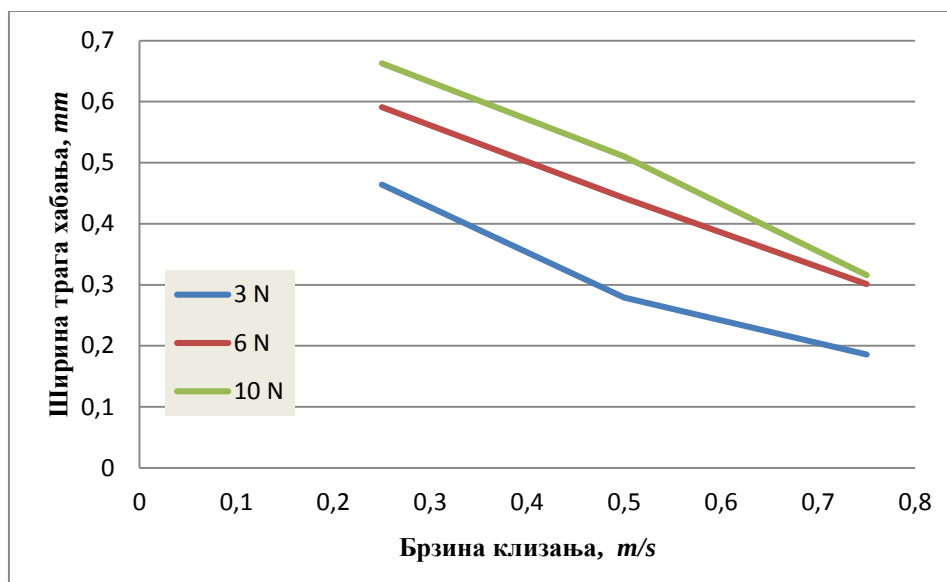
Слика 7.15 Коефицијент трења за различите вредности брзине клизања

Највећа вредност коефицијента трења забележена је код трећег мерења, при вредности нормалне силе од 10 N и брзини клизања 0.25 m/s. Најмању вредност коефицијента трења показало је мерење број седам, где је вредност нормалне силе била 3 N, а брзина клизања 0.75 m/s, односно за број обртаја од 410 o/min.

Други део експерименталног испитивања је мерење ширине трага хабања за исте улазне величине као у претходном случају, тј. исте вредности нормалног оптерећења и брзине клизања (броја обртаја), тако да се користе трагови хабања формирани претходним испитивањем. У табели 15. дате су вредности ширине трага хабања у зависности од брзине клизања и нормалне силе, а на дијаграму на слици 7.16 графички је представљена промена ширине трага хабања за различите улазне величине.

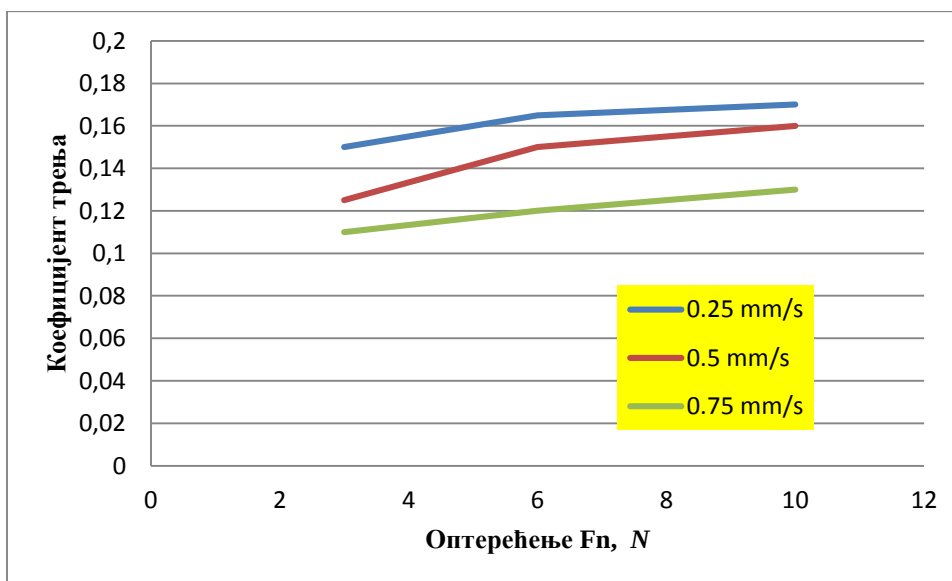
Табела 17. Ширина трага хабања у зависности од нормалне силе и брзине клизања

Нормална сила (N)	Брзина клизања (m/s)		
	0.25	0.5	0.75
Ширина трага хабања (mm)			
3	0.464	0.279	0.186
6	0.591	0.442	0.301
10	0.663	0.51	0.316



Слика 7.16 *Ширина трага хабања у функцији од брзине клизања*

Приликом мерења ширине трага хабања, најмања ширина трага измерена је за вредност нормалне силе од 3 N, при брзини клизања од 0.75 m/s. Траг највеће ширине је формиран код мерења број 3, када је вредност нормалне силе била 10 N, а број обртаја 145 o/min.

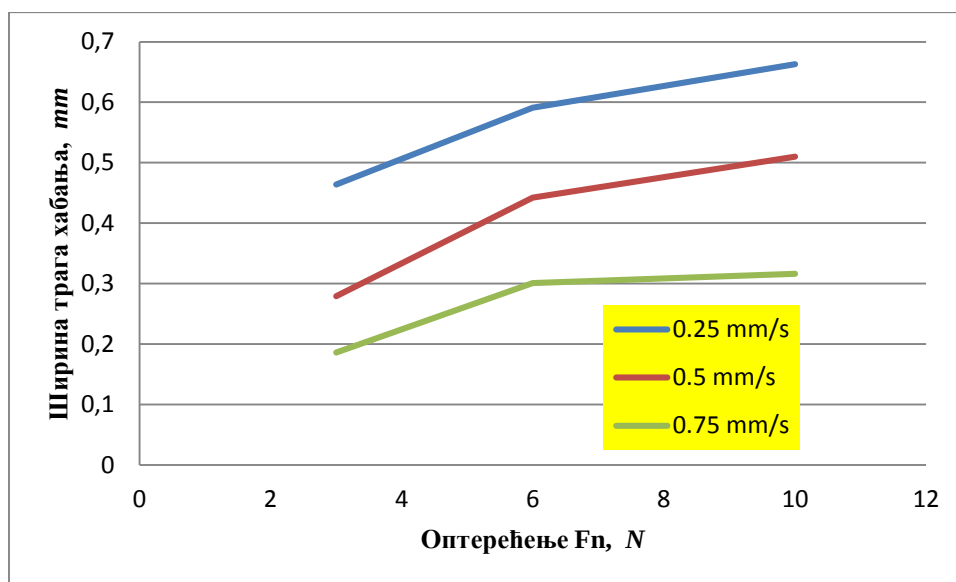


Слика 7.17 *Коефицијент трења у функцији од оптерећења*

На основу добијених резултата приказаних у табели 16. може се формирати дијаграм зависности коефицијента трења од оптерећења. На слици 7.17 запажа се раст коефицијента трења са порастом оптерећења. Линије на дијаграму спајају три различите

вредности нормалне силе, на основу којих се могу предвидети вредности коефицијената трења за интервале између ових вредности.

На исти начин добија се дијаграм зависности ширине трага хабања од оптерећења, приказан на слици 7.18. На апсиси су вредности оптерећења од 3 N, 6 N и 10 N, а на ординати је ширина трага хабања изражена у милиметрима. За интервал мерења од 3 N до 6 N може се запазити бржи раст вредности ширине трага хабања од мерног опсега 6 -10 N.



Слика 7.18 *Ширина трага хабања у функцији од оптерећења*

Спајањем тачака које се добијају на основу вредности из табеле 17. и резултата мерења, добија се дијаграм помоћу кога се може предвидети приближна вредност ширине трага хабања и за друге вредности оптерећења. Већа ширина карактеристична је за мање брзине и већа оптерећења, а мања ширина за мања оптерећења и веће брзине.

8. Закључак

Упознавање карактеристика материјала довело је до развоја технологија инјекционог бризгања прахова, где се мешају честице керамике (СІМ) или металног праха (МІМ) са другим супстанцама, које омогућавају бризгање. Ове супстанце се потом различитим поступцима одвајају од метала или керамике, чиме се добија готов производ. У току синтеровања се на рачун промене запремине повећава густина комада. Оваквим начином производње смањује се број операција у току производње, па је омогућен висок степен аутоматизације без накнадне обраде. Поступак је готово исти као и код бризгања пластике, при чему постоје разлике у параметрима процеса због другачије природе материјала који се користе. Бројне су предности примене металургије праха [11]:

- Производња сложених делова,
- Могућност комбинације више материјала,
- Висока аутоматизација процеса,
- Висок степен искоришћења материјала,
- Употреба нових материјала,
- Уштеда чак до 50% у односу на ливење,
- Зелена технологија и др.

Као последица начина производње овакви комади имају веома малу отпорност на динамичка оптерећења и ударе. Такође, делове добијене металургијом праха карактерише запреминско и линеарно скупљање, о чему је било речи у поглављу 5. и 6. Због тога је ограничена област примене на ситне делове тежине око 250 g. Технологија бризгања прахова се примењује за производњу делова који се користе у [11]:

- Медицини,
- Машинству,
- Прецизној механици,
- Аутомобилској индустрији,
- Телекомуникацији,
- Пољопривреди и др.

Развој неконвенционалних поступака обраде материјала је од великог значаја за раст и унапређивање индустрије у целом свету. Нови поступци обраде се развијају захваљујући познавању особина материјала, па је даље испитивање на пољу анализе материјала од великог значаја за стварање нових начина производње.

У поглављу 7. вршена су испитивања триболошких карактеристика делова који су добијени МІМ технологијом. Пре експеримента испитане су физичке и хемијске особине делова истог материјала, као што су порозност, густина, тврдоћа, тежина, запремина и

хемијски састав. Све ове карактеристике директно утичу на триболошке особине, тј. крајњи резултат експеримента, па је неопходно спровести детаљна испитивања поменутих карактеристика. Порозност и густина у првом реду одликују МИМ делове.

Након утврђивања физичких и хемијских особина, обављен је експеримент којим се испитују триболошке карактеристике у лабораторијским условима – коефицијента трења и ширине трага хабања. Испитивања су обављена са „*block-on-disc*“ контактном геометријом, где се остварује линијски контакт. Након експеримента добијени трагови хабања измерени су на мерном микроскопу. Промена вредности нормалне силе (F_n) и брзине клизања (v) доводи до промене коефицијента трења и ширине трага хабања. Циљ је проналажење материјала праха и производња делова са најбољим триболошким карактеристикама:

- Најмањи коефицијент трења и
- Најмања ширина трага хабања.

Највећи коефицијент трења забележен је за вредност нормалне силе од 10 N, при брзини клизања 0.25 m/s, а најмањи при вредности нормалне силе од 3 N и брзини 0.75 m/s. Најмања ширина трага хабања била је за вредност нормалне силе од 3 N и брзини клизања 0.75 m/s (410 o/min). Ширина трага хабања, као и коефицијент трења су величине које се мењају током испитивања, као што је приказано на дијаграмима у тачки 7, па је интензитет ових величина узет као резултат испитивања везан само за тренутне вредности. Формирање оваквих и сличних дијаграма заснованим на испитивањима делова произведених МИМ технологијом омогућава квалитетнију производњу и предвиђање карактеристика делова, односно понашање делова у експлоатацији. На основу резултата добијених триболошким испитивањима у датом опсегу вредности нормалне силе и брзине клизања, могу се приближно одредити коефицијент трења и хабање за друге интензитете ових величина, пратећи криву раста хабања са порастом нормалне силе. Оваквим и сличним испитивањима могу се добити најквалитетнији материјали праха, као и најбољи начини за производњу истих.

Поред триболошких, постоји и велики број истраживачких радова на тему испитивања динамичких и других оптерећења, како би се дошло до најквалитетнијих материјала смеше за бризгање. Праћење понашања материјала у калупу доприноси бољем квалитету производа и унапређивању начина производње. Слика расподеле притисака и температура у калупу (тачка 5), као и прорачун линеарног скупљања (тачка 6) дају могућност прецизног пројектовања калупа. Оптимизацијом параметара добијају се делови најбољих особина.

Технологија инјекционог бризгања прахова, као технологија будућности, у све већој мери постаје „зелена технологија“, јер омогућава развој нових начина производње без штетног утицаја на околину.

9. Литература

- [1] Heaney D. F. *Handbook of metal injection molding*, Woodhead Publishing Limited, Универзитет у Кембриџу, Велика Британија, 2012.
- [2] Сколар Љ. *Металургија праха и синтер материјали – скрипта*, Металуршки факултет, Загреб, 2015.
- [3] MachineDesign: <https://www.machinedesign.com/materials/metals/article/21834821/powder-metalurgy-processes>, приступљено 25.08.2020.
- [4] WB: <https://docplayer.net/15046016-Workshop-p-i-m-powder-injection-moulding.html>, приступљено 25.08.2020.
- [5] Кулиев Р. *Механичке особине бор карбида (B₄C)*, Национални ваздухопловни универзитет, Кијев, Украјина, 2015.
- [6] German M., Bose A. *Injection moulding of Metals and Ceramics*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, Њу Џерзи, 1997.
- [7] Kong X. *Development and characterization of polymer – metallic powder feedstocks for microinjection molding*, Универзитет у Франш-Контеу, Безансон, 2011.
- [8] GVR: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/metal-injection-molding-mim-market>, приступљено 25.08.2020.
- [9] Baknor: <https://baknorthermal.com/download-files/custom-metal-fabrication/Baknor-Custom-Metal-Fabrication.pdf>, приступљено 26.08.2020.
- [10] CP: <https://www.custompartnet.com/>, приступљено 26.08.2020.
- [11] Брњаш Д. *Ињекционо пресовање металних композиата*, Дипломски рад, Факултет стројарства и бродоградње, Загреб, 2010.
- [12] Pachauri P., Haniuddin Md. *Optimization of Injection Moulding Process Parameters in MIM for Impact Toughness of Sintered Parts*, Алигар, 2015.
- [13] Насић Е., Мустафић А. *ФЕА симулација фазе ињектирања МИМ процеса*, Научни рад, Машински факултет Универзитета у Тузли, 2012.
- [14] Мандић В. *Моделирање и симулација у обради деформисањем*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2005.
- [15] Ивковић Б., Рац А. *Трибологија*, Југословенско друштво за трибологију, Крагујевац, 1995.
- [16] Hkdivedi: <https://www.hkdivedi.com/2017/11/basic-concept-of-viscosity.html>, приступљено 30.08.2020.
- [17] NPR: <https://www.npr.co.jp/english/products/products03.html>, приступљено 31.08.2020.
- [18] Наставни материјал из предмета „Трибомеханички системи“, проф. др. Слободана Митровића
- [19] Кутлешкић М. *Специфичности технологија ињекционог бризгања прахова*, Мастер рад, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.