

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



Ústav strojírenské technologie

Bakalářská práce

Srovnání vybraných vlastností ocelí vyrobených technologií MIM a jinými  
technologiemi s ohledem na tepelné zpracování a strukturu

Autor: Václav Lípa

Studijní obor: VES

Praha 2019

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lípa** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **467416**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Srovnání vybraných vlastností ocelí vyrobených technologií MIM a jinými technologiemi s ohledem na tepelné zpracování a strukturu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Comparison of the selected parameters of steels produced by MIM technology and other technologies with main aspects to heat treatment and structure**

Pokyny pro vypracování:

1. Provedení důkladné rešerše současného stavu technologie MIM a materiálů tvarovatelných touto metodou.
2. Možné využití 3d tisku v procesu MIM
3. Porovnání metalurgických řezů ocelí vyrobených různými metodami.
4. Prognóza chromolybdenových ocelí a vlivu tepelného zpracování na strukturu.
5. Závěrečné shrnutí, doporučení.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


**doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**

  
doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

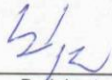
  
doc. Ing. Ladislav Kolářik, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.  
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

7.5.2019  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma „Srovnání ocelí vyrobených technologií MIM a jinými technologiemi s ohledem na tepelné zpracování a strukturu“ vypracoval samostatně a všechny informace a podklady použité v této práci jsou řádně odkázány v seznamu literatury.

**V Praze dne 05.08.2019**

.....

Podpis

## Anotace:

Cílem bakalářské práce je charakterizovat technologii injekčního vstřikování kovů (MIM). Popis technologie zahrnuje používané materiály, přípravu kovového prášku, typy pojiva, používané stroje a zařízení, proces odstraňování pojiva a slinování vylisků. V práci se také pojednává o možnosti využití 3D tisku v procesu (MIM). Jsou zde rovněž uvedeny nejvýznamnější aplikace MIM výrobků a perspektivy této technologie. Na závěr porovnání s různými technologiemi výroby.

## Klíčová slova

vstřikování injekční kovů, prášek, pojivo, slinování, komponenty, 3D tisk

## Anotation

The aim of this bachelor thesis is to characterize the technology of metal injection molding (MIM). The technology description includes the preparation of metal powder, The aim of this bachelor thesis is to characterize the technology of metal injection molding (MIM). blinder types, applied machines and equipments, debinding process and sintering of compacts. The work also deals with the possibility of using 3D printing in process (MIM). It also lists the most important applications of MIM- products and perspecives of this technology. In conclusion, comparasion with various production technologies.

## Keywords

metal injection molding, powder, binder, sintering, components, 3D print

## Poděkování:

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. za cenné připomínky, rady a doporučení při vypracování této práce. V neposlední řadě bych tímto chtěl poděkovat své rodině za její podporu a pochopení.

# Obsah

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE .....	1
Prohlášení: .....	3
Anotace: .....	4
Klíčová slova .....	4
Anotation .....	5
Keywords .....	5
Poděkování: .....	6
Obsah .....	7
Seznam symbolů a zkratk .....	10
Úvod.....	11
1. Cíl práce .....	12
2. Metal injection molding .....	13
2.1 Vstupní surovina .....	15
2.1.1 Kovový prášek .....	15
2.1.2 Velikost částic.....	16
2.1.3 Tvar částic.....	17
2.1.4 Výroba prášku .....	17
2.1.4.1 Mechanické způsoby výroby.....	18
2.1.4.2 Chemické způsoby výroby.....	18
2.1.4.3 Eletro-chemické způsoby výroby.....	18
2.1.4.4 Úprava prášku třídění a čištění.....	19
2.1.2 Pojivo.....	19
2.1.2.1 Druhy pojiv .....	19
2.1.3 Plnicí fáze .....	20
2.1.4 Polymer .....	20
2.1.5 Povrchově aktivní látka .....	21
2.2 Výroba vstupní suroviny pro lisy.....	21
2.3 Vstřikování.....	25

2.3.1 Stroje pro vstřikování .....	26
2.3.2 Formy pro lisy.....	26
2.4 Odstraňování pojiva .....	26
2.4.1 Tepelné odstranění pojiva.....	27
2.4.2 Katalické odstranění pojiva .....	27
2.4.3 Chemické odstranění pojiva.....	28
2.5 Slinování .....	28
2.5.1 Slinování jednosložkových soustav .....	30
2.5.2 Slinování vícesložkových soustav .....	30
2.5.3 Slinování za vzniku kapalné fáze .....	31
2.5.4 Slinovací zařízení a atmosféra .....	31
2.5.4.1 Vakuum, vzduch .....	31
2.5.4.2 Argon .....	31
2.5.4.3 Dusík .....	32
2.5.4.4 Vodík.....	32
2.5.5 Vybavení pro slinování .....	32
2.6 Zásady návrhu dílů pro metodu MIM.....	33
2.7 Přesnost dílů MIM .....	34
2.8 Materiály vhodné pro metodu MIM.....	35
2.9 Shrnutí metody MIM .....	36
3. Možnost využití 3D tisku v procesu MIM.....	37
3.1 Rozbor 3D tiskárny .....	38
3.1.2 Struktura tisknutí .....	38
3.2 Prostorová orientace dílu .....	39
3.3 Proces MIM s použitím 3D tiskárny.....	40
3.3.1 3D tiskárna .....	40
3.3.2 Odstranění pojiva .....	40
3.3.3 Sintrování .....	40
3.4 Možné dokončovací techniky .....	41
4. Praktická část .....	42
4.1 Průběh přípravy vzorků .....	42



4.2 Měření .....	43
4.3 Vzorky k porovnání .....	44
4.3.1 Obrobek.....	44
4.3.2 3D tisk (váleček) .....	45
4.3.3 MIM součástka .....	46
4.4. Hodnocení z hlediska struktury povrchu .....	47
4.4.1 Obrobek.....	47
4.4.2 3D tisk.....	48
4.4.3 MIM součást.....	49
4.5 Hodnocení z hlediska drsnosti povrchu .....	50
4.5.1 Obrobek.....	50
4.5.2 3D tisk.....	51
4.5.3 MIM součást.....	52
4.6 Zhodnocení .....	53
4.7 Vliv tepelného zpracování na strukturu chrommolybdenových ocelí .....	54
4.7.1 Sintrovaný vzorek.....	54
4.7.2 Tepelně zušlechtěný vzorek .....	55
4.8 Zhodnocení .....	56
4.8.1 Sintrovaný vzorek .....	56
4.8.2 Tepelně zušlechtěný vzorek .....	56
5 Závěr .....	57
Použitá literatura .....	59
Seznam obrázků.....	61
Seznam tabulek .....	63
Seznam příloh .....	63
Přílohy.....	64

## Seznam symbolů a zkratek

MIM	Metal Injection Moulding
PIM	Plastic Injection Moulding
CIM	Ceramic Injection Moulding
POM	Polyoxymetylén
BMD	Bound Metal Deposition
FFF	Fused Filament Fabrication

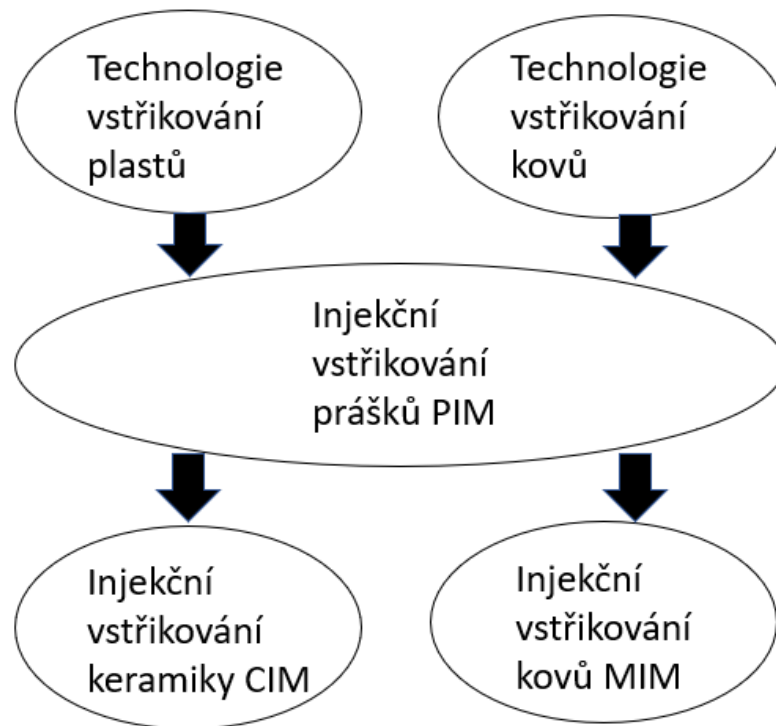


# 1. Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je kompletní rozbor metody MIM. Popsat technologii, materiály formovatelné touto metodou a možné využití. Dále popsat využití 3D tisku v procesu MIM. Praktická část je rozdělena na 2 části. První část je zaměřena na porovnání 3 vzorků vytvořené (MIM technologií, 3D tiskem a obrábění). Porovnání je hlavně z hlediska kvality struktury a drsnosti povrchu. Ve druhé části se zaměřuji na vliv tepelného zpracování u chrommolybdenových ocelí na strukturu.

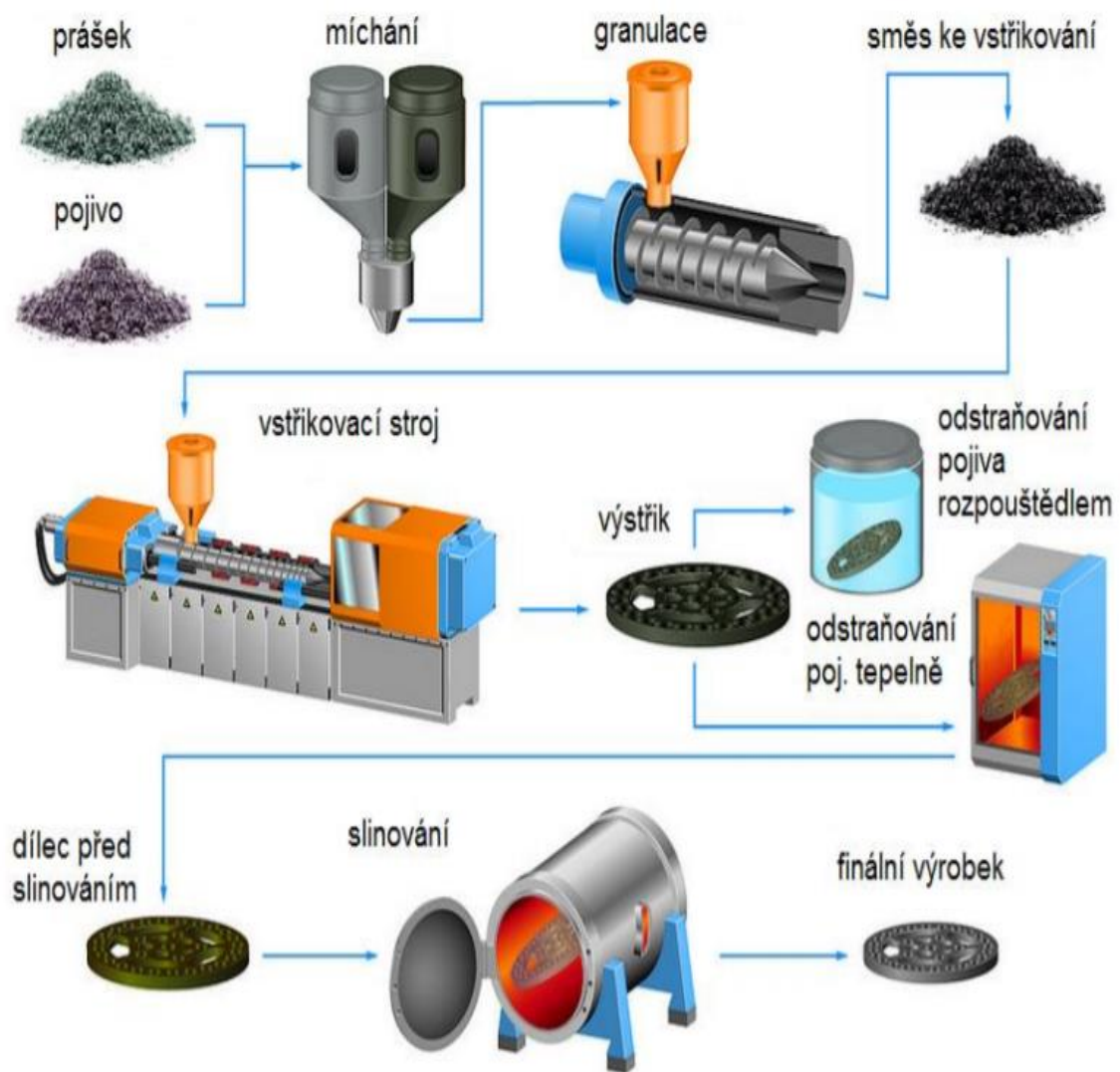
## 2. Metal injection molding

MIM patří do podkategorie práškového vstřikování (PIM). Rozdělení je zobrazeno na obrázku 2. PIM využívá technologii vstřikování plastů. Vstřikovanou surovinou bývá polymer a anorganický materiál. Anorganický materiál může být kov nebo keramika.



Obrázek 2: Rozdělení technologie PIM [3]

Technologie MIM je složena z několika kroků, které jsou znázorněny na Obr. 3. V první fázi se míchá kovový prášek s pojivem a směs je peletována nebo granulována. Směs je následně zahřata a pomocí lisu vstříknuta do formy. Následuje proces odstranění pojiva, aby bylo zaručeno dosažení vysoké hustoty vylisku. Tento proces je většinou víceetapňový v závislosti na typu použitého pojiva. Závěrečným krokem je slinování, kde se kov zahřeje až na teplotu tání a jednotlivé částice spojí v koherentní pevnou hmotu. Vysoká teplota způsobí, že se částice kovového prášku spojí dohromady, čímž se zvýší hustota a tím pevnost součásti. Při dobře provedeném slinování se vyráběný díl MIM blíží vlastnostem obdobným odlitku. [3]



Obrázek 3: Celý proces MIM [4]

## 2.1 Vstupní surovina

Celý MIM proces je v podstatě založen na vlastnostech vstupních surovin. Surovina se skládá ze dvou hlavních složek. A to pojiva a kovového prášku. Obě složky mají jedinečnou funkci ve výrobním procesu. Surovina je obvykle ve formě pelet. O vlastnostech suroviny rozhoduje pět hlavních faktorů:

- Složení pojiva
- Poměr prášek/pojivo
- Metoda míchání
- Použitý prášek
- Peletovací technika [5]

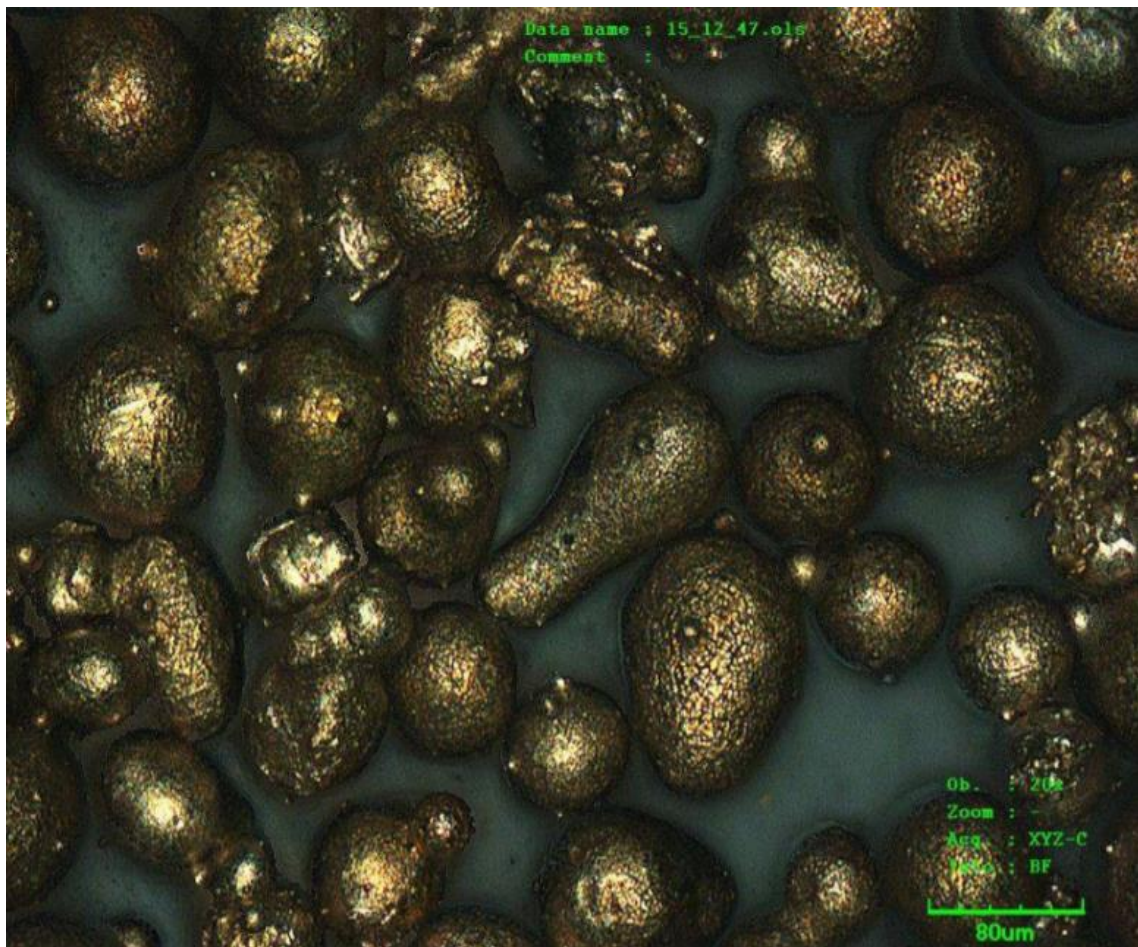


Obrázek 4: Směs Prášku a pojiva [6]

### 2.1.1 Kovový prášek

Kovový prášek je to, co hotovému výrobku zaručuje výsledné mechanické vlastnosti. Součást zobrazuje podobné vlastnosti jako kov, ze kterého je prášek vyroben. Rozhodují u prášku je velikost a tvar částic. Prášek musí splňovat následující kritéria: velikost částic musí být malá, dobře mísitelný s polymery, slinuje se na dostatečně vysokou hustotu a

má dostatečně vysokou teplotu tání a slinování, aby nenarušoval proces debinování (odstraňování pojiva). [5]



Obrázek 5: Kovové částice [8]

### 2.1.2 Velikost částic

Teoreticky se velikost částic prášku může pohybovat okolo  $45\mu\text{m}$ , avšak ideální velikost částic pro velkou část slitin je okolo  $22\mu\text{m}$ . Prášek s malou velikostí částic zajišťuje hladší povrch součásti. Jediný důvod pro výběr prášku s větší velikostí částic jsou pořizovací náklady. V praxi však platí, že čím větší částice, tím větší riziko výskytu počtu závad na kvalitě výsledného výrobku. [5]



### 2.1.3 Tvar částic

Tvar částic má důležitý vliv na úspěch celého procesu MIM. Částice získávají své tvary podle výrobních metod prášku. Žádoucí tvar je kulový, a to hned z mnoha důvodů. Napomáhá lepšímu toku suroviny při vstřikování, dobře se mísí s pojivem a je rovnoměrně rozdělen. [7]



Obrázek 6: Různé tvary částic [7]

### 2.1.4 Výroba prášku

Vlastnosti prášku závisí také na způsobu výroby, která ovlivňuje tvar, velikost zrn, mikrostrukturu i cenu. Výroba prášku zahrnuje několik metod, které se obecně dělí na:

- Mechanické
- Chemické
- Elektro-chemické [8]

#### 2.1.4.1 Mechanické způsoby výroby

##### **A. Výroba prášku drcením (mletím)**

Drcení kovů v kulových, vibračních nebo kladívkových mlýnech. Tato metoda se dnes používá už jen zřídka. Je vhodná pro křehké materiály. Mletí může probíhat za sucha nebo za mokra. Při užití aktivní tekutiny se snižuje povrchová energie částic a tím se zabrání vytvoření hrubých částic.

##### **B. Výroba prášku rozprašováním tekutého kovu**

Nejlevnější a nejproduktivnější potup výroby prášku a tedy i jedna z nejpoužívanějších metod. Působením plynu nebo tekutiny pod tlakem či působením odstředivých sil na tekutý kov. Následně vytvořené kapky vlivem prudkého ochlazení tuhnou. Při úpravě podmínek (teplota lázně, viskozity, ochlazování) je možné do určité míry ovlivnit vlastnosti prášku jako je tvar, struktura či disperzita. Čím vyšší teplota ohřevu lázně, tím získáváme větší podíl jemných částic. Dalšími možnostmi může být rozprašování za pomoci vody, nebo rozprašování plynem (Ar, He) s ochlazováním ve vodě či vzduchu. [8]

#### 2.1.4.2 Chemické způsoby výroby

Proces je založen na redukci kovových sloučenin ve formě oxidů, uhličitánů, dusičnanů nebo halogenů pomocí tuhých nebo plyných redukčních činidel. Čím stabilnější sloučenina, tím silnější činidlo musíme použít. [8]

#### 2.1.4.3 Elektro-chemické způsoby výroby

Jedná se o metodu elektrolýzy kovových solí. Takto lze získat asi 60 kovů. Pro práškovou metalurgii mají největší význam prášky Cu, Fe, Ni, Ti. Nejčastěji se elektrolýza provádí z vodních roztoků kovových solí. Elektrolytické prášky se vyznačují vysokou čistotou a velkou aktivitou při spékání. [8]

#### 2.1.4.4 Úprava prášku třídění a čištění

Pro zajištění optimální hmotnosti zásypu a lisovatelnosti je nutné hledět na velikost částic a proto je nutné dělit prášky do tříd.

- Třídění – dle velikosti (přeséváním, promýváním, vyplavováním apod.)
- Magnetické čištění – odstranění nemagnetických příměsí
- Tepelné zpracování – např. žíhání
- Redukce – odstranění povrchových oxidických vrstev
- Míchání – výroba vhodné směsi různých prášků o různém chem. složení a velikosti části [8]

#### 2.1.2 Pojivo

Druhou složkou přidávanou ke kovovému prášku je pojivo. Základní funkcí pojiva je udržet soudržnost kovových jednotlivých částic až do poslední fáze a to spékání. Pojivo tvoří okolo 20% celkové hmotnosti směsi. Pojivo je tvořeno kombinací několika různých materiálů, všechny mají svojí unikátní vlastnost. Pro MIM se pojivo typicky skládá ze tří hlavních složek. A to polymer, výplňový materiál a povrchově aktivní činidlo. Převážnou většinu pojiva tvoří polymer a plnivo. [5]

##### 2.1.2.1 Druhy pojiv

Nejčastěji používána pojiva pro technologii MIM jsou na bázi polymerů a lze je rozdělit do následujících skupin:

- Termoplastické směsi
- Reaktoplastické směsi
- Systémy založené na vodě
- Zpevňovací systémy
- Anorganické systémy

Většina polymerů je na bázi uhlovodíku. Pojiva na bázi termoplastických a termosetických směsí patří mezi hlavní typy pojiv, používaných pro technologii MIM.

V tabulce jsou uvedeny příklady konkrétních pojiv, vyvinutých pro MIM technologii, z nichž každý druh má své specifické vlastnosti. A ačkoliv je zde téměř nekonečný výběr polymerů a výplňových materiálů, existuje jen omezený počet proveditelných kombinací. Složky pojiva potřebují mít vzájemně slučitelné vlastnosti i funkci jako celek a musí dobře spolupracovat s práškem. [5]

Pojivo 1	70% parafinový vosk, 20% mikrokrytalický vosk, 10% metyletylketon
Pojivo 2	67% polypropylen, 22% mikrokrytalický vosk, 11% kyselina stearová
Pojivo 3	65% epoxidová pryskyřice, 25% parafinový vosk, 10% butyl stearát
Pojivo 4	45% polystyrén, 45% rostlinný olej, 5% polyetylén, 5% kyselina stearová
Pojivo 5	55% parafinový vosk, 35% polyetylen, 10% kyselina stearová
Pojivo 6	90% polyacetyl, 10% polyetylen

*Tabulka 1 Různé složení pojiv [5]*

### 2.1.3 Plnicí fáze

Plnicí fáze je obvykle voskový nebo voskovitý materiál. Účel je zajištění tvarovatelnosti a strukturní pevnosti. Na rozdíl od polymerů je vosk odstraněn už během debindingu. Vosky mají nízkou teplotu tání, a proto degradují snadněji než polymery. Mezi nejčastěji používané vosky patří parafinový vosk, karnaubský vosk a včelí vosk. [5]

### 2.1.4 Polymer

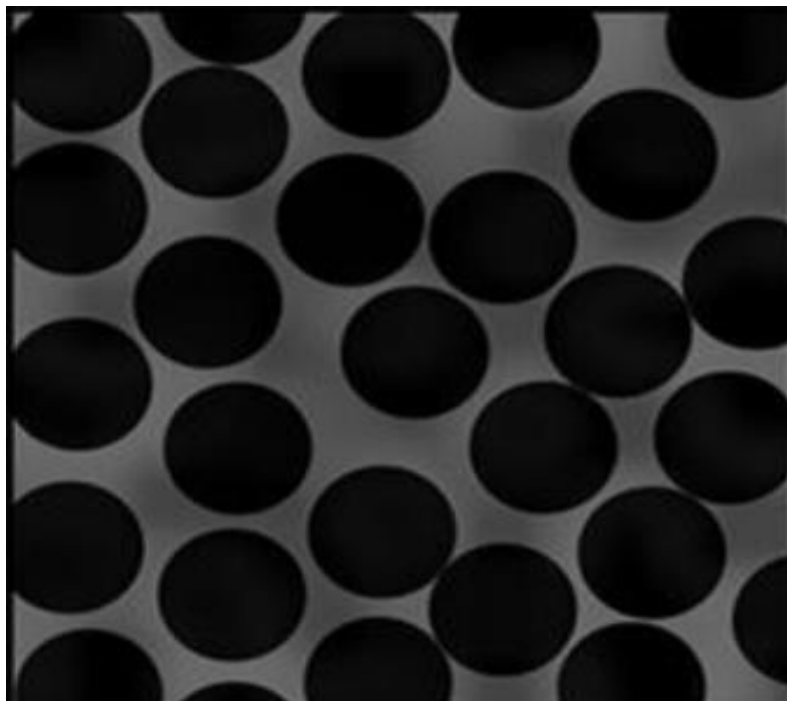
Slouží k zajištění pevnosti konstrukce lisované součásti MIM během debindingu a slinování. Polymer bývá označován jako „páteř“ dílu. Je to část pojiva, která je časově nejnáročnější na odstranění. Nejčastěji používanými pojivovými polymery jsou polyetylen a polypropylen. Mají ideální vlastnosti díky tomu, že poskytují potřebnou pevnost konstrukce a jdou relativně snadno odstranit. Mají nízké teploty tání a nízkou viskozitu a mají dobré smáčecí vlastnosti, takže jsou dobře mísitelné s pojivem. [5]

### 2.1.5 Povrchově aktivní látka

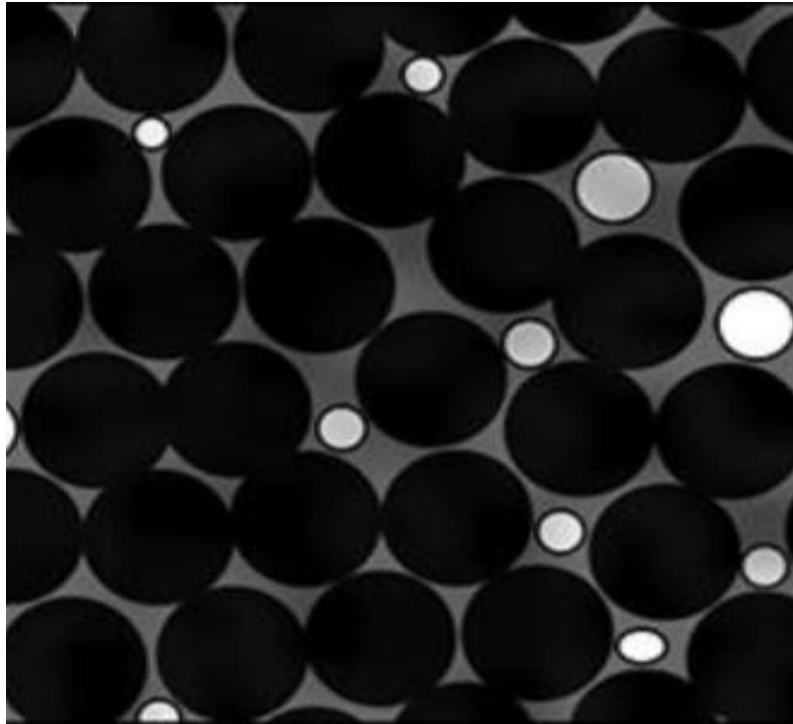
Jak bylo řečeno výše, typické pojivo se skládá ze tří hlavních prvků. Základní bývá polymer a plnivo. Třetí a zbývající složka je povrchově aktivní látka. Je to sloučenina, která snižuje povrchové napětí mezi dvěma kapalinami nebo mezi kapalinou a pevnou látkou. V případě vstřikování kovu zlepšit smáčení mezi kovovým práškem a samotným pojivem. [5]

## 2.2 Výroba vstupní suroviny pro lisy

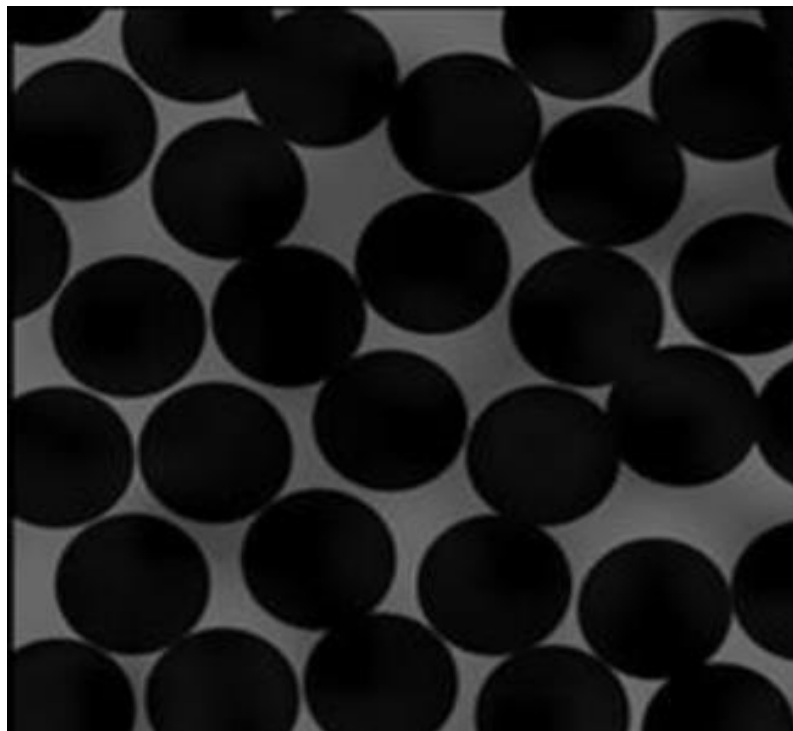
Přesný poměr pojiva a kovového prášku je velmi důležitý pro úspěšný proces MIM. Při nevyváženém poměru mezi komponenty bude mít za následek vady či nesprávné smrštění. Příliš mnoho pojiva ve směsi způsobí problémy během vstřikování, kdy se částice od sebe oddělují, což vede k nerovnoměrnému rozdělení kovových částic a může způsobit zhroucení dílu při procesech odstraňujících pojivo. Naopak příliš málo pojiva ve směsi má za následek vznik vzduchových dutin. Následkem toho může dojít během procesů odstraňující pojivo k praskání vylisku. [5]



Obrázek 7: Přebytek pojiva [5]

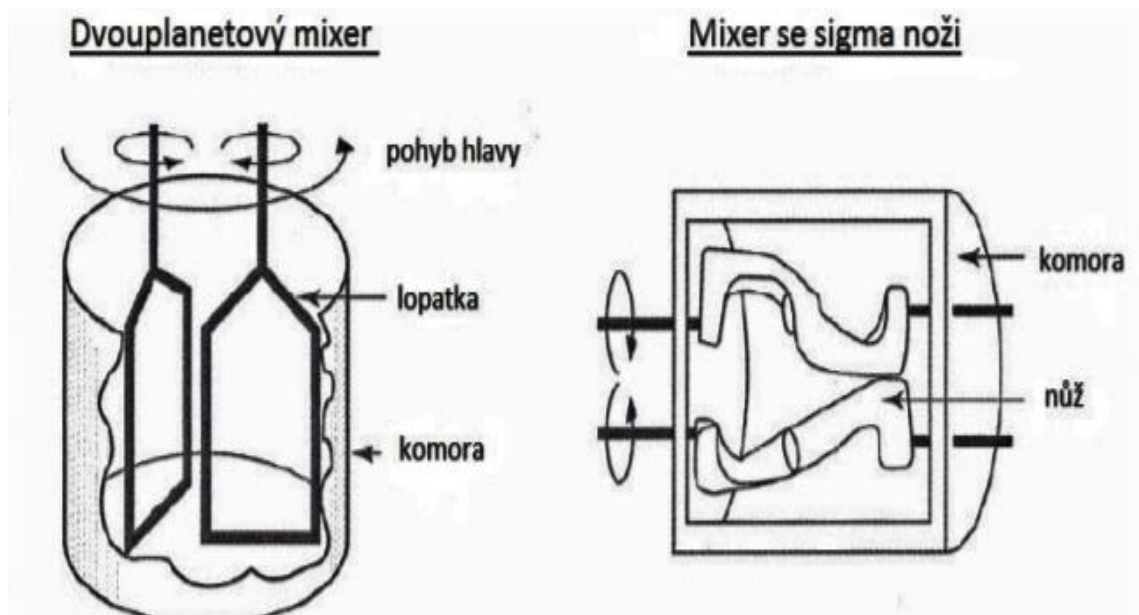


*Obrázek 8: Optimální poměr [5]*



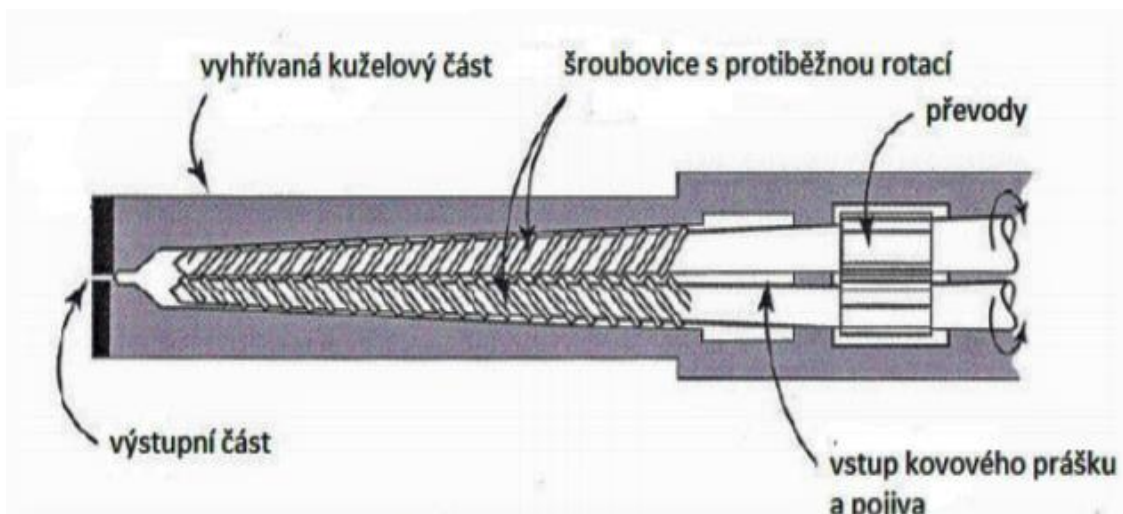
*Obrázek 9: Nedostatek pojiva [5]*

Míchání probíhá ve speciálních mísících zařízeních, které jsou znázorněny na obr.10



Obrázek 10: Mísící zařízení [9]

Nejběžnějším způsobem přípravy prášku je natavení pojiva a postupné přidávání kovového prášku. Míchání probíhá do té doby, dokud nejsou částice prášku rovnoměrně rozptýlené v pojivu bez vnitřní porozity a aglomerátů. Při případné rozdílnosti velikosti nebo tvaru částic mohou nastat problémy, jako separace pojiva od kovového prášku, nebo segregace. Po úspěšném procesu míchání nastává proces granulace nebo peletizace, který probíhá na speciálních protlačovacích strojích – viz. Obr. 11 [9]



Obrázek 11: Dvoušroubový protlačovací mixér [9]

Výsledkem je vstupní surovina pro vstřikovací lisu ve formě granulí či pelet.



*Obrázek 12: Výsledný granulát [23]*



## 2.3 Vstřikování

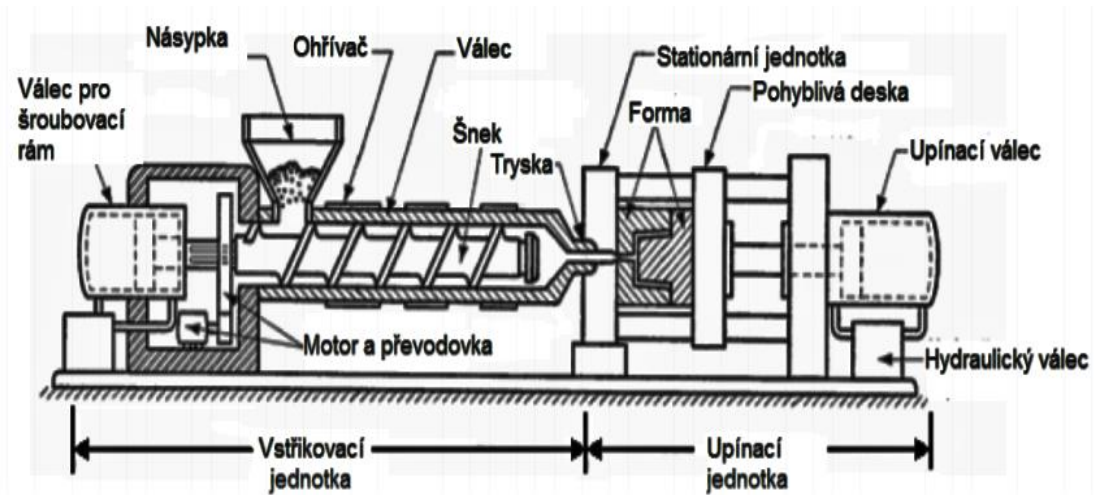
Injekční vstřikování kovů vychází z poznatků klasického vstřikování plastů. Vstupující surovina (granulát, pelety) je nutné ohřát na vstřikovací teplotu, aby se zajistila potřebná viskozita. Poté se za působení tlaku směs dopraví do temperované formy. Forma bývá zhruba o 15-20% větší než finální produkt, protože se počítá se smrštěním výlisku po spékání. Cílem vstřikování u MIM technologie je dosáhnout požadovaný tvar bez defektů nebo jiných závad s homogenním rozložením prášku. Způsobené defekty při vstřikování již pak nelze napravit v průběhu dalších operací. Je tedy kladen velký důraz na bezchybné vstřikování. Celkový proces vstřikování se skládá z několika kroků, které jsou zobrazeny na obrázku 13: [5]



Obrázek 13: Proces vstřikování [9]

### 2.3.1 Stroje pro vstřikování

Pro MIM se používají stejné vstřikovací stroje jako u vstřikování plastů. Stroje pro MIM technologii nicméně mají některé speciální úpravy, jako např. speciální geometrii šneku. Podle rozměrů a objemu finálního vylisku a počtu dutin ve formě se pak volí typ a velikost vstřikovacího lisu. [9]



Obrázek 14: Vstřikovací lis [10]

### 2.3.2 Formy pro lisy

Správná konstrukce formy je nejdůležitější pro úspěšný proces MIM. Forma bývá vyrobena z oceli, hliníku nebo slitin kovů. Forma je složena z několika částí. Hlavní část je dutina formy, která určí výsledný tvar výrobku. Dutina musí být o několik % větší (udává se okolo 20%), než velikost finálního výrobku kvůli smrštění, které nastává v dalších procesech MIM. Forma bývá jedna z nejnákladnějších součástí, proto návrh formy doprovází mnoho výpočtu a experimentálních testování ke stanovení přesnému smrštění vylisku, a tudíž i správných rozměrů formy. [10]

## 2.4 Odstraňování pojiva

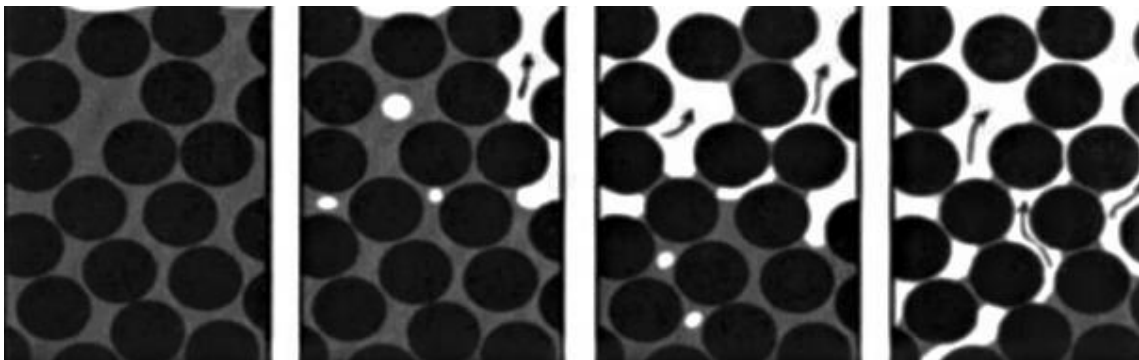
Po vyndání součásti z formy musí před slinováním následovat proces odstranění pojiva. Na konci tohoto procesu bude vytvořený díl tvořen pouze kovem. Je to možná nejkritičtější krok při výrobě MIM. Tvarovaný díl musí vydržet napětí vznikající při vytahování pojiva zevnitř a stále si udržet svůj tvar. Proces vyžaduje dva kroky, a to primární a sekundární debinding. Při primárním debindingu se zbavíme plniva a

povrchově aktivní látky. Při sekundárním debindingu je odstraněno páteří pojivo a pak nastává proces slinování. Existuje několik metod pro primární debinding, které se používají v závislosti na typu požitého pojiva. Nejčastěji používané jsou:

- Tepelně
- Katalyticky
- Rozpouštědlem [5]

#### 2.4.1 Tepelné odstranění pojiva

Pojivo se odstraňuje pomocí vysoké teploty ve speciálních pecích. Podle typu pojiva a prášku se nastavují různé teploty a ochranné atmosféry (argon, vodík, dusík). Důležitý je rovnoměrný a pomalý ohřev, aby se zabránilo porušení součásti. Časově je tato operace velice náročná, obvykle to trvá několik hodin nebo dokonce několik dní. Čas je dán hlavně tloušťkou stěny daného dílu. Průběh je zobrazen na obr.č.15 [12]



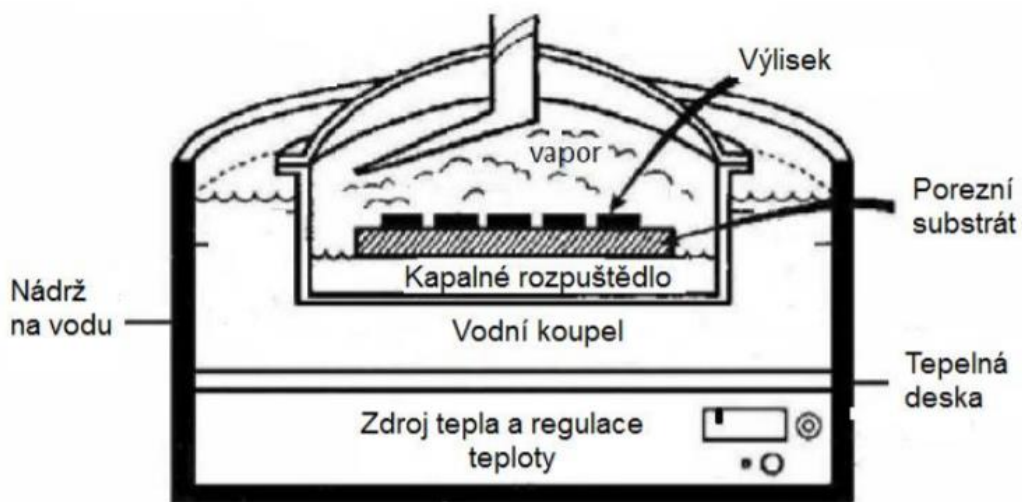
Obrázek 15: Proces tepelného odstranění pojiva [5]

#### 2.4.2 Katalické odstranění pojiva

Používá se pro pojiva, které se pomocí katalyzátoru rozkládají na menší molekuly při zahřátí na určitou teplotu se odpařují z povrchu součásti. Typickým pojivem pro katalické odstraňování (POM) neboli pojivo na bázi polyacetalu. Hlavní aspekty pro tuto metodu je teplota, koncentrace katalyzátoru a velikost částic prášku. Proces probíhá ve speciálních pecích, ve kterých je nehořlavý ochranný plyn. [12]

### 2.4.3 Chemické odstranění pojiva

Tato metoda je rychlejší než tepelné odstranění pojiva, ale má jednu nevýhodu a tou je vysoká cena zařízení a použitého materiálu. Jedinou výjimkou je případ, kdy jako rozpouštědlo slouží voda. Proces probíhá ponořením dílu do rozpouštědla při relativně nízkých teplotách okolo 50°C. Rozpouštědlo bývá buďto plynné, nebo kapalné. V rozpouštědle zahřátém na určitou teplotu pak bývá díl ponořený po dobu několika hodin. Volba rozpouštědla je závislá na použitém pojivu. Velkou výhodou této metody je nízká teplota, která minimalizuje defekty, naopak nevýhodou bývá vysoušení součásti a jistá zdravotní rizika spojená s prací s rozpouštědlem. Možnou alternativou je odstraňování pomocí páry rozpouštědla viz. Obr. 16. Pára vyvolá kondenzaci na díle a extrahuje se organická složka pojiva. [12]



Obrázek 16: Odstranění pojiva za pomoci páry [12]

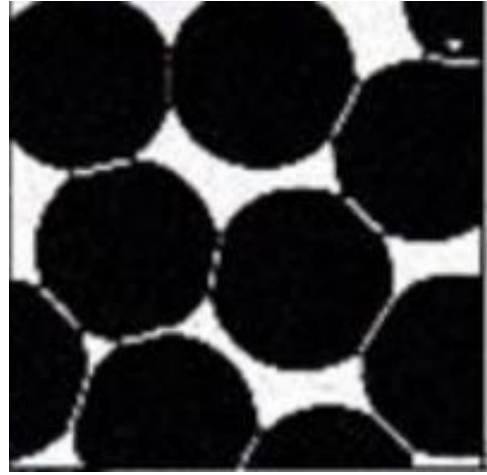
### 2.5 Slinování

Slinování je proces, který dává MIM součásti její finální vlastnosti jako je vzhled, pevnost, tvrdost, tvárnost a odolnost proti opotřebení. Až doposud držely díly pouze díky pojivovému materiálu. Díky vysokým teplotám se začnou tvořit vazby mezi kovovými částicemi a spojují se dohromady. Částice se spojí pevně a odstraní se póry vytvořené při odstraňování pojiva. V určitém okamžiku všechny póry zmizí a částice se spojí do jedné husté a pevné hmoty. Slinování probíhá v ochranné atmosféře nebo vakuu. Kvalita součástky se hodnotí podle dosažené hustoty. V důsledku toho se součástka dramaticky smrští. I když pomocí slinování vytvoříme pevný kovový díl, teplota při tomto procesu nikdy nepřekročí teplotu tání daného materiálu. Slinování probíhá při homologických

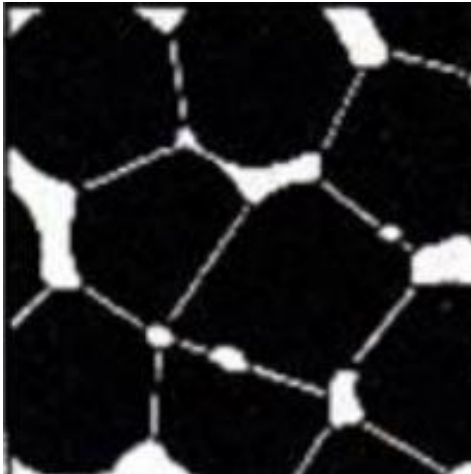
teplotách 0,65 až 0,8 složky s nejvyšší teplotou tání. Výrobky, u kterých je přípustná porezita se slinují obvykle jednou. Při vyšších nárocích se provádí slinování vícekrát, nejčastěji dvakrát (mluvíme o tzv. předslinování). Při působení tlaku během slinování mluvíme o tzv. slinování pod tlakem. U slinování jsou rozhodující faktory teplota a čas. [5] [13]



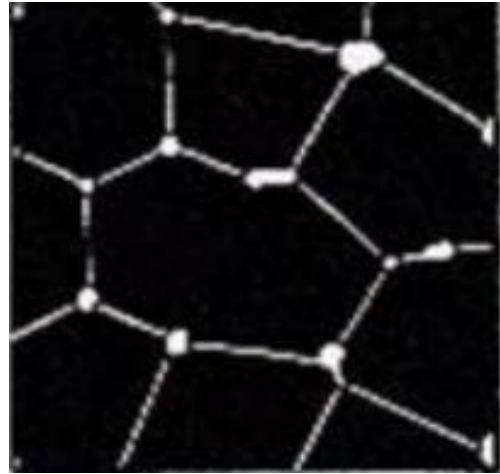
Obrázek 18: Pojivo a kovové částice [13]



Obrázek 17: Postupné natavování zrn [13]



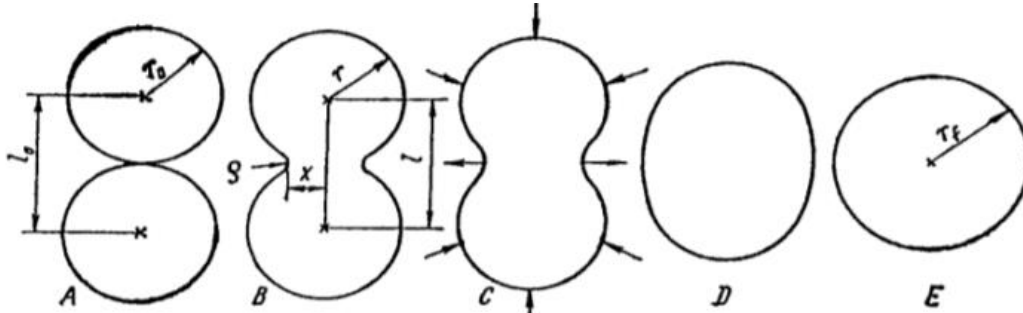
Obrázek 20: Vytváření viditelného můstku mezi částicemi [13]



Obrázek 19: Finální spojení kovových částic [13]

### 2.5.1 Slinování jednosložkových soustav

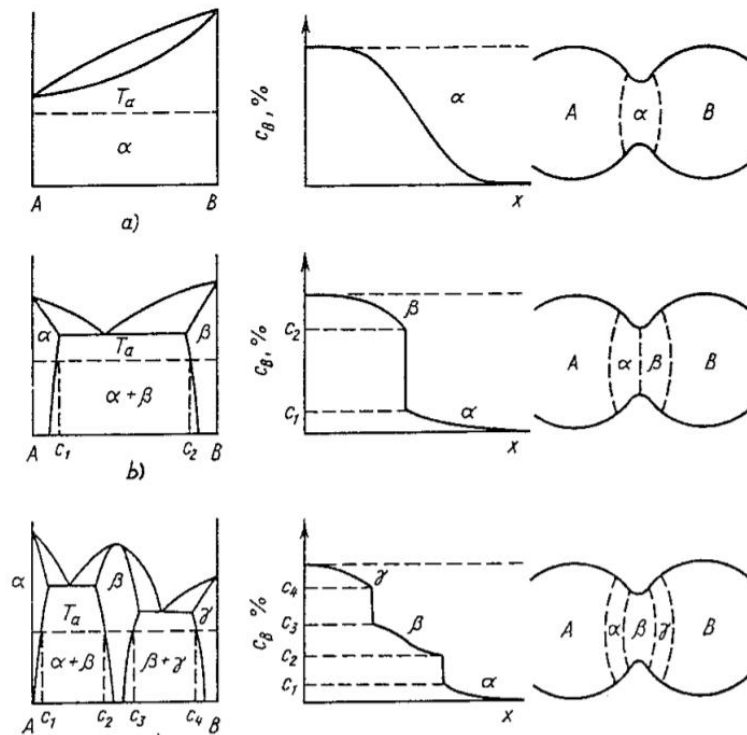
Slinování probíhá v tuhém stavu. Dvě částice mají tendenci vytvořit jednu společnou - viz. Obr. 21. To má za následek zmenšení celkového povrchu a snížení povrchové energie.



Obrázek 21: Spojení 2 částic [8]

### 2.5.2 Slinování vícesložkových soustav

Práškovou metalurgií lze zhotovovat výrobky, které jsou ze směsi různých kovů v libovolném poměru. Je dokonce i možno slinovat práškový kov s nekovem. Jednotlivé fáze směsi prášků tak nejsou v rovnováze, a tak při slinování závisí i na procesu heterodifúze přibližující se k rovnováze systému. Systémy můžeme dělit na - viz. Obr. 22 (s úplnou rozpustností a omezenou rozpustností). U složek, které jsou navzájem nerozpustné závisí slinování na povrchovém napětí. [8]



Obrázek 22: Vztah binárních diagramů a vytváření různých fází při slinování [8]

### 2.5.3 Slinování za vzniku kapalné fáze

Přenos materiálu základního kovu neprobíhá povrchovou difúzí, ale přes tekutou fázi. Systémy (např. slinuté karbidy) s přítomností kapalné fáze jsou při slinování velmi důležité. Systémy mají výrazně lepší a rychlejší slinovatelnost než systémy bez vzniku kapalné fáze, a to díky nižší aktivační energii na rozhraní kovu a tekuté fáze. Smáčivost tuhé fáze tekutou fází musí být co největší a lze ji ovlivnit legujícími přísadami. Usnadnění procesu difuze vede k velkému snížení pórovitosti, což má za následek velké smrštění. Nejdříve slinuje složka s vysokou teplotou tavení, která vytvoří pórovitý skelet. Pak následuje nasycení tekutou fází, která vniká do pórů. [8]

### 2.5.4 Slinovací zařízení a atmosféra

Každý kov je náchylný k oxidaci a tím jsou jeho vlastnosti nepříznivě ovlivněny. Proto je třeba se oxidaci vyhnout. K oxidaci může dojít zejména při procesu slinování, jelikož v tomto procesu se dosahuje vysoké teploty, která pomáhá oxidační reakci. Proto se pro ochranu součástí MIM před oxidováním během procesu slinování používají ochranné atmosféry. Základem je vypláchnutí veškerého kyslíku uvnitř pecí. Pro vyplachování je nejčastěji používán dusík nebo vodík. Některé kovy, jako např. titan, jsou velice reaktivní. Je proto zapotřebí vakuová nebo halogenová atmosféra. Nejčastěji používané atmosféry jsou dusík, vodík, argon, vzduch a vakuum. [5]

#### 2.5.4.1 Vakuum, vzduch

Některé kovy nevyžadují zvláštní atmosféru a mohou být slinovány v peci s normálním vzduchem. Tento případ platí pro ušlechtilé kovy, jimiž mohou být např. zlato nebo platina. Odstranit atmosféru úplně je také možnost, jak kov chránit před oxidací. Proto se používá vakuum. Vakuum je pro vysoce reaktivní kovy. Metoda na bázi vakua je bohužel velice nákladná a je zapotřebí speciálních zařízení. Největší nevýhodou je však špatný rozvod tepla, které se přenáší ozařováním. [5]

#### 2.5.4.2 Argon

Argon je velice vzácný a patří mezi inertní plyny. V peci je používán jen pro nejvíce reaktivní kovy jako např. titan či jiné super slitiny. [5]

### 2.5.4.3 Dusík

Dusík patří mezi inertní plyny. Naplníme-li pec dusíkem, aby se zabránilo oxidační reakci, bude stejně mírná oxidace probíhat, protože dusík nedokáže zabránit oxidaci úplně. V některých kovech může probíhat oxidačně-redukční reakce. Nejčastěji se dusík používá pro oceli s vysokým obsahem uhlíku. [5]

### 2.5.4.4 Vodík

Vodík je často používanou ochrannou atmosférou. Funguje na úplně jiném principu než dusík. Dusík zastavuje oxidační reakce, ale zatímco vodík je použit jako redukční činidlo a oxiduje místo kovových částí. Tato atmosféra je výhodná zejména pro ocel a jiné nízkouhlíkové slitiny. [5]

### 2.5.5 Vybavení pro slinování

Slinovací pec je hlavní zařízení pro slinování, jejíž hlavní úloha je udržet danou atmosféru a teplotu slinování. Teplo dodávají topné články, které jsou řízeny počítačem. Počítač shromažďuje na základě měření všechny různé proměnné v cyklu jako je tlak v komoře, obsah vodíku, kyslíku či dusíku. Pece se mohou dělit na dvě možné, buďto máme klasickou dávkovou pec, je to obvykle válcová komora s dveřmi, do které se následně vkládají jednotlivé díly nebo může být pec kontinuální, která je velice dlouhá s průchodem dopravníku. Klasické uspořádání komory bývá: předehřívací zóna, spékací zóna a chladicí zóna. Výhodou kontinuálních pecí je možnost automatizace a velikost dávky, naopak nevýhodou bývá velikost pece a možný únik tepla. [5]



Obrázek 23: Kontinuální pec [14]



## 2.6 Zásady návrhu dílů pro metodu MIM

Dalo by se říci, že pro technologii MIM lze použít návrhu stejných tvarů jako u technologie vstřikování plastů. V tomto případě jsou však jistá omezení.

### **Omezení**

- Žádné vnitřní uzavřené dutiny
- Žádná vybrání na vnitřních vrtáních
- Poloměr rohu větší než 0,075 mm
- Nejmenší průměr otvoru 0,1 mm
- Minimální síla 0,2 mm
- Rozsah hmotnosti 0,02 g až 250 g

### **Žádoucí vlastnosti**

- Postupné změny síly dílu
- Největší rozměr menší než 100 mm
- Hmotnost menší než 200 g
- Síla stěny menší než 10 mm
- Skládání z jednoho kusu
- Ploché tvary pro podstavec

### **Dovolené vlastnosti konstrukce**

- Výstužná žebra
- Slepé otvory
- Výčnělky a hřeby
- Vnější či vnitřní závit
- Otvory ve tvaru D [3]

## 2.7 Přesnost dílů MIM

Jedna z otázek při zavedení nových technologií je přesnost rozměrů. Pro metodu MIM byly navrženy tolerance uvedené v tabulce č.2. V úvahu se také musí brát smrštění součásti. [3]

<b>Jmenovitý rozměr (mm)</b>	<b>Technologie MIM (mm)</b>	<b>Lití metodou vytavitelného modelu (mm)</b>
Do 3	$\pm 0,05$	-
3-6	$\pm 0,06$	$\pm 0,12$
6-15	$\pm 0,075$	$\pm 0,15$
15-30	$\pm 0,15$	$\pm 0,25$
30-60	$\pm 0,25$	$\pm 0,30$
Přes 60	$\pm 0,5$ % jmenovitého rozměru	-

*Tabulka 2: Srovnání technologií z hlediska dosahovaných přesností [3]*

## 2.8 Materiály vhodné pro metodu MIM

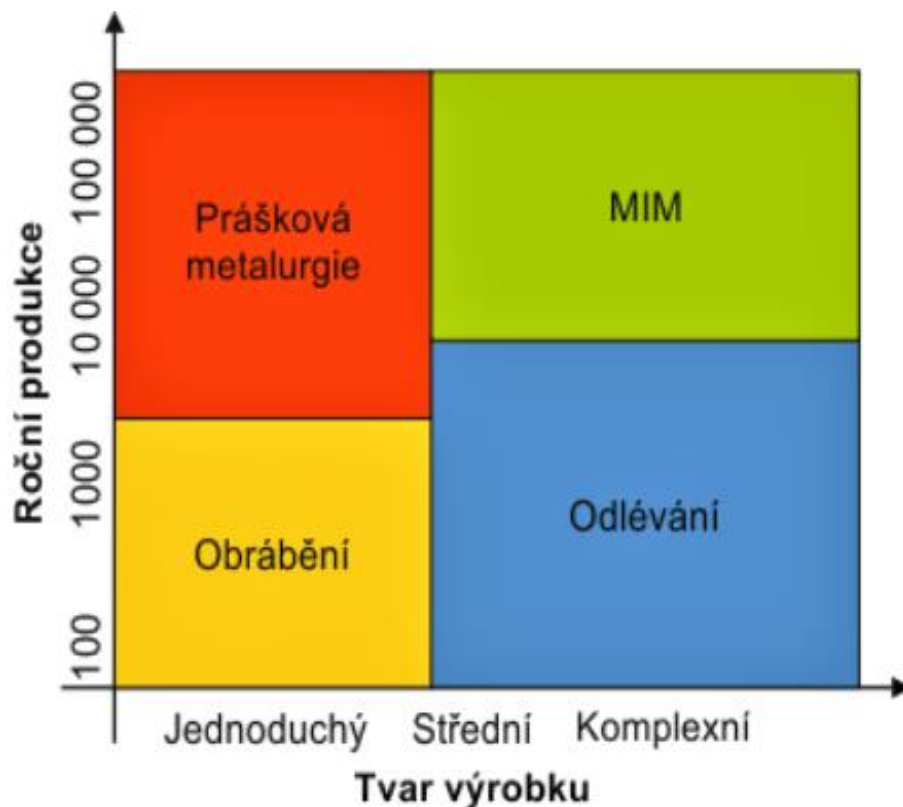
Možnost využití širokého spektra materiálů je jednou z výhod technologie injekčního vstřikování kovů. Navíc součásti vykazují velice dobré výsledky při únavových zkouškách materiálů. Některé materiály jsou zobrazeny v tabulce č.3. Všechny používané materiály jsou přidány v příloze.

Materiál	Složení %	Hustota %	Mez kluzu Mpa	Prodloužení %	Tvrдость
1020 steel	Fe-0,2C	96	380	23	-
2208(HT)	Fe-2Ni-0,8C	97	1780	3	50HRC
2700	Fe-7Ni	99	420	34	67HRB
2705	Fe-7Ni-0,5C	98	860	12	22HRC
4120	Fe-1Cr-0,2C	97	483	17	67HRB
4340	Fe-2Cr-1Ni-1Mn-0,4C	96	945	9	22HRC
Fe50%Co	Fe-50Co	99	485	4	88HRB

Tabulka 3: Přehled všech používaných materiálů v MIM [15]

## 2.9 Shrnutí metody MIM

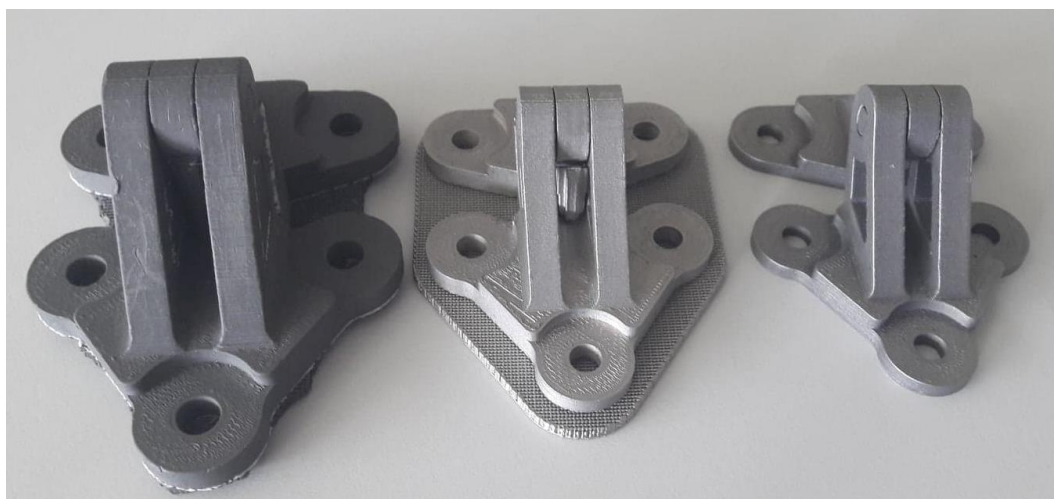
Technologie prošla velkým pokrokem v posledních letech a roste raketovým tempem díky svým výhodám a možnostem. Konstrukteři nejsou omezeni při návrhu složitých tvarů u součástí jako u jiných konvenčních metod. Technologie je velice výhodná i z ekonomického hlediska, což je dnes na trhu s rostoucí konkurencí důležité. Lze zpracovat celou škálu materiálů, díky čemuž se technologie dostává do různých průmyslových odvětví. V dnešní době nalezneme produkty vyrobené pomocí MIM téměř všude. Od vojenského odvětví, automobilový průmysl, až po medicínské aplikace. Technologie si do budoucna slibuje stále velký rozvoj díky svým zmíněným výhodám.



Obrázek 24: Kdy je vhodné využít MIM technologii [1]

### 3. Možnost využití 3D tisku v procesu MIM

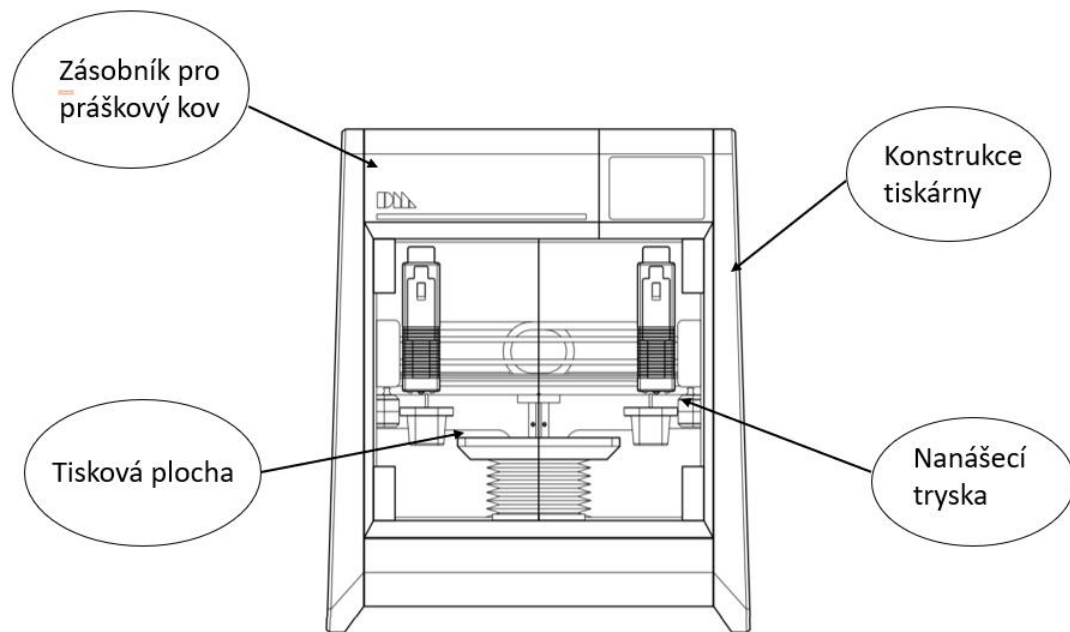
Jelikož se technologie neustále posouvají, je pro ně možné najít více uplatnění. V procesu MIM je to právě využití 3D tiskáren. Celý proces se skládá z tisku součásti, následné odstraňování pojiva a v poslední fázi sintrování. 3D tisk v procesu MIM je spíše vhodný pro menší a střední podniky, které čelí rostoucímu tlaku ze stran konkurentů. Hodí se zejména pro výrobu prototypů či těžko dostupných, nebo na výrobu složitých, součástí. 3D tisk umožní společnosti rychlou realizaci (řádově ve dnech), rychlou výrobu součástí a tím snížení nákladů. Vstřikování kovu do formy je určeno pro výrobu o velkých objemech, díky čemuž jsou náklady na díl velmi nízké. Při menší produkci výroby je však technologie velice nákladná hlavně díky vysokým pořizovacím nákladům na nástroje a dlouhé době při realizaci k výsledné a bezchybné součásti. Hlavně vstřikovací forma je velice komplikovaná. Je tvořena řadou složitých dutin, vložek a chladicích kanálů, musí být zkonstruována tak, aby odolala vysokým tlakům a teplotám a tím je velice nákladná. Díky 3D tisku forma a vstřikovací lisy z procesu odpadají. Tiskárna využívá technologii tzv. Bound Metal Deposition, kdy se kovová tyčinka (kovový prášek a polymerová pojiva) nataví a pak vytlačuje na tiskovou plochu, kde vytváří tzv. zelený díl. Tento díl se následně položí do rozpouštědla, kde se z něj vyplaví pojivo. Tím je připraven na poslední fázi a to sintrování, které probíhá v peci.



Obrázek 25: Díl procházejí jednotlivými kroky

Na obrázku 25 máme jako první zobrazenou tzv. zelenou část, která je výstupem 3D tiskárny. Druhá součást je po procesu odstranění pojiva a poslední součást je po procesu sintrování a odstranění všech podpěr. Na poslední součásti je zřetelně vidět velké smrštění. [16]

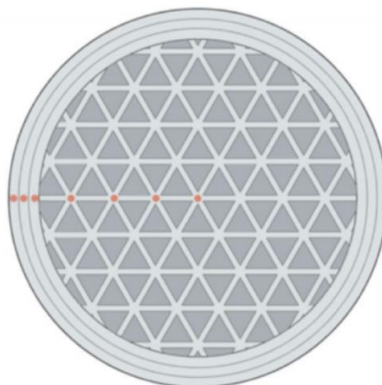
### 3.1 Rozbor 3D tiskárny



Obrázek 26: 3D tiskárna [16]

#### 3.1.2 Struktura tisknutí

Struktura neboli výplň popisuje mřížkovou strukturu tištěnou v celé části obklopené stěnami, které tvoří skořápku součásti. Díky výplni je možno snížit celkovou hmotnost součásti. Použití výplně snižuje množství materiálu a času potřebného pro tisk součásti. Dále to také umožní snížit dobu cyklu deninování. Součást tak dosahuje vynikající tuhosti při minimální hmotnosti. Tvar a geometrie výplně je velice důležitá. Např. trojúhelníková výplň nabízí několik výhod oproti čtvercové nebo šestihranné. Trojúhelníková výplň má za následek např. konstantní modul pružnosti. [16]



Obrázek 27: Trojúhelníková výplň [16]

### 3.2 Prostorová orientace dílu

Orientace částí dílu je velice důležitá pro celý úspěch procesu. Pro některé orientace je nutno použít podpěrný materiál. Podpěry se mohou během procesu posunout a je zapotřebí se této situaci vyhnout. Řešením může být vhodné konstrukční řešení.

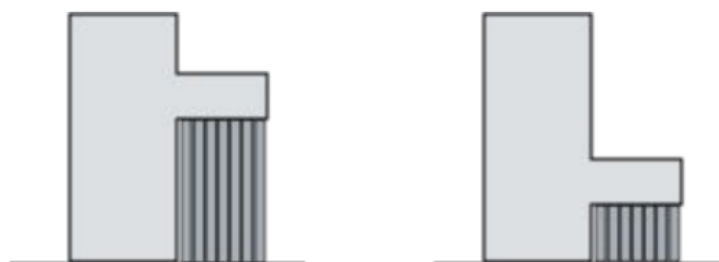


Obrázek 28: Nevhodná a vhodná orientace dílu [16]

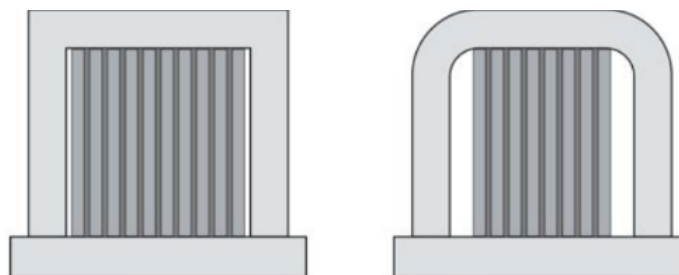


Obrázek 29: Konstrukční řešení pro nevhodnou orientaci [16]

Podpěry budou během procesu spékání držet nestabilní část, aby se součást nezhroutila. Nejčastěji bývají používána žebra, sloupy či jiné prvky. Bývají odděleny od součásti tenkou vrstvou keramického materiálu, aby bylo možné výsledný díl snadno osvobodit od podpěr a základové desky. [16]



Obrázek 30: Využití podpěr [16]



Obrázek 31: Využití podpěr [16]

### 3.3 Proces MIM s použitím 3D tiskárny

Použití 3D tisku poskytuje příležitost zvládnout realizaci dílu za kratší dobu a snížit náklady. Typickým využitím bývá výroba prototypů nebo těžko sehnatelných dílů. V poslední době se tímto zabývá mnoho firem. Např. firma Desktop Metal, která přišla se řešením "Studio System". Je to třídílné řešení. Proces je řízen cloudovým softwarem, který zajišťuje bezproblémový a jednoduchý postup. Tento proces se skládá ze 3 kroků, jimiž jsou 3D tiskárna, debinder a pec. Výhodou tohoto kompaktního je, že jej lze použít i v kancelářských prostorách, protože nejsou prostorově nákladné. [16]

#### 3.3.1 3D tiskárna

Tiskárna vytlačuje natavené vlákno z kovových tyčinek a tvaruje tzv. zelenou část pomocí technologie BMD neboli Bound Metal Deposition (nanášení kovového prášku stmeleného polymerem). Tento proces je velice podobný (FFF) neboli Fused Filament Fabrication, který se běžně používá ve 3D tisku. Hlavní rozdíl nastává v tom, že při normálním 3D tisku se pomocí laserů selektivně natavuje kovový prášek, zatímco BMD vytlačuje vázané kovové tyče. Tyče jsou napájeny přes zahřátý extrudér a nanášeny na konstrukční desku vrstvu po vrstvě. Použití 3D tiskárny otevírá nové možnosti výroby kovových dílů. [16]

#### 3.3.2 Odstranění pojiva

„Zelená část“ se přesune do pracího zařízení, kde je ponořena do speciální rozpouštědla, které rozpustí voskovou část pojiva, díky čemuž vznikají otevřené póry. Rozpouštědlo se musí dostat skrz celou tloušťku součásti. Doba odložením závisí tedy na tloušťce stěny. [16]

#### 3.3.3 Sintrování

Pec ohřívá díly těsně pod jejich bod tavení, tím se pojí kovové částice tak, aby vytvořily homogenní díl bez zbytkového napětí s 99% hustotou. Pec je plně automatizovaná. [16]





Obrázek 32: Celý 3dílný komplex od firmy Desktop Metal [16]

### 3.4 Možné dokončovací techniky

Jelikož díly tištěné na 3D tiskárně mají obvykle složitou geometrii, je velice důležité zvážit, jaká bude použita dokončovací technika pro zpracování komplexní součásti. Tištěné díly mají relativně drsné povrchy, za což mohou většinou viditelné tiskové linky, které je za potřeby odstranit. Povrchová úprava může ovlivnit konstrukční specifikace, proto je velice důležité uvažovat o dokončovací metodě před zhotovením dílu. Nejčastěji se používá vibrační omílání. Použité médium určuje výslednou hladkost a finální lesk součásti. Dalšími způsoby, jak je možno součásti dodat požadovanou kvalitu, je pomocí kotoučových přístrojů či otryskáváním. [16]



Obrázek 33: Omílací stroj [17]

## 4. Praktická část

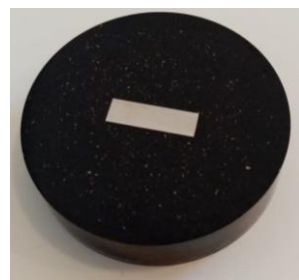
V první části praktické části se zaměříme na porovnání 3 vzorků vyrobených různými technologiemi (MIM, 3D tisk a obrábění). Porovnání je hlavně z hlediska drsnosti povrchu a mikrostruktury povrchu. Ve druhé praktické části porovnáme vliv tepelného zpracování na výslednou strukturu u chromolybdenových ocelí ze 2 přiložených vzorků. Zkoušky na daných materiálech probíhaly na konfokálním mikroskopu. Výsledky měření jsou zobrazeny a popsány níže.

### 4.1 Průběh přípravy vzorků

Vzorky jsou nejprve rozříznuty a následně zalisovány do formy s pryskyřicí (viz. Obr.34,35,36), která se následně vytvrdí. Poté proběhne broušení, aby se minimalizovali povrchové nerovnosti. Pro dobré výsledky na mikroskopu se vzorky následně vyleští a poté pro vyvolání mikrostruktury naleptají.



Obrázek 35: MIM



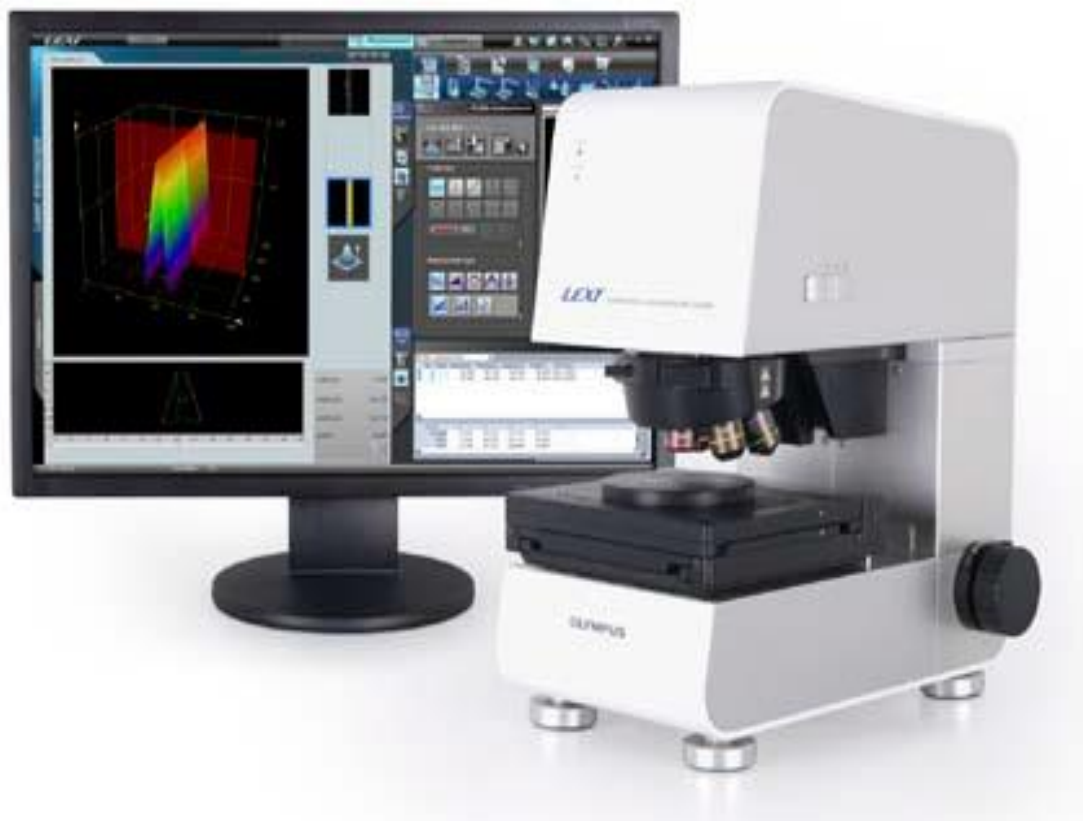
Obrázek 34: 3D tisk



Obrázek 36: Obrobek

## 4.2 Měření

Následné měření mikrostruktury a drsnosti povrchu proběhlo na konfokálním mikroskopu OLYMPUS LEXT. Tento konfokální mikroskop nám umožnil nasnímat makrostrukturu a drsnost povrchu. Velkou výhodou tohoto mikroskopu je možnost naskenování povrchu a převedení do 3D podoby pro lepší názornost viz. Příloha 2 a 3



Obrázek 37: Konfokální mikroskop OLYMPUS LEXT [18]

## 4.3 Vzorky k porovnání

### 4.3.1 Obrobek

Značení materiálu:

<b>EN</b>	32CrMoV12-10*
<b>W.Nr.</b>	1.7765
<b>DIN</b>	32CrMoV12-10
<b>ČSN</b>	15 230

Tabulka 4: Značení materiálu [19]

Složení materiálu:

Prvek	C	Cr	Mo	V	Si	S	Mn	P	Ni
[%] min	-	-	-	-	0,1-	-	0,4-	-	-
max	0,35	3,00	1,00	0,25	0,4	0,002	0,7	0,015	0,30

Tabulka 5: Složení materiálu [19]

Mechanické vlastnosti:

Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	Prodloužení A5 [%]	Tvrdoost
800*	940	19	380 HB

Tabulka 6: Mechanické vlastnosti materiálu [19]



Obrázek 38: Obrobek

### 4.3.2 3D tisk (váleček)

Značení materiálu:

<b>EN</b>	X5CrNiCuNb16-4
<b>W.Nr.</b>	1.4542
<b>ČSN</b>	-
<b>ISO</b>	4542-174-00-1

Tabulka 7: Značení materiálu [20]

Složení materiálu:

<b>Prvek</b>	<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Nb + Ta</b>
[%] min	-	15,5-	3-	3-	-	0,15-
max	0,07	17,5	5	5	1,0	0,45

Tabulka 8: Složení materiálu [20]

Mechanické vlastnosti:

<b>Rp0,2 [MPa]</b>	<b>Rm [MPa]</b>	<b>Prodloužení A5 [%]</b>	<b>Tvrдост</b>
660	1042	8,5	37 HRC

Tabulka 9: Mechanické vlastnosti materiálu [20]



Obrázek 39: 3D tisk

### 4.3.3 MIM součástka

Značení materiálu:

<b>ČSN</b>	41 9550
<b>EN</b>	50CrMoV13-14
<b>W.Nr.</b>	1.2357
<b>AISI</b>	S7

Tabulka 10: Značení materiálu [21]

Složení materiálu:

Prvek	C	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	Cr
[%] min	0,45-	-	1-	0,2-	-	-	-	2,5-
max	0,6	0,3	1,8	1	0,5	0,05	0,05	3,5

Tabulka 11: Složení materiálu [21]

Mechanické vlastnosti:

Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	Prodloužení A5 [%]	Tvrдость
1530	1750	2	46-53 HRC

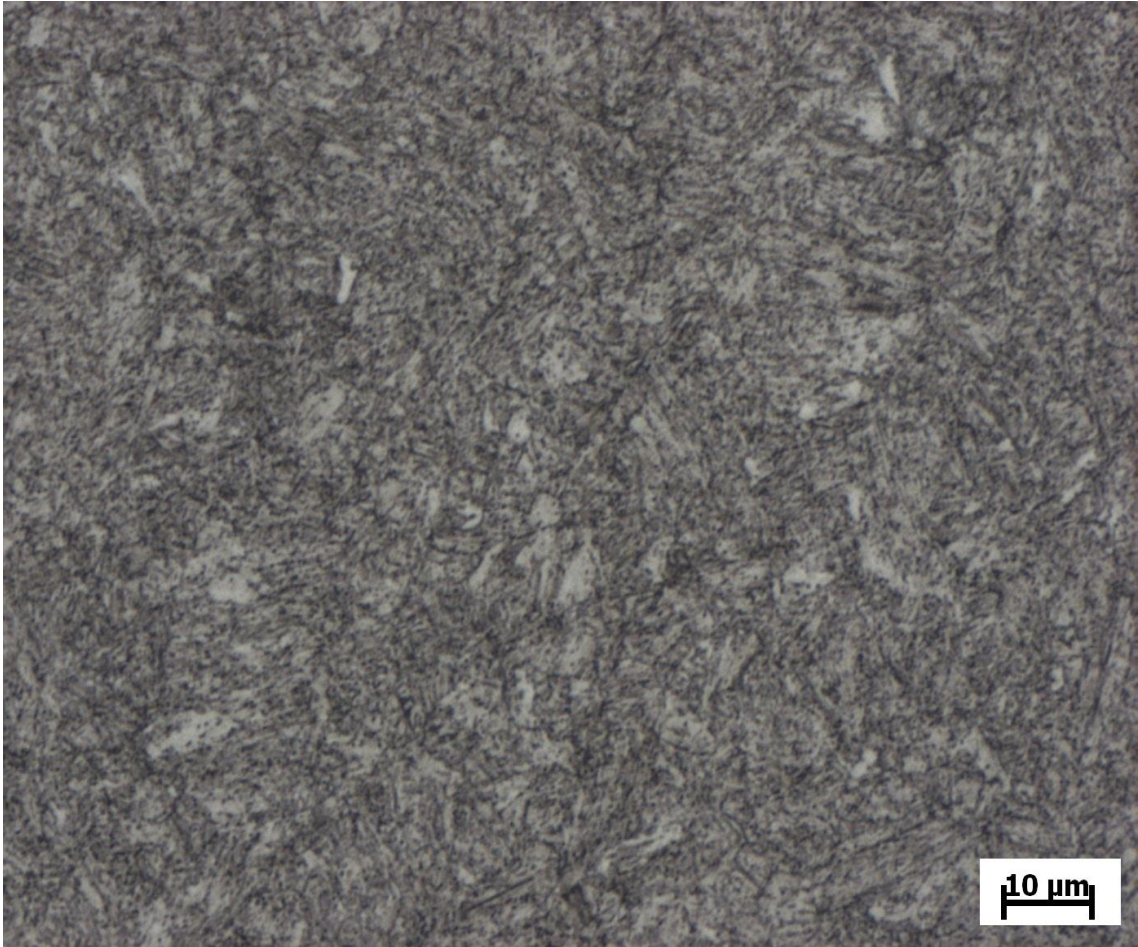
Tabulka 12: Mechanické vlastnosti materiálu [21]



Obrázek 40: MIM

## 4.4. Hodnocení z hlediska struktury povrchu

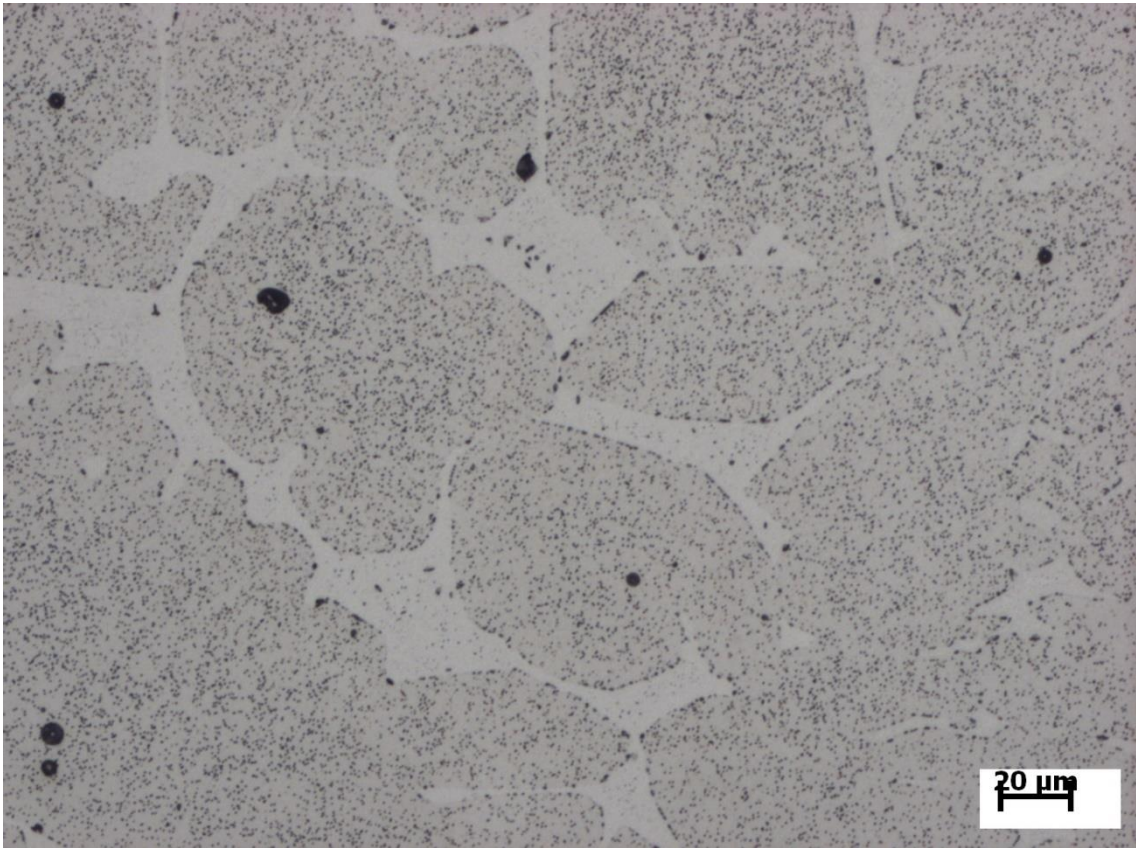
### 4.4.1 Obrobek



*Obrázek 41: Mikrostruktura obrobku, zvětšení 500x*

Popis: Struktura obrobeného materiálu je tvořena bainiticko-martenzitickou strukturou. Je zde také vidět zbytkový austenit.

#### 4.4.2 3D tisk

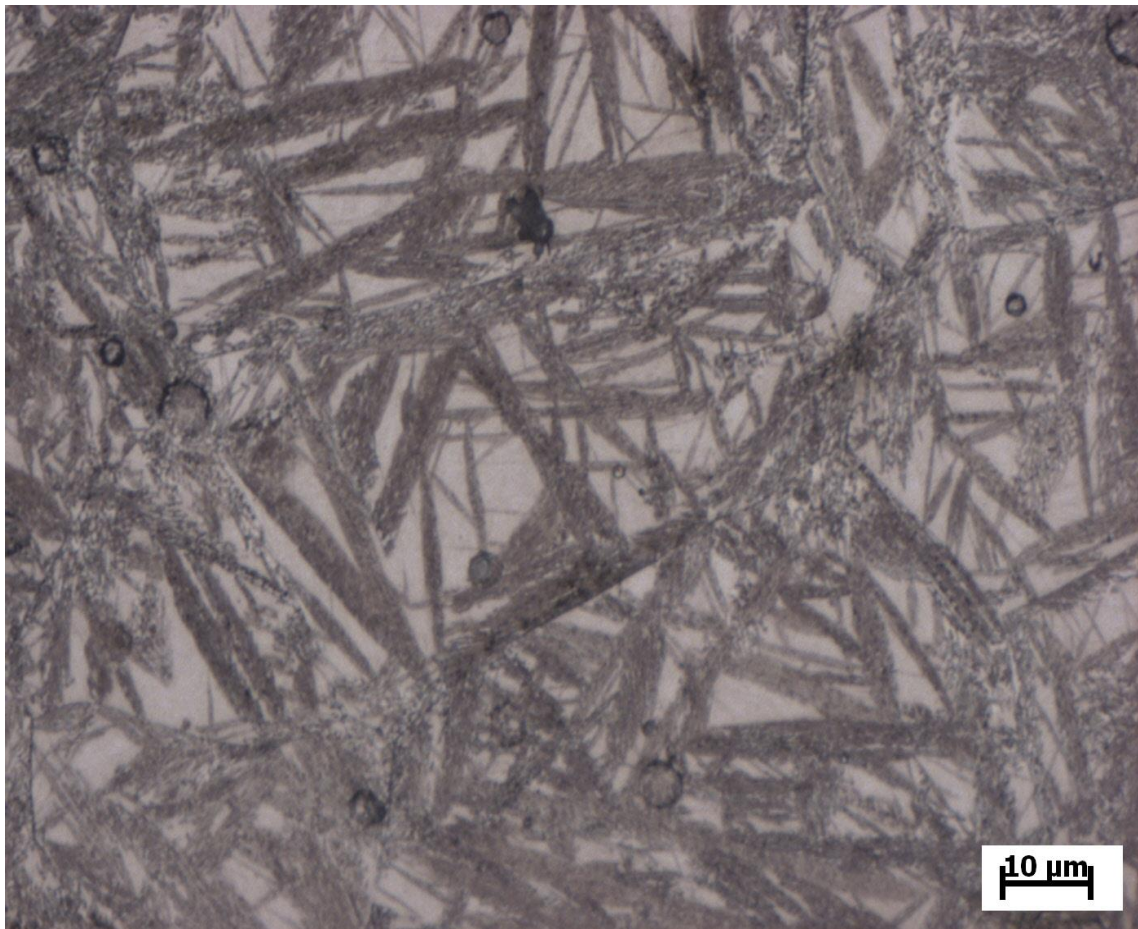


Obrázek 42: Mikrostruktura 3D tisku, zvětšení 200x

Popis: Jedná se o strukturu přesyceného feritu. Na obrázku jsou vidět precipitáty  
přidaných prvků uvnitř zrn a zanikající póry.



#### 4.4.3 MIM součást

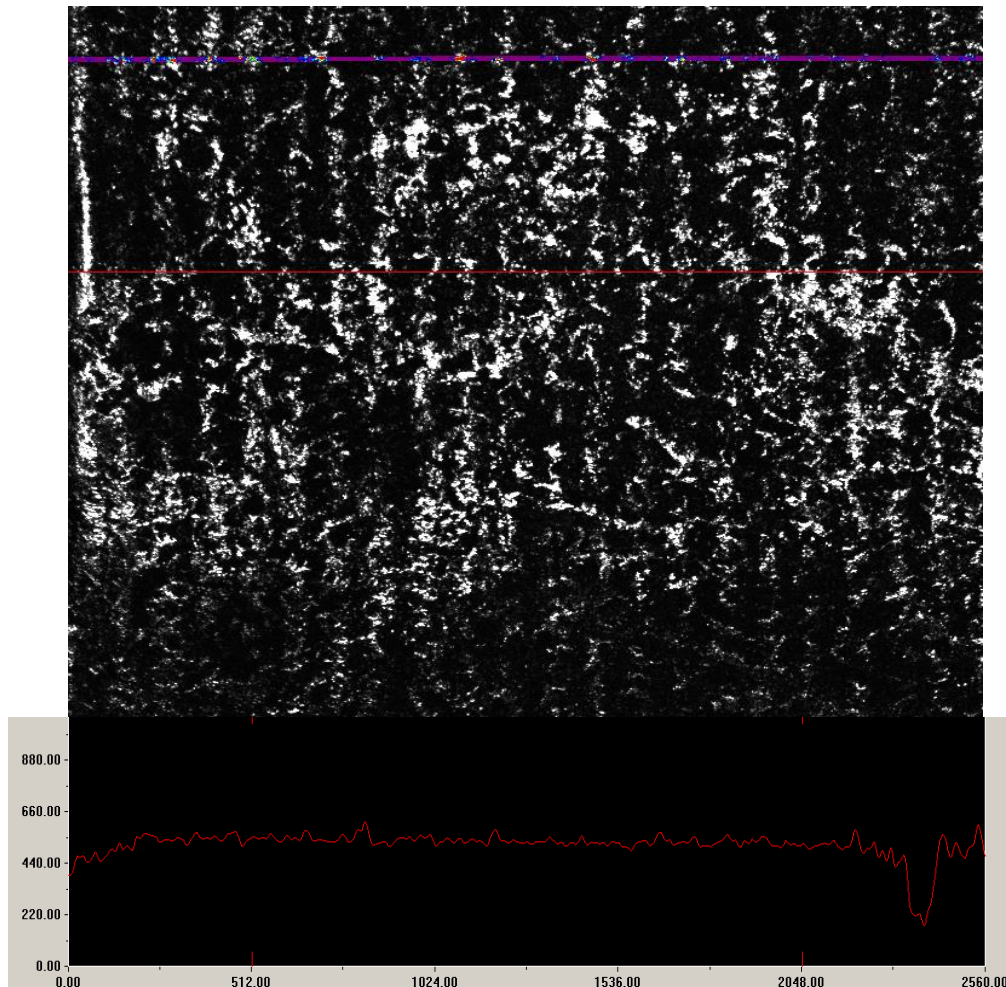


Obrázek 43: Mikrostruktura MIM, zvětšení 500x

Popis: Struktura je tvořena martenzitem se zbytkovým austenitem a jsou také vidět zanikající póry.

## 4.5 Hodnocení z hlediska drsnosti povrchu

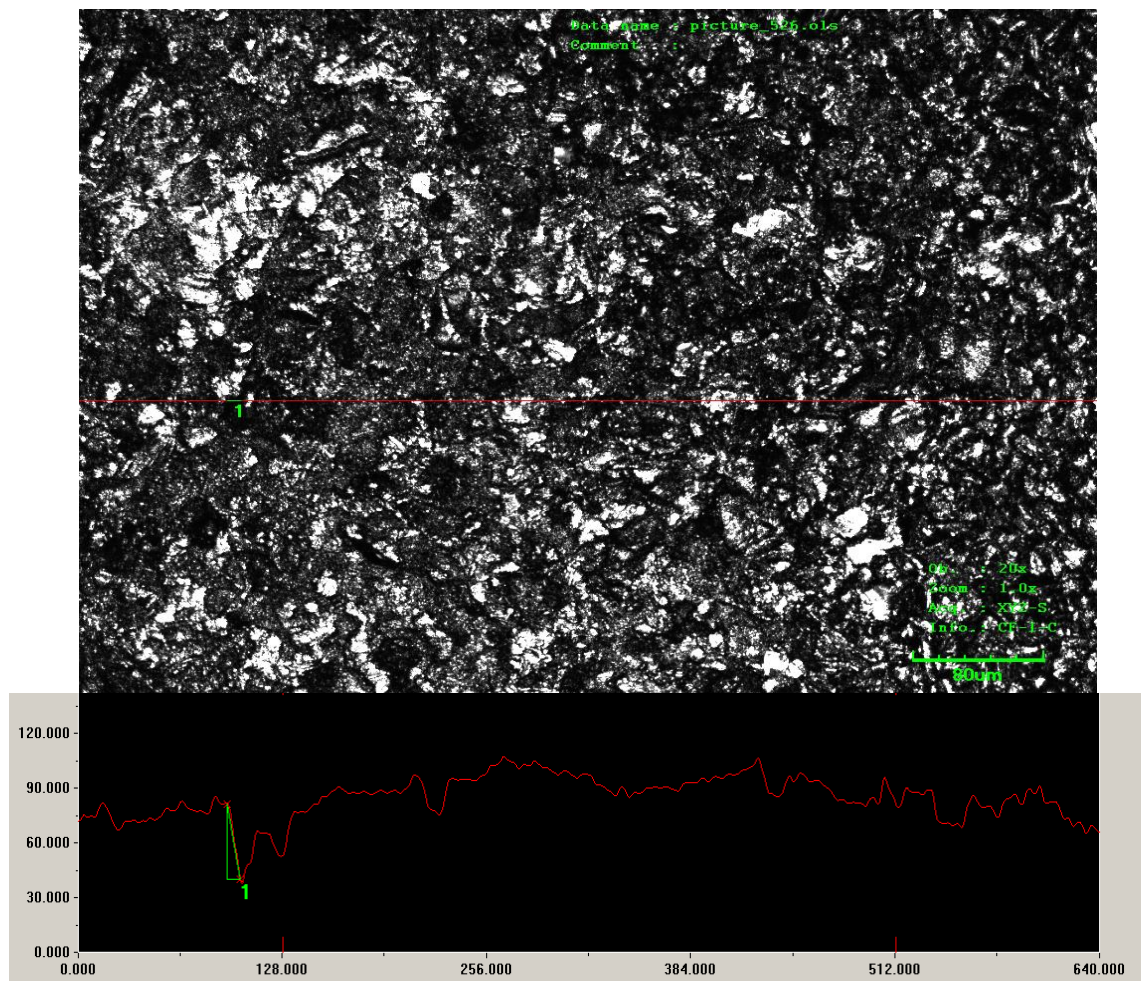
### 4.5.1 Obrobek



Obrázek 44: Drsnost obrobku

Popis: Materiál EN 32CrMoV12-10\*. Na obrázku je zobrazena drsnost povrchu materiálu. Na grafu ve spodní části jsou znázorněny výchylky drsnosti materiálu. Průměrná výchylka většinou nepřesahuje cca 100 μm. Pouze v pravé části grafu je vidět jedna velká výchylka cca 350 μm.

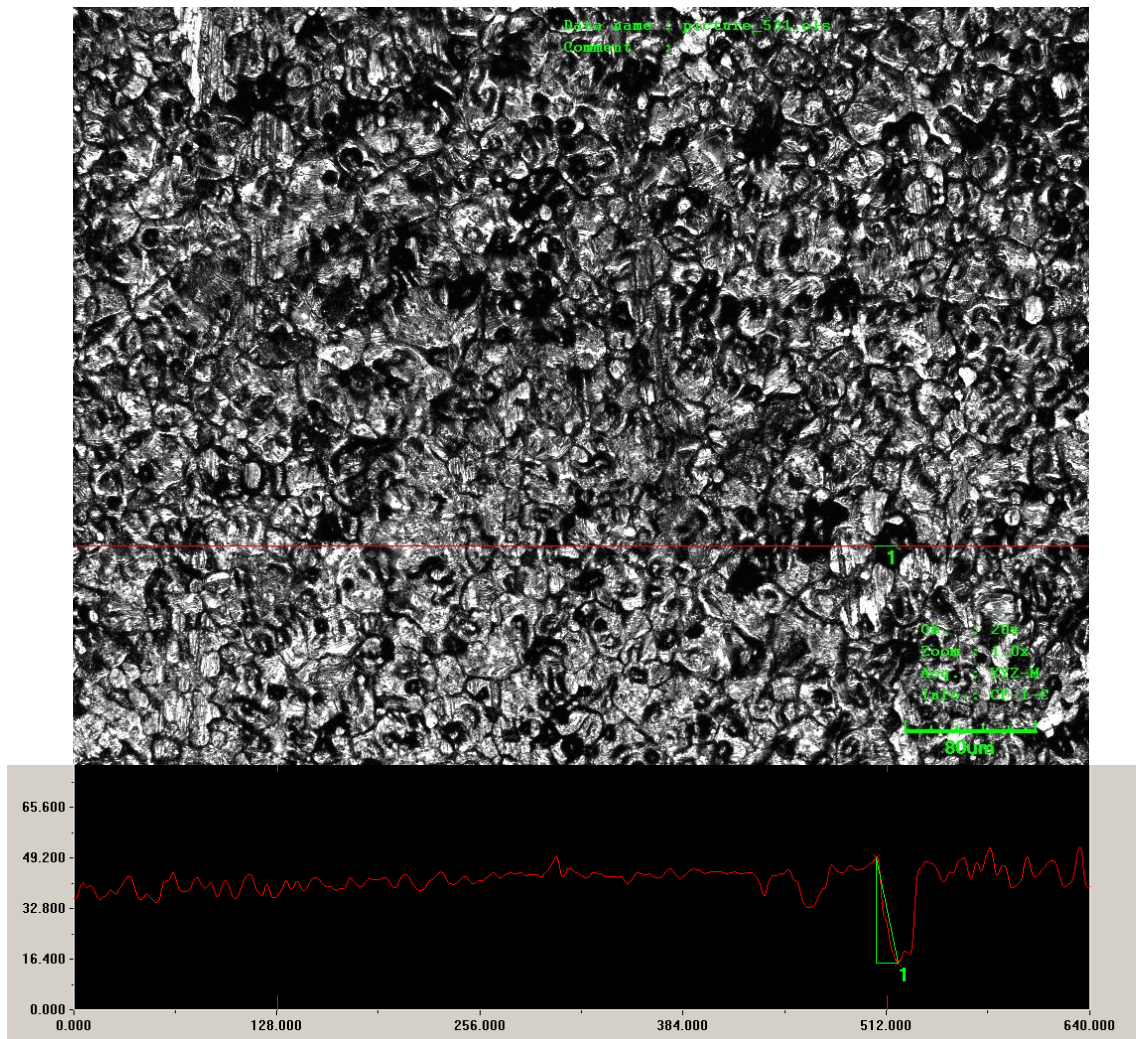
## 4.5.2 3D tisk



Obrázek 45: Drsnost 3D tisku

Popis: Materiál X5CrNiCuNb16-4. Na obrázku je zobrazena drsnost povrchu. Na grafu ve spodní části jsou znázorněny výchyly drsnosti materiálu. Průměrná výchylka většinou nepřesahuje 30  $\mu\text{m}$ . Největší výchylka v levé části grafu činí 42  $\mu\text{m}$ .

### 4.5.3 MIM součást



Obrázek 46: Drsnost MIM

Popis: Materiál EN 50CrMoV13-14. Na obrázku je zobrazena drsnost povrchu materiálu. Na grafu ve spodní části jsou znázorněny výchylky drsnosti materiálu. Průměrná výchylka většinou nepřesahuje cca 20  $\mu\text{m}$ . Pouze v pravé části grafu je vidět jedna velká výchylka cca 33  $\mu\text{m}$ .

## 4.6 Zhodnocení

Zkoušky proběhly na 3 dodaných vzorcích z nichž dva (MIM a obrobek) mají podobné chemické složení. 3D tisk byl v tomto případě použit jen pro zajímavost a doplnění. Jelikož 3D technologie prozatím nenabízí tak širokou škálu možných materiálů jako např. MIM.

- Struktura materiálu

Díl, který je obroben byl z válcované oceli, což má za následek jemnozrnnou bainiticko-martenzitickou strukturu. Díl vyrobený 3D tiskem má strukturu přesyceného feritu s precipitáty uvnitř zrn. Poslední díl, který je vyroben MIM technologií, má strukturu, která je tvořena martenzitem a zbytkovým austenitem.

- Drsnost povrchu

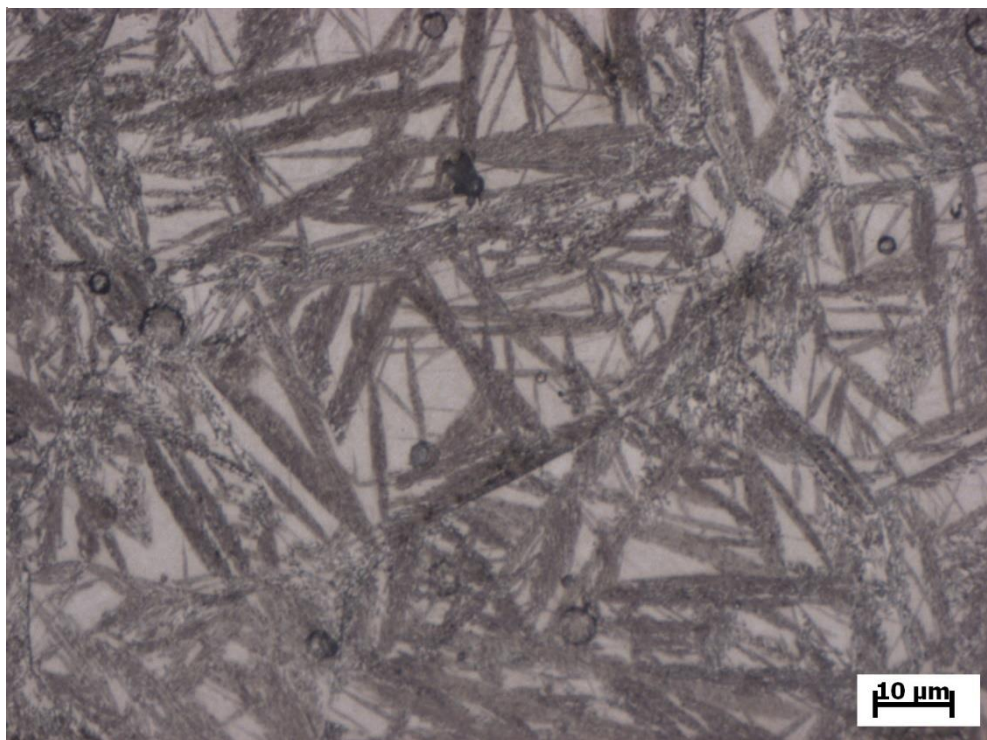
Na obrázcích je velice dobře vidět, jak se liší drsnost u dílů vyráběných obrobením, 3D technologií a MIM technologií. V tomto případě nejlépe vychází díl, který je vyroben MIM technologií.

## 4.7 Vliv tepelného zpracování na strukturu chrommolybdenových ocelí

### 4.7.1 Sintrovaný vzorek



Obrázek 48: Sintrovaná součást



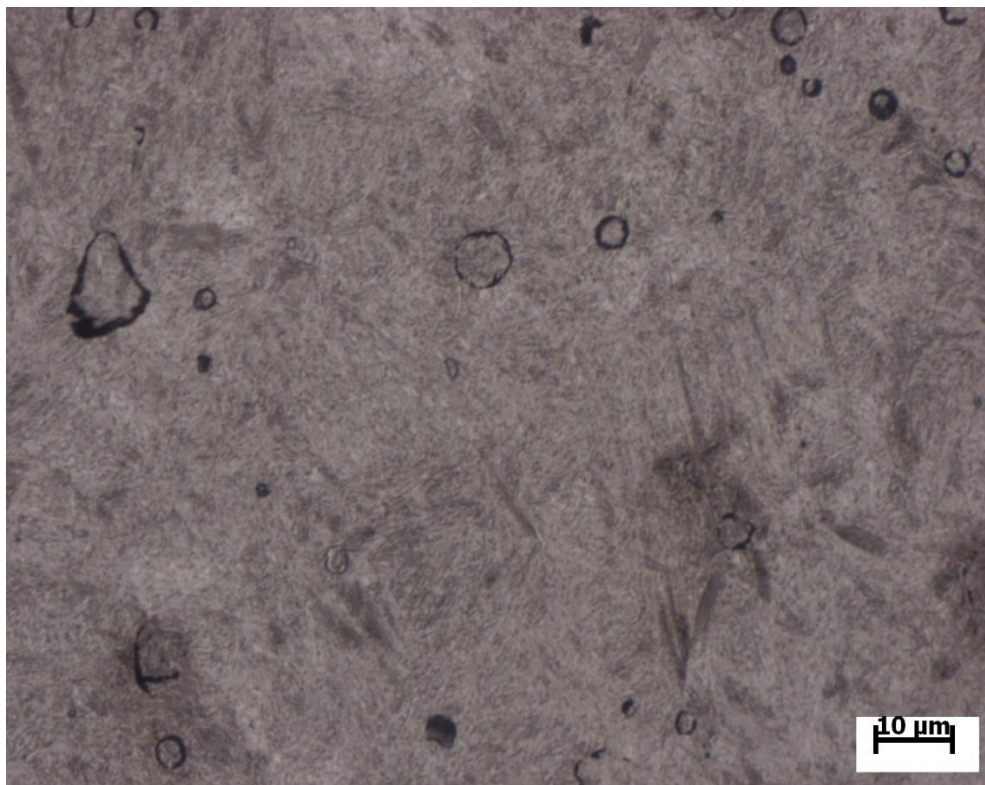
Obrázek 47: Mikrostruktura, zvětšení 500x

Popis: Struktura je tvořena martenzitem se zbytkovým austenitem a jsou také vidět zanikající póry které zanikají při procesu sintrování.

#### 4.7.2 Tepelně zušlechtěný vzorek



Obrázek 50: Tepelně zušlechtěný díl



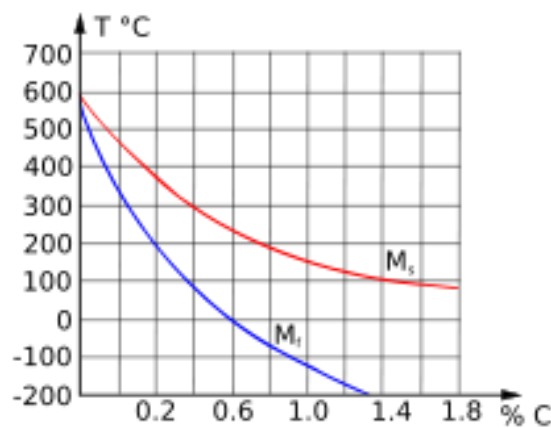
Obrázek 49: Mikrostruktura, zvětšení 500x

Popis: Struktura je feriticko cementitická neboli sobrbit, který je ve většině struktury. Dále je vidět zbytkový martenzit a zanikají póry.

## 4.8 Zhodnocení

### 4.8.1 Sintrovaný vzorek

Při procesu sintrování je součást zahřívána na teplotu 0,65 až 0,8 teploty tavení a následně musela být rychle ochlazená. Při přechlazení při teplotách nižších než 200 °C vzniká z austenitu martenzitickou přeměnou martenzit, tj. nerovnovážný přesycený tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ . Ochlazení probíhá rychlostí, při které jsou potlačeny difúzní přeměny austenitu. Přítomnost zbytkového austenitu je nežádoucí, protože snižuje tvrdost oceli. Teplota  $M_s$  je ovlivněna především chemickým složením. Tato struktura je dobrá díky své tvrdosti naopak materiál tvořený touto strukturou velice křehký.



Obrázek 51: Graf popisující tvorbu martenzitu [22]

### 4.8.2 Tepelně zušlechtěný vzorek

Popouštění na vysoké teploty (zušlechtování) probíhá u ocelí obvykle v rozmezí teplot 400-600 °C. Snažíme se docílit optimální kombinace mezi pevností, kluzu, houževnatostí a plasticity. Výsledkem pochodů zušlechtování je feriticko-cementitická struktura neboli Sorbit, který tuto kombinaci vlastností umožňuje. Tato struktura se vyznačuje vysokou pevností a houževnatostí.

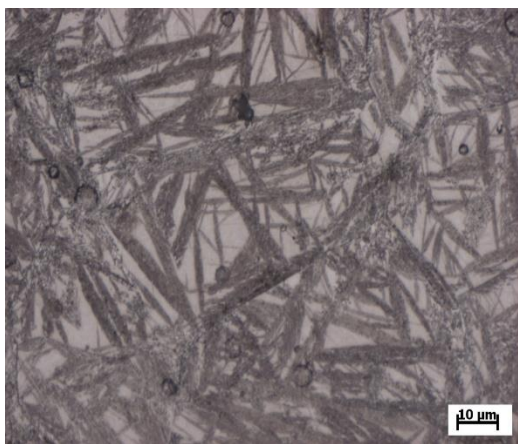


## 5 Závěr

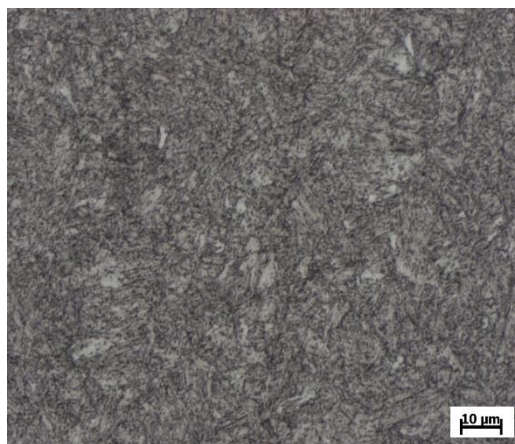
V teoretické části této práce jsem se zvláště věnoval popisu technologie MIM. Celý popis této technologie zahrnuje přípravu vstupní suroviny do lisů, používané stroje a zařízení, proces odstraňování pojiva a slinování. Dále jsem zde popsal možnost využití 3D tisku v procesu MIM.

V praktické části jsem výrobu dílů touto technologií porovnával s výrobou dílů s technologií 3D tisku a s technologií obrábění. Dále jsem se zaměřil na vliv tepelného zpracování u chrommolybdenových ocelí na strukturu. Hlavním kritériem hodnocení je vnitřní mikrostruktura materiálů a povrchová drsnost.

Z porovnání součástí vyrobených různými technologiemi vyplývá, že v porovnání z hlediska drsnosti je technologie 3D tisku a MIM mnohonásobně lepší než obrobená součást. Při porovnání z hlediska mikrostruktury je z obrázku 52 vidět, že vlivem válcování u obrobené součásti je struktura tvořena jemnozrnnou bainiticko-martenzitickou strukturou se zbytkovým austenitem. Z obrázku 53 je vidět, že u součásti vytvořené MIM technologií je struktura tvořena jehlicemi martenzitu se zbytkovým austenitem a zanikajícími póry, které zůstali po procesu sintrování. Mikrostruktury martenzitu a bainitu jsou si vzhledově velice podobné. Rozdíl je v tvrdosti, kdy je martenzitická struktura tvrdší, než struktura tvořena bainitem ale zároveň je také křehčí.



Obrázek 52: Mikrostruktura MIM, zvětšení 500x



Obrázek 53: Mikrostruktura obrobek, zvětšení 500x

Z výše popsaných výsledků vyplývá, že MIM technologie je schopna konkurovat ba dokonce i převyšovat svojí kvalitou i jiné technologie.

Z poznatků popsaných v teoretické části můžeme konstatovat, že MIM technologie má jeden velký problém a tím jsou především velmi vysoké pořizovací náklady (na stroje a nástroje). Z tohoto důvodu se stává výhodnou pouze pro velkou sériovost dílů, kdy se tyto náklady rozpočítávají mezi jednotlivé díly. Naopak její velkou předností je rychlá a velmi přesná výroba malých složitých dílů. V porovnání s konvečními metodami je několikanásobně rychlejší. MIM metoda se tedy právem dostává do popředí a ročně roste produkce o několik %. V dnešní době se pro MIM vyvíjí stále nové materiály a myslím, že MIM je technologie, které bude patřit budoucnost.

## Použitá literatura

- [1] *VIBROM: Technologie MIM* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <http://www.vibrom.cz/cz/technologie-mim>
- [2] *Industrial: Indo MIM* [online]. In: . [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <http://www.mim-india.cz/pdf/Industrial.pdf>
- [3] [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: [https://stc.fs.cvut.cz/history/2005/sbornik/Papers/S2/Tuma\\_Tomas\\_12123\\_S.pdf](https://stc.fs.cvut.cz/history/2005/sbornik/Papers/S2/Tuma_Tomas_12123_S.pdf)
- [4] Fraunhofer [online]. [cit. 1.8.2019]. Dostupné z WWW: [http://ifam.fraunhofer.de/en/Bremen/Shaping\\_Functional\\_Materials/Powder\\_Technology/MIM](http://ifam.fraunhofer.de/en/Bremen/Shaping_Functional_Materials/Powder_Technology/MIM)
- [5] GERMAN, R. M. Powder metallurgy science. 2nd ed. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1994. 472 pp. ISBN 978-1878954428.
- [6] *Aplikace technologie injekčního vstřikování kovů (MIM) ve výrobě komponent pro automobilový průmysl* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/99380/PEJ023\\_FMMI\\_B3923\\_3911R034\\_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/99380/PEJ023_FMMI_B3923_3911R034_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [7] SKOTNICOVÁ, K., KURSA, M. Prášková metalurgie VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. 153s. ISBN 978-80-248-3378-1
- [8] ATEAM, Prášková metalurgie [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/praskova\\_metalurgie.pdf](https://www.opi.zcu.cz/praskova_metalurgie.pdf)
- [9] *Metal Injection Molding (MIM) Process and Production* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <http://www.dshtech.com/pub/files/MIMprocessproduction.pdf>
- [10] JIRÁNEK, L. Design vstřikovací formy pro studium fázové separace komponentů používaných pro injekční vstřikování práškových materiálů. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. 69 s.
- [11] Metal powder industries federation [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z WWW: <https://www.mpif.org/default.aspx>

- [12] *Stanovení kritického plnění u směsí určených pro PIM technologii* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z:  
[http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/37843/dole%20el\\_2016\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/37843/dole%20el_2016_dp.pdf?sequence=1)
- [13] GERMAN, R.M. *Powder Injection Moulding*. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1990. ISBN 0-918404-95-9
- [14] [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2349204/>
- [15] *Metal injection molding* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z:  
<http://www.phoenixtooling.com/images/metal-injection-moulding.pdf>
- [16] Interní materiály od obchodního zastoupení firmy MCAE Systems s.r.o.
- [17] *Flidr omilání* [online]. In: . [cit. 2019-08-01]. Dostupné z:  
<http://omilani.cz/omilaci-stroje/kruhove-omilaci-stroje/kruhovy-omilaci-stroj-evp-ra>
- [18] *Azo materials* [online]. In: . [cit. 2019-08-01]. Dostupné z:  
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11192>
- [19] *Steel navigator* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z:  
<https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/32crmov12-10/>
- [20] *Bolzano* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z:  
<https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x5crnicunb16-4-vytvrditelne>
- [21] *Astmsteel* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z:  
<https://www.astmsteel.com/product/aisi-s7-tool-steel/>
- [22] [online]. In: . [cit. 2019-08-01]. Dostupné z:  
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Martenzit>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Součástky vyrobené MIM technologií [2] .....	11
Obrázek 2: Rozdělení technologie PIM [3] .....	13
Obrázek 3: Celý proces MIM [4].....	14
Obrázek 4: Směs Prášku a pojiva [6].....	15
Obrázek 5: Kovové částice [8].....	16
Obrázek 6: Různé tvary částic [7].....	17
Obrázek 7: Přebytek pojiva [5].....	21
Obrázek 8: Optimální poměr [5].....	22
Obrázek 9: Nedostatek pojiva [5] .....	22
Obrázek 10: Míchací zařízení [9] .....	23
Obrázek 11: Dvoušroubový protlačovací mixér [9] .....	23
Obrázek 12: Výsledný granulát [23].....	24
Obrázek 13: Proces vstřikování [9] .....	25
Obrázek 14: Vstřikovací lis [10].....	26
Obrázek 15: Proces tepelného odstranění pojiva [5] .....	27
Obrázek 16: Odstranění pojiva za pomoci páry [12].....	28
Obrázek 17: Postupné natavování zrn [13].....	29
Obrázek 18: Pojivo a kovové částice [13] .....	29
Obrázek 19: Finální spojení kovových částic [13] .....	29
Obrázek 20: Vytváření viditelného můstku mezi částicemi [13] .....	29
Obrázek 21: Spojení 2 částic [8].....	30
Obrázek 22: Vztah binárních diagramů a vytváření různých fází při slinování [8] .....	30
Obrázek 23: Kontinuální pec [14] .....	32
Obrázek 24: Kdy je vhodné využít MIM technologii [1] .....	36
Obrázek 25: Díl procházejí jednotlivými kroky .....	37
Obrázek 26: 3D tiskárna [16].....	38
Obrázek 27: Trojúhelníková výplň [16] .....	38
Obrázek 28: Nevhodná a vhodná orientace dílu [16] .....	39
Obrázek 29: Konstrukční řešení pro nevhodnou orientaci [16].....	39
Obrázek 30: Využití podpěr [16] .....	39
Obrázek 31: Využití podpěr [16] .....	39
Obrázek 32: Celý 3dílný komplex od firmy Desktop Metal [16].....	41

Obrázek 33: Omílací stroj [17] .....	41
Obrázek 34: 3D tisk .....	42
Obrázek 35: MIM .....	42
Obrázek 36: Obrobek.....	42
Obrázek 37: Konfokální mikroskop OLYMPUS LEXT [18] .....	43
Obrázek 38: Obrobek.....	44
Obrázek 39: 3D tisk .....	45
Obrázek 40: MIM .....	46
Obrázek 41: Mikrostruktura obrobku, zvětšení 500x .....	47
Obrázek 42: Mikrostruktura 3D tisku, zvětšení 200x.....	48
Obrázek 43: Mikrostruktura MIM, zvětšení 500x .....	49
Obrázek 44: Drsnost obrobku .....	50
Obrázek 45: Drsnost 3D tisku.....	51
Obrázek 46: Drsnost MIM.....	52
Obrázek 47: Mikrostruktura, zvětšení 500x .....	54
Obrázek 48: Sintrovaná součást.....	54
Obrázek 49: Mikrostruktura, zvětšení 500x .....	55
Obrázek 50: Tepelně zušlechtěný díl.....	55
Obrázek 51: Graf popisující tvorbu martenzitu [22] .....	56
Obrázek 52: Mikrostruktura MIM, zvětšení 500x .....	57
Obrázek 53: Mikrostruktura obrobek, zvětšení 500x .....	57
Obrázek 54: Formovatelné materiály technologií MIM .....	64
Obrázek 55:3D tisk a drsnost povrchu ve 3D vytvořena za pomoci konfokálního mikrometru.....	65
Obrázek 56 MIM součást a drsnost ve 3D vytvořena za pomoci konfokálního mikrometru.....	65

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Různé složení pojiv.....	20
Tabulka 2 Srovnání technologií z hlediska dosahovaných přesností .....	34
Tabulka 3 Přehled všech používaných materiálů v MIM .....	35
Tabulka 4 Značení materiálu .....	44
Tabulka 5 Složení materiálu .....	44
Tabulka 6 Mechanické vlastnosti materiálu .....	44
Tabulka 7 Značení materiálu .....	45
Tabulka 8 Složení materiálu .....	45
Tabulka 9 Mechanické vlastnosti materiálu .....	45
Tabulka 10 Značení materiálu .....	46
Tabulka 11 Složení materiálu .....	46
Tabulka 12 Mechanické vlastnosti materiálu .....	46

## Seznam příloh

- Příloha č. 1 - Obrázek 54: Formovatelné materiály technologií MIM
- Příloha č. 2 - Obrázek 55: 3D tisk a drsnost povrchu ve 3D vytvořena za pomoci konfokálního mikrometru
- Příloha č. 3 - Obrázek 56 MIM součást a drsnost ve 3D vytvořena za pomoci konfokálního mikrometru

# Přílohy

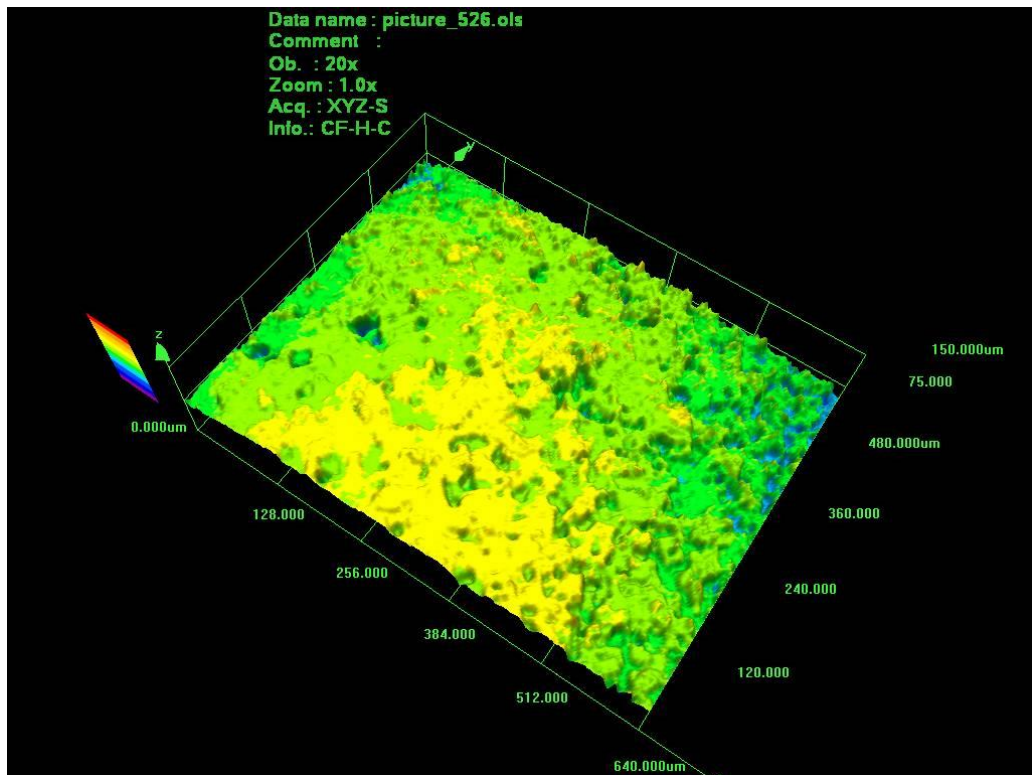
## Příloha č. 1

Materiál	složení(%)	hustota(%)	mez kluzu (Mpa)	prodloužení(%)	tvrdost
1020 steel	Fe-0.2C	96	380	23	-
2208 (HT)	Fe-2Ni-0.8C	97	1780	3	50HRC
2700	Fe-7Ni	99	420	34	67HRB
2705	Fe-7Ni-0.5C	98	860	12	22HRC
4120	Fe-1Cr-0.2C	97	483	17	67HRB
4140	Fe-1Cr-0.4C	97	719	3	22 HRC
4140 (HT)	Fe-1Cr-0.4C	93	1380	2	40 HRC
4340	Fe-2Cr-1Ni-1Mn-0.4C	96	945	9	22HRC
4340 steel (HT)	Fe-2Cr-1Ni-1Mn-0.4C	95	1780	3	48 HRC
4640 steel (HT)	Fe-2Ni-1Mo-0.4C	97	2000	3	30 HRC
Fe50%CO	Fe-50Co	99	485	4	88HRB
FL-02N2C (HT)	Fe-2Ni-0.5Cr-0.2C	97	1000		
gold, 18 ct.	75Au-12.5Ag-12.5Cu	75	147	1	66 HRB
hastelloy	Ni-28Mo-2Fe	97	800	40	30 HRC
inconel 718 (HT)	Ni-19Cr-18Fe-5Nb-3Mo-1Ti-0.04Al	100	1330	14	
invar	Fe-36Ni	98	425	40	65 HRB
iron	Fe-36Ni	98	425	40	50 HRF
iron-copper steel	Fe-2Cu-0.8C	95	700	10	92 HRB
iron-chromium steel	Fe-1Cr-0.5C	94	600	10	90 HRB
iron-molybdenum	Fe-5Mo	98	410	34	66HRB
iron-nickel	Fe-2Ni	96	345	30	55HRB
iron-nickel	Fe-8Ni	96	440	24	75HRB
iron-nickel	Fe-50Ni	96	420	20	50HRB
iron-nickel steel	Fe-2Ni-0.5C	94	450	20	75HRB
iron-nickel steel (HT)	Fe-2Ni-0.5C	94	1230	1	45HRC
iron-nickel steel	Fe-2Ni-0.9C	96	650	9	90HRB
Sley 2705	Fe-7Ni-0.5C	98	1460	1	46HRC
iron-phosphorus	Fe-0.6 P	99	280	2	80HRB
iron-silicon	Fe-3Si	99	520	25	81HRB
iron-silicon	Fe-3.5Si	99	375	0	37HRC
kovar or F15	Fe-29Ni-17Co	98	520	42	60HRB
nickel-iron	Ni-20Fe	91	470	31	53HRB
niobium superalloy	Nb-10W-10Ta	98	440	25	20HRC
stainless 17-4 PH	Fe-16Cr-4Ni-4Cu	96	911	9	100HRB
stainless 17-4 PH (HT)	Fe-16Cr-4Ni-4Cu	96	1140	12	35HRC
stainless 304L	Fe-18Cr-8Ni	97	487	48	60HRB
stainless 310	Fe-25Cr-20Ni-0.3C	97	530	34	64HRB
stainless 316L	Fe-17Cr-12Ni-2Mo-2Mn	96	496	51	67HRB
stainless 316L duplex	Fe-21Cr-9Ni-3Mo-2Mn	95	540	43	80HRB
stainless 410L (HT)	Fe-11Cr-0.5C	95	650	5	20HRC
stainless 420 (HT)	Fe-13Cr-1Mn-1Si	95	1130		40HRC
stainless 420 (HT)	Fe-13Cr-1Mn-1Si	92	1130	6	105HRB
stainless 430	Fe-17Cr-1Mn-1Si-1Ni	93	390	25	68HRB
stainless 440C (HT)	Fe-17Cr-1Ni-1C	96	620	2	43HRC
stellite	Co-28Cr-4W-3Ni-1C	99	1020	3	40HRC
super invar	Fe-32Ni-5Co	96	440	40	65HRB
titanium	Ti	97	630	15	88HRB
Ti-6-4	Ti-6Al-4V	98	913	12	35HRC
tool steel	Fe-6w-5Mo-4Cr-2V-1C	99	2000	0	66HRC
tungsten heavy alloy	W-8Mo-8Ni-2Fe	100	1115	20	
tungsten heavy alloy	W-5Ni-2Cu	98	1050	10	35HRC
tungsten heavy alloy	W-4Ni-1Fe	99	1000	20	50HRA
tungsten heavy alloy	W-5Ni-2Fe	100	930	30	25HRC
udimet 700	Ni-18Co-15Cr	100	1340	14	

Obrázek 54: Formovatelné materiály technologií MIM

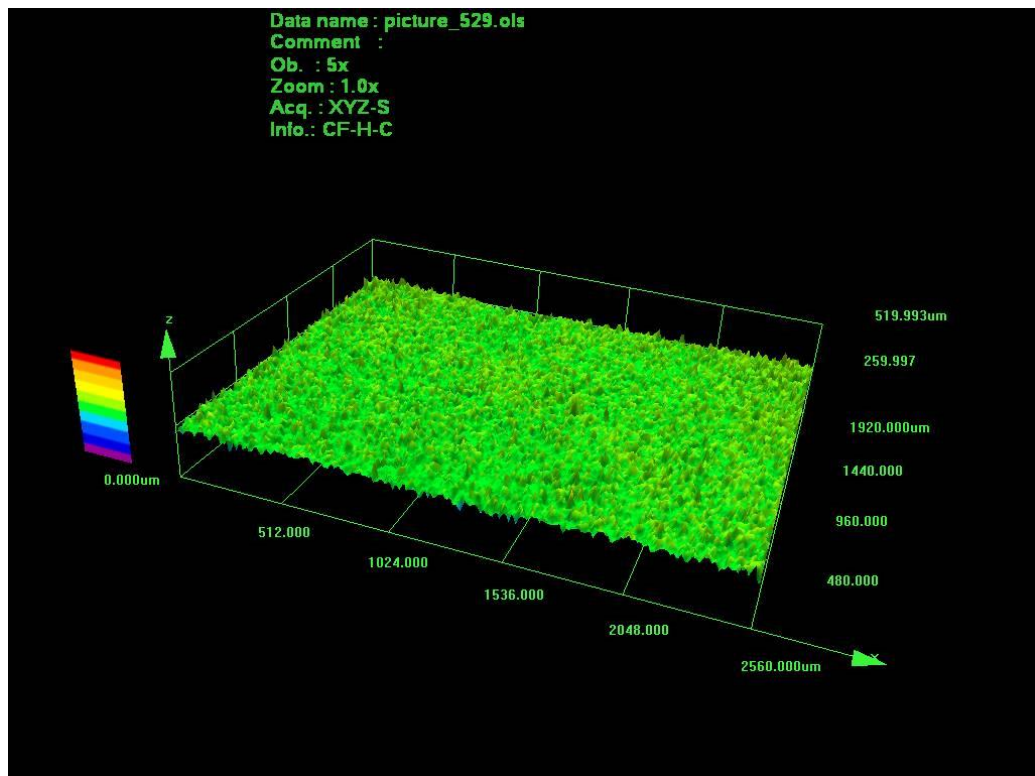


Příloha č.2



Obrázek 55:3D tisk a drsnost povrchu ve 3D vytvořena za pomoci konfokálního mikrometru

Příloha č.3



Obrázek 56 MIM součást a drsnost ve 3D vytvořena za pomoci konfokálního mikrometru