

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B0715A270013 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Strojírenská technologie – technologie obrábění

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vliv polohy komponenty při procesu tisku technologií DMLS na kvalitu a mechanické vlastnosti

Autor: **Jan Procházka**  
Vedoucí práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**

Akademický rok 2021/22

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Jan PROCHÁZKA</b>
Osobní číslo:	<b>S21B0030P</b>
Studijní program:	<b>B0715A270013 Strojní inženýrství</b>
Specializace:	<b>Strojírenská technologie-technologie obrábění</b>
Téma práce:	<b>Vliv polohy komponenty při procesu tisku technologií DMLS na kvalitu a mechanické vlastnosti</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra technologie obrábění</b>

## Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Analýza současného stavu
3. Ověření
4. Zhodnocení
5. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

#### Seznam doporučené literatury:

- Staněk, Jiří a Němejc, Jiří. *Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2005.
- Zetková, Ivana. Problematika výroby strojních kovových součástí 3D tiskem. [Disertační práce]. 2016/17. Vedoucí práce: Česánek Jiří, dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>.
- Konstrukter. *Konstrukter.cz*. [Online] Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/rubrika/3d-tisk/>.
- Folkman, Jan. Analýza vlastností vzorků vytvořených metodou kovového 3D tisku. [Bakalářská práce]. Vedoucí práce: Zeman Pavel, dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/84909>.
- Materialise. *Materialise 3D Printing Innovators*. [Online] Dostupné z: <https://www.materialise.com>.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Martin Nozar, Ph.D.**  
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2021**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2022**

L.S.

---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

---

**Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**  
vedoucí katedry

### **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucí bakalářské práce Ing. Ivaně Zetkové, Ph.D., za odborné vedení práce a za podporu a trpělivost při jejím vytváření. Děkuji také Ing. Martinu Nozarovi, Ph.D., za poskytnutí literatury a dalších podkladů a materiálů k tomuto tématu se vztahujících, možnost konzultací a osobních setkání za účelem diskuse o řešeném problému.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Procházka	Jméno Jan	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Strojírenská technologie – technologie obrábění		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetková, Ph.D.	Jméno Ivana	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU – FST – KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Vliv polohy komponenty při procesu tisku technologií DMLS na kvalitu a mechanické vlastnosti		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	50	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	41	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	9
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	Tato práce se zabývá vlivem polohy na tiskové platformě na výslednou kvalitu a mechanické vlastnosti komponenty, která je vyráběná technologií DMLS. V teoretické části práce je popsána aditivní výroba, technologie DMLS a uvedena analýza současného stavu, především technologických aspektů, které mají vliv na výsledné vlastnosti tištěných dílů. V praktické části jsou pak popsány 4 experimenty a na nich je demonstrováno, jak významný vliv má umístění dílů na jejich výsledné mechanické vlastnosti a povrchovou kvalitu.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	3D tisk, kovová aditivní výroba, kovový 3D tisk

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Procházka	<b>Name</b> Jan	
<b>FIELD OF STUDY</b>	Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname</b> Ing. Zetková, Ph.D.	<b>Name</b> Ivana	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST – KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Influence of component position during DMLS printing process on quality and mechanical properties		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

<b>TOTALLY</b>	50	<b>TEXT PART</b>	41	<b>GRAPHICAL PART</b>	9
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This work deals with the influence of the position of the component in the DMLS printing process on the quality and mechanical properties. The theoretical part of the work describes the additive production and DMLS technology, then there is an analysis of the current state of technological aspects that affect the resulting properties. In the practical part, 4 experiments are performed, in these experiments it is found out what effect of position in DMLS technology has on the resulting mechanical properties and quality.
<b>KEY WORDS</b>	Additive manufacturing, 3D printing, metal 3D printing

## Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	11
1 Úvod.....	12
1.1 Cíl práce.....	12
1.2 Postup řešení.....	12
2 Analýza současného stavu.....	14
2.1 Aditivní výroba.....	14
2.1.1 Rozdělení typů aditivní výroby .....	14
2.1.2 Obecné výhody a nevýhody oproti konvenčním metodám .....	16
Výhody .....	16
Nevýhody .....	17
2.2 DMLS .....	18
2.2.1 Postup výroby.....	18
2.2.2 Materiály používané technologií DMLS.....	19
2.2.3 Využití technologie DMLS .....	19
2.2.4 Dokončování operace (Post – processing) .....	20
2.2.5 Charakter procesu.....	20
2.2.6 Parametry tisku.....	22
2.2.7 Parametry stroje.....	22
2.2.8 Tisková poloha .....	22
2.3 Technologické aspekty aditivní výroby.....	23
2.4 Orientace součásti na platformě .....	23
2.4.1 Podpůrné konstrukce .....	24
2.4.2 Schodišťový efekt.....	25
2.4.3 Anizotropie.....	26
2.5 Rozmístění na platformě.....	27
2.5.1 Úhel laseru.....	27
2.5.2 Způsob nanášení vrstvy .....	28



2.5.3	Cirkulace ochranné atmosféry .....	29
3	Ověření .....	31
3.1	Použité vybavení a materiály .....	31
3.2	Návrh experimentálních vzorků .....	33
3.3	1. experiment .....	34
3.3.1	Vzorky pro stanovení vnitřního napětí .....	34
3.3.2	Měření vnitřního napětí .....	34
3.3.3	Výsledky 1. experimentu .....	35
3.4	2. experiment .....	35
3.4.1	Popis experimentu .....	35
3.4.2	Konstrukce zkušebních vzorků .....	35
3.4.3	Tepelné zpracování vzorků po tisku .....	37
3.4.4	Výsledky 2. experimentu- 1. platforma .....	38
3.4.5	Výsledky 2. experimentu- 2. platforma .....	39
3.4.6	Výsledky 2. experimentu- 3. platforma .....	40
3.5	3. experiment .....	41
3.5.1	Popis experimentu .....	41
3.5.2	Úpravy vzorků po tisku .....	42
3.5.3	Výsledky 3. experimentu .....	42
3.6	4. experiment .....	42
3.6.1	Popis experimentu .....	42
3.6.2	Výsledky .....	43
4	Zhodnocení .....	44
4.1	Zhodnocení 1. experimentu .....	44
4.2	Zhodnocení 2. experimentu .....	44
4.2.1	Fraktografie .....	44
4.3	Zhodnocení 3. experimentu .....	44
4.4	Zhodnocení 4. experimentu .....	44
4.4.1	Porovnání s konvenčním obráběným vrubem .....	45
4.5	Porovnání vlivu orientace na výsledky .....	46
4.6	Porovnání rozmístění – určení nejlepší pozice .....	46

5	Závěr.....	47
	Zdroje .....	49

## Přehled použitých zkratk a symbolů

AM	Additive manufacturing (Aditivní výroba)	[-]
CAD	Computer Aided Design- počítačem podporované projektování/kreslení	[-]
RTI	Regionální technologický institut	[-]
ZČU	Západočeská univerzita	[-]
STL	Souborový formát k uložení modelů pro 3D tisk	[-]
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	[-]
SLM	Selective Laser Melting	[-]
PK	Podpurné konstrukce	[-]
CDLP	Continues Digital light Processing	[-]
SLA	Stereolitografie	[-]
DLP	Direct light processing	[-]
SHS	Selective heat sintering	[-]
EBM	Electron beam melting	[-]
DMLM	Direct metal laser melting	[-]

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Dělení AM [6] .....	15
Obrázek 2 - Vnitřní struktura .....	17
Obrázek 3 - Fáze DMLS [11] .....	18
Obrázek 4 - Hlavní procesní části [11] .....	19
Obrázek 5 - Popis procesu [14] .....	21
Obrázek 6 - Kolize recoateru [15].....	22
Obrázek 7 - Různé orientace součástí na platformě v závislosti na potřebě podpor [16] .....	24
Obrázek 8 - Příklady použití podpor [3] .....	25
Obrázek 9 - Schodišťový efekt [3] .....	25
Obrázek 10 - Orientace vzorků [17] .....	26
Obrázek 11 - Zkoumané roviny + Metalografický výbrus [18] .....	27
Obrázek 12 - Dopad laserového paprsku [19].....	27
Obrázek 13 - Drsnost [19] .....	28
Obrázek 14 - Rozmístění vzorků [21] .....	30
Obrázek 15 - EOS M 290 [10] .....	32
Obrázek 16 - Rozměry hřebenu .....	34
Obrázek 17 - Konec tisku kalibračních hřebenu .....	34
Obrázek 18 - Vyndaný tisk.....	34
Obrázek 19 - Rozměry vzorku .....	36

Obrázek 20 - Fregmentace bloku .....	36
Obrázek 21 - Odřez vzorků na pásové pile .....	37
Obrázek 22 - Kalibrace .....	42
Obrázek 23 - Kalibrační hřeben.....	42
Obrázek 24 - Rozmístění vzorků bez tištěného vrubu.....	43
Obrázek 25 - Houževnatý lom .....	44
Obrázek 26 - Srovnání V – vrubů.....	45
Obrázek 27 - Skeny v hloubce V – vrubu z 3. platformy.....	45
Obrázek 28 - Vyhodnocení pro všechny platformy .....	46

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Vlastnosti a využití MS1 [10] .....	32
Tabulka 2 - Chemické složení MS1 [10].....	32
Tabulka 3 - Vlastnosti a využití 316L [10] .....	33
Tabulka 4 - Chemické složení 316L [10] .....	33
Tabulka 5 - Zbytkové napětí ve vzorcích .....	35
Tabulka 6 - Přehled platforem (orientace, použité podpory, rozmístění + výsledné hodnoty) .....	36
Tabulka 7 - Vyhodnocení 1. platformy .....	39
Tabulka 8 - Vyhodnocení 2. platformy .....	40
Tabulka 9 - Vyhodnocení 3. platformy .....	41
Tabulka 10 - Hodnoty obráběných vzorků .....	43
Tabulka 11 - Nárazové energie na všech platformách .....	46

## Seznam grafů

Graf 1 - průběh tepelného zpracování .....	38
--	----

# 1 Úvod

3D tisk, též Aditivní výroba (anglicky – Additive Manufacturing, dále jen AM) je výrobní technologie spočívající ve tvorbě třídímenzionálních objektů z počítačových dat. Postupným nanášením vrstev, které jsou k sobě spojeny tavením nebo v některých případech např. lepením. Tato technologie má v současné době čím dál tím větší popularitu, díky cenové dostupnosti tiskáren na plast. AM disponuje v dnešní době již především velkou škálou materiálů, které se k této metodě dají použít, ať už je to plast, kov, papír nebo ve stavebnictví beton. Jelikož se jedná o velice mladou technologii dochází v současné době k jejímu neustálému vývoji a dalším inovacím. Pojem aditivní výroba je využíván v souvislosti s průmyslem, naopak pojem 3D tisk je spojován spíše se stolními 3D tiskárnami. [1], [2]

Tento způsob výroby patří mezi tzv. nekonvenční metody obrábění, podobně jako např. obrábění laserem či vodním paprskem. Nekonvenční metody obrábění v současné době jistě doplňují běžné konvenční metody a jsou velkým příslibem do budoucna z hlediska širší možnosti využití, ekologičnosti, přesnosti a jakosti, rychlosti výroby atd. Využívají se na výrobu prototypů proto, že tato technologie je poměrně flexibilní a v porovnání s konvenčními výrobními metodami disponuje snadnější a rychlejší přípravou a změnou procesu výroby. Mezi hlavní výhody této technologie patří tvarová rozmanitost tištěných výrobků. Pro geometricky složité díly se tato technologie začíná používat v malosériové a sériové výrobě. Dalším pozitivem je např. absence nutných skladů pro polotovary, přípravky a nástroje. [1], [3]

Tato bakalářská práce se zabývá technologií DMLS, jenž spadá do 3D tisku kovů. Tuto metodu využívají tiskárny EOS M290 od německé firmy EOS GmbH, kterými je vybavena Laboratoř kovové aditivní výroby v Regionálním technologickém institutu, výzkumném centru na ZČU v Plzni, ve kterém bylo provedeno experimentální ověření této práce.

## 1.1 Cíl práce

Cílem této práce je ověřit závislost výsledných mechanických vlastností vzorků na pozicích na tiskové platformě, ve kterých byly tištěny, tj. porovnat mezi sebou různé orientace a rozmístění vzorků a určit jaká orientace a umístění vzorků je nejvýhodnější z hlediska jejich vlivu na jejich mechanické vlastnosti a povrchovou kvalitu tištěných vzorků.

## 1.2 Postup řešení

Na začátku je podrobně popsána Aditivní výroba, její dělení a podrobně rozebrána technologie DMLS, kterou se tato práce zabývá.

V kapitole Technologické aspekty je proveden rozbor dostupných informací souvisejících s orientací tištěných dílů a jejich rozmístěním na platformě na jejich výsledné vlastnosti, čerpáno je přitom z tuzemských i zahraničních odborných článků a vědeckých prací. Tyto práce jsou zde podrobně popsány, tzn. jaké díly byly tištěny, na jakých strojích, z jakého materiálu a zejména,

jaký je na základě zjištěných informací obecně očekáván vliv umístění dílů a orientace na platformě na jejich výsledné vlastnosti.

V praktické části práce jsou popsány experimenty provedené pro ověření vlivu umístění a orientace, především tedy konstrukce experimentů a pro tisk použitých vzorků, zvolené procesní parametry a potřebné podpůrné struktury a použitý materiál. Dále jsou popsány mechanické zkoušky, které byly použity pro vyhodnocení vzorků na jednotlivých platformách a uvedeny výsledky z těchto zkoušek. V závěru této části jsou mezi sebou porovnány díly vytištěné na několika tiskových platformách.

V části zhodnocení jsou vyhodnoceny zjištěné hodnoty a rovněž porovnány výsledky provedených testů s očekáváními konstatovanými v kapitole věnované analýze současného stavu.

Na závěr je pak uvedena nejlepší identifikovaná orientace a rozmístění ze všech vytištěných vzorků, které byly zkoumány v této práci.

## 2 Analýza současného stavu

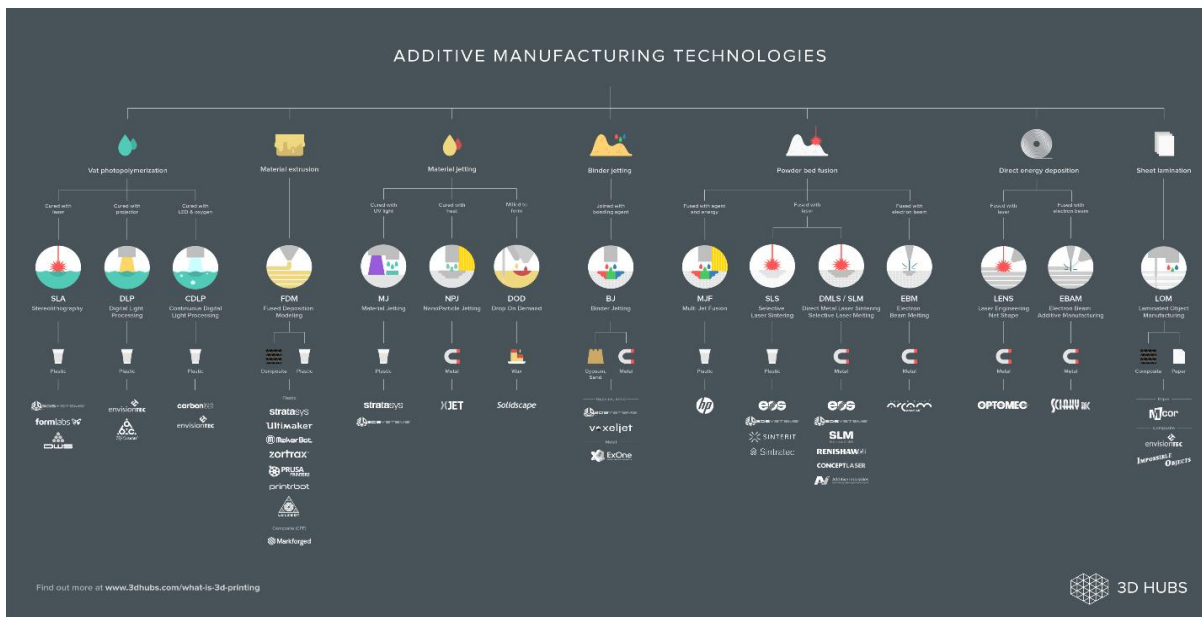
Jelikož technologie DMLS je stále ještě poměrně nová, je i v současnosti předmětem řady výzkumů a bádání. Po důkladném průzkumu internetových zdrojů ale nebyla nalezena žádná relevantní studie, která by se přesně tématem této práce zabývala. V kapitole technologické aspekty je nicméně uvedeno a popsáno několik studií, které se okrajově tematicky věnují této problematice.

### 2.1 Aditivní výroba

Aditivní výroba je takový způsob výroby, při kterém výsledná součást vznikne pomocí postupného kontrolovaného přidávání materiálu, na rozdíl od běžných konvenčních metod, při kterých se materiál odebírá. Pro tento způsob výroby je potřeba pouze 3D model vytvořený pomocí konstrukčního počítačového softwaru (tzv. CAD systémy), ze kterého jsou modely následně převedeny do souboru ve formátu stl. Tento formát v podstatě nahrazuje objemovou součást sítí tvořenou trojúhelníky různých tvarů a velikostí, která určuje geometrickou přesnost těchto modelů. Následně je třeba provést prostorovou orientaci takto připraveného modelu na tiskové platformě a doplnit potřebné podpůrné struktury. V této podobě je pak možné pro takový model specifikovat vhodné tiskové nastavení procesní parametry. Software takový model rozdělí na jednotlivé tiskové vrstvy a tato data odešle do tiskárny, která pak postupně vrstvu po vrstvě nanáší kovový prášek a jeho tavením ve specifikovaných místech, vytváří díl o požadovaném tvaru. [4]

#### 2.1.1 Rozdělení typů aditivní výroby

Každý jednotlivý typ AM je charakterizován specifickým principem, používaným materiálem a zdrojem energie viz. Obrázek 1. Nejrozšířenější rozdělení, které odpovídá normě ISO/ASTM 52900:2015[5], je uvedeno níže.



Obrázek 1 - Dělení AM [6]

- **Vat Polymerization** – Tento proces využívá nádrž s kapalnou fotopolymerní pryskyřicí (resin), z níž je model (výrobek) tvořen postupným přidáváním vrstev, které jsou jednotlivě tvrzeny ultrafialovým světlem. Do této kategorie spadají: SLA – Stereolithography (k vytvrzení resinu je využíván laserový paprsek), DLP – Direct light processing (tvrzeno projektorem). CDLP – Continues Digital light Processing (tvrzeno LED světlem a kyslíkem). [7]
- **Material Extrusion** – Vlákná polymerů jsou vedena skrz vyhřívanou trysku namontovanou na pohyblivém rameni. Tryska se pohybuje ve vodorovném směru, zatímco lože se pohybuje svisle, což umožňuje nanášení roztaveného materiálu vrstvu po vrstvě. Ke správné adhezi mezi vrstvami dochází přesnou regulací teploty nebo použitím chemických pojiv. [4]
- **Material Jetting** – Z tiskové hlavy jsou tryskány kapičky materiálu, které jsou následně vytvrzovány UV světlem. Materiály, které jsou pro tento proces využívány a mají díky své viskozitě mají schopnost vytvářet kapky jsou zpravidla polymery a vosky. [4]
- **Binder Jetting** – Jedná se o aditivní výrobní proces, při kterém tisková hlava nanáší kapalně pojivo na tenkou vrstvu částic prášku, pojivo je hned po nanesení tvrzeno UV světlem. Materiály využívané při tomto procesu jsou: kov, plast, písek, keramika, sádra či kompozit. (10) Jedná-li se o plast, můžeme se setkat s vytvrzováním pojiva po procesu následným tepelným zpracováním, v případě kovů je potřeba tepelného zpracování. [4]
- **Powder Bed Fusion** – Tento druh technologie využívá lasery či elektronové paprsky. Postupným nanášením a tavením ploch v jednotlivých vrstvách dosáhneme požadovaného



tvaru součástí. Mezi tyto technologie se řadí: DMLS – Direct metal laser sintering, SLS – Selective laser sintering, SHS – Selective heat sintering, EBM – Electron beam melting, DMLM – Direct metal laser melting. [4]

- **Directed Energy Deposition** – DED využívá soustředěný zdroj energie (laser, plazmový oblouk, elektronový paprsek) k roztavení materiálu ve formě prášku či drátu. K roztavení dochází na konci trysky tiskové hlavy, kam je na materiál soustředěn energetický paprsek. Hlavní materiály využívány k této metodě jsou polymery, kov a keramika. Tento druh AM se využívá k výrobě nových dílů (jako u předešlých procesů), k opravám či k přidání materiálů ke stávajícím komponentům.[8]
- **Sheet Lamination** – Materiál je navinut na cívkách, ze kterých se odmotává na vyhřívaný válec, kde dochází ke vzniku požadovaného tvaru. Nevyužitý materiál je navinut na paralelní zásobník a zároveň dochází k dalšímu navrstvení. Nebo se používá vodorovná pracovní plocha, na kterou je nanесena vrstva materiálu, CO<sub>2</sub> laser ořízne požadovaný tvar ve vrstvě, dojde k nanesení pojiva, dál se proces opakuje až dosáhneme požadovaného tvaru. Dříve pouze pro papír, laminát či plech, dnes se touto technologií produkují vícevrstvé keramické výrobky za pomoci polymerních matic. Do této skupiny spadají: LOM – Laminated Object Manufacturing SFP – Solid foil polymerization. [9]

## 2.1.2 Obecné výhody a nevýhody oproti konvenčním metodám

### Výhody

- Schopnost tvorby složitých geometrií a tvarů
- Vhodnost pro tvorbu strojírenských prototypů
- Úspora času při tvorbě komplikovaných a unikátních dílů

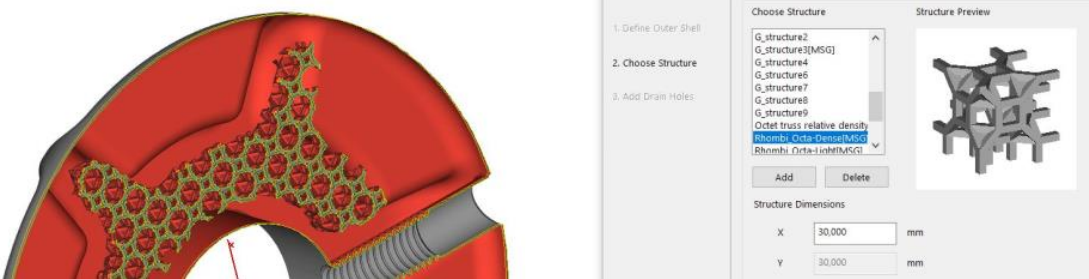
Aditivní výroba zaujala své místo při výrobě prototypů díky schopnosti vytváření složitých geometrií a možnosti rychlé adaptace při požadovaným tvarovým úpravám. Změníme-li tvar při běžném obrábění, musíme zpravidla změnit technologický postup, zde je ale možné pouze upravit model v příslušném softwaru a takto upravený díl tisknout znovu, čímž je možné ušetřit výrobní prostředky i čas.

- Úspora materiálu

Materiál potřebný k výrobě dílů se skládá z objemu dílu, objemu podpor a odpadu (nadále nepoužitelného prášku). Procentuální zastoupení takového odpadu z objemu dílu je zhruba 8 %. Použitý prášek při tisku se dále přesívá a používá znovu. Z charakteru procesu tisku je známo, že vznikají částice o jiných průměrech (větší i menší) než jsou částice původní. Větší částice, které lze odstranit mechanickým sítem, jsou skladovány jako nebezpečný odpad, což přináší přísné požadavky a opatření na skladování a likvidaci. Zbytky podpurných struktur mají oproti běžnému odpadu z konvenčních strojů (špony, třísky, odřezky atd.) mnohonásobně menší objem a je možné je částečně dále také recyklovat.

- Snižování hmotnosti, možnost tvorby odlehčených výrobků

Software využívaný v AM pro tvorbu tiskových modelů většinou obsahuje řadu dalších funkcí, např. funkce pro tvorbu skořepin a vnitřních struktur pro odlehčené součásti viz Obrázek 2.



Obrázek 2 - Vnitřní struktura

Pomocí těch je možné ušetřit jak materiál, tak i čas tisku. Některé složitější tisky se mohou tisknout i několik dní, a tak zkrácení tiskového času může vést k velkým finančním úsporám.

- Ekologičnost

Velký problém při použití běžných obráběcích strojů je spojený s ekologickým vypořádáním se s jejich řeznými a procesními kapalinami. Při procesu DMLS se žádné takové kapaliny nevyskytují, pouze pro odříznutí dílů z tiskové platformy pomocí pásové pily je potřeba chladicí kapaliny.

### Nevýhody

- Investiční náklady – vyšší pořizovací ceny strojů, materiálů, nástrojů, servisu a vybavení
- Nutnost dokončovacích operací (tzv. post – procesing)

Pro kvalitní post – procesing je za prvé nutné manuální zručnost a za druhé musí být příslušný zaměstnanec detailně seznámen s celým procesem tisku, aby byl schopen správně odstraňovat podpory.

- Anizotropní finální vlastnosti součásti
- Omezený pracovní prostor

Limitující pro všechny výrobce 3D tiskáren na kov je pracovní prostor stroje. Ten určuje maximální rozměry tištěného dílu. Firma EOS používá číselné značení, které vyjadřuje plochu stavěcí platformy. Pro upřesnění – značení M100 znamená, že stavěcí plocha je o průměru 100 mm. Ostatní firmy používají také číselné značení strojů, tyto čísla mohou znamenat např. výkon laseru. [10]

- Likvidace nebezpečného odpadu

Při tomto procesu dochází ke vzniku nebezpečného odpadu (částice, které neprojdou mechanickým sítem), který dále musí být skladován a speciálně likvidován.

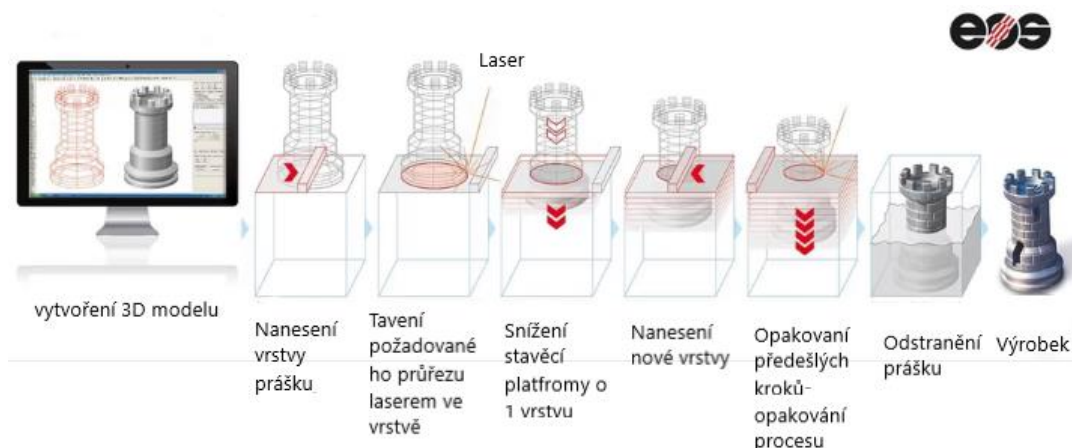
## 2.2 DMLS

Direct Laser Metal Sintering (DMLS) je technologie přímého laserového tavení kovů, která přesně vytváří složité geometrie, které jinými konvenčními výrobními metodami není možné vytvořit. Tento proces je umožněn díky procesu založeném na práškové metalurgii, která k výrobě dílů z kovového prášku využívá teplo a tlak. Metoda DMLS se řadí do stejné skupiny technologií pro tisk z kovových materiálů jako metoda SLM (Selective Laser Melting). [10]

Obě tyto metody jsou založené na postupném a opakovaném spékání (tavení) určitých počítačovým modelem definovaných ploch v mnoha tenkých vrstvách, jež se opakuje až do dosažení finálního tvaru daného kusu.

Pro metodu DMLS se používají 20, 40, 50 a 80 mikronové vrstvy, použité kovové prášky obsahují kulové částice zpravidla o průměru 10-65  $\mu\text{m}$ . [10]

### 2.2.1 Postup výroby



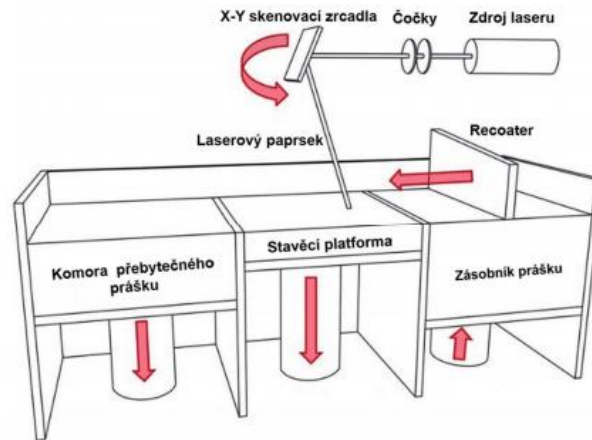
Obrázek 3 - Fáze DMLS [11]

Nejprve je potřeba zásobník kovového prášku tiskárny naplnit požadovaným práškem, vložit platformu do stroje a manuálně nanést první vrstvu. Tiskárna ohřeje platformu na potřebnou teplotu (v našem případě 40 °C). Ve stavěcí komoře je používán inertní plyn, který chrání zahřátý a posléze roztavený prášek, aby nereagoval s okolním prostředím.

Výroba začíná nanesením rovnoměrné tenké vrstvy kovového prášku ze zásobníku na stavěcí platformu (dále jen platforma) pomocí tzv. recoateru. Pomocí laseru je taven prášek v předem definované oblasti, tzn. laser natavuje prášek pouze tam, kde je řez součástí. Následně dojde k posunutí platformy o jednu vrstvu níže a dojde k nanesení další vrstvy. Nanášení vrstev a postupné tavení se dále opakuje až do dokončení součásti. Pro snazší pochopení celého postupu

viz. Obrázek 3 ,Obrázek 4. V případě technologie DMLS tento proces probíhá zpravidla v ochranné atmosféře dusíku či argonu ( $N_2$ , Ar) v závislosti na použitém materiálu.

Poté se součást nechá vychladnout a z platformy se odstraní volný kovový prášek. Dle požadavků zákazníka či technologických doporučení je vystavena platforma s díly tepelnému zpracování. Dále dochází k manuálnímu či strojnímu odstraňování podpor, začišťování a broušení. Dále se dle požadavků mohou díly obrábět, speciálně tepelně zpracovávat či se na nich může dělat povrchová úprava, nanášení tenkých vrstev atd.



Obrázek 4 - Hlavní procesní části [11]

### 2.2.2 Materiály používané technologií DMLS

Pracovním materiálem pro tento proces 3D tisku je jemný kovový prášek. Velikostní složení a tvarové rozložení částic, které jsou dodávány jsou přesně definovány. Pro metodu DMLS jsou kovové prášky dodávány s velikostním rozložením zhruba dle Gaussova rozdělení, kdy největší počet částic má průměr 30-40  $\mu m$ .

Kovové prášky pro metodu DMLS se vyrábějí z nerezových, nástrojových ocelí, titanových, hliníkových, niklových a kobalto – chromových slitin. Díly vyrobené metodou DMLS mohou mít dokonce větší hustotu než díly z lité oceli. Udávaná hustota dílů DMLS je až 99,5 %. [12]

### 2.2.3 Využití technologie DMLS

Technologie DMLS je schopna tisknout přesné tvary požadované na finálních výrobcích, proto je hojně využívána při výrobě složitých dílů z vysoce kvalitních materiálů. Největší rozmach je zaznamenán v průmyslu, a to přesněji ve strojírenství obzvláště např. v automobilovém průmyslu. Tato metoda dále našla využití v strojírenství (např. výroba prototypů a rezných nástrojů), medicíně (stomatologie, protetika), v letectví a kosmonautice (výroba prototypů), dále je vhodná k výrobě složitých ropných a plynových komponent a rekonstrukci poškozených forem. [11]

#### **2.2.4 Dokončování operace (Post – processing)**

Každá technologie 3D tisku kovů vyžaduje určité množství následného finálního zpracování, totéž platí u technologie DMLS. Nejprve je potřeba odstranit zbylý kovový prášek, který je možné dále přesít a znovu použít. Dalším procesem, kterým výrobek často prochází, jsou operace k uvolnění napětí v materiálu, např. žíhání (v roztoku, v peci). V této fázi je stále výrobek spojen s platformou. Pokud by byly součásti odstraněny z platformy před tepelným zpracováním, mohlo by dojít k jejich zdeformování vlivem zbytkového vnitřního pnutí.

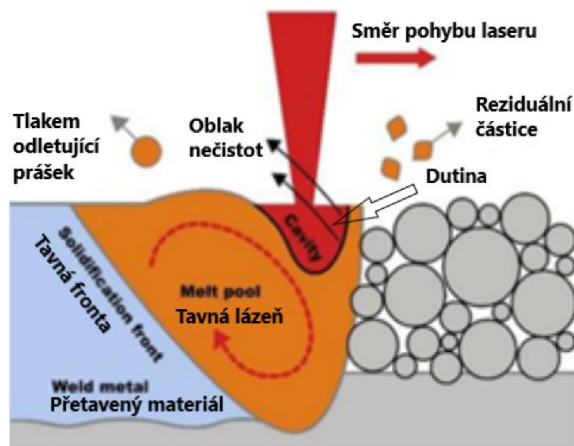
Po tepelném zpracování se součásti odříznou od platformy, k odříznutí se většinou používá pásová pila či elektroerozivní obrábění. Následně je potřeba provést dokončovací operace, označované jako post – procesing. Post – procesingem se rozumí odstraňování podpor z dílů po odříznutí z platformy. Podpory jsou tisknuty jinými parametry než samotné díly a mají svojí určitou geometrii. Existuje mnoho druhů podpor. V praktické části této práce budou použity blokové a objemové podpory. Objemové podpory jsou tisknuty z plného materiálu a podobnými parametry jako samotné díly a slouží často k vyztužení blokových podpor. Blokové podpory tvoří mřížku na jejímž konci jsou zuby, které zpravidla zabíhají 1-3 vrstvy do materiálu tištěných součástí. Odstranění podpor se provádí manuálně pomocí náradí (dláta, kladivo, kleště) či strojově.

Povrch součástí po 3D tisku může být v některých případech vizuálně tepelně ovlivněn, jsou zde vidět teplotní přechody mezi vrstvami, vlivem nestejných teplotních gradientů, a proto se nakonec povrch součástí pískuje.

Po odříznutí dílů z platformy a odstranění všech zbytků jejich podpor dojde dle požadavků na přesnost a jakost ploch součástí k obrábění. Využívá se jak konvenční (frézování, soustružení a gravírování) metody obrábění, tak i nekonvenční. Jako poslední krok může docházet k nedestruktivnímu testování výrobků pomocí ultrazvuku, skenování laserem, bílým/modrým světlem, laserem či skenování pomocí počítačové tomografie. [13]

#### **2.2.5 Charakter procesu**

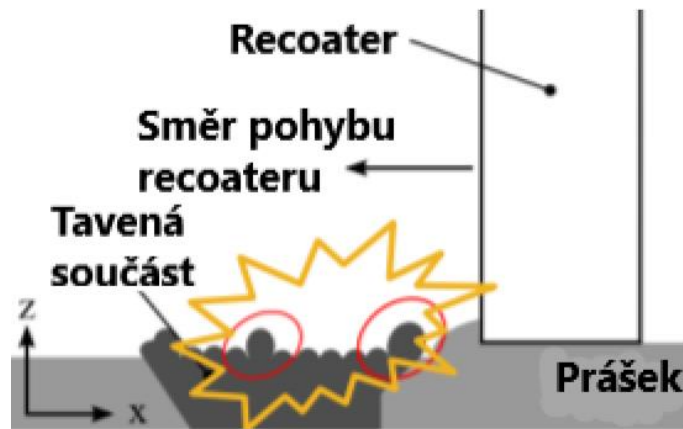
Recoater nanese vždy kompaktní vrstvu prášku, v případě této práce má vrstva prášku 40  $\mu\text{m}$ . Z tohoto důvodu je prášek dodáván v určitém velikostním a morfologickém rozložení, aby tzv. správně „tekl“, kdy větší kuličky prášku zaplňují větší díry a menší vyplňují mezery mezi nimi.



Obrázek 5 - Popis procesu [14]

V průběhu procesu vznikají částice s jinou morfologií a velikostí. Jejich vznik souvisí s charakterem samotného procesu tavení. Laserový paprsek taví nanášený prášek a vzniká tzv. melt pool neboli tavná lázeň. V té kvůli vysokým teplotním gradientům vzniká turbulentní proudění, a to způsobuje odlet reziduálních částic, viz. Obrázek 5 [14]. Rozměry těchto částic, které vznikají jako vedlejší produkt taveného procesu, mohou být větší než 65  $\mu\text{m}$  a menší než 10  $\mu\text{m}$ . Částice menší než 10  $\mu\text{m}$  znamenají hlavně zdravotní riziko, jelikož při manuálním prosívání použitého prášku projdou sítím a jsou v procesu dále používány. Z toho důvodu, když operátor pracuje v kontaktu s práškem, musí mít chráněné dýchací cesty (minimálně respirátor třídy FFP3), ochranu očí a antistatické oblečení.

Výraznější procesní problém vzniká s částicemi, které jsou větší než 65  $\mu\text{m}$ . Ty mohou vlivem slabého proudění ochranné atmosféry (viz dále – Cirkulace ochranné atmosféry) na některých místech způsobit, že spečená vrstva je vyšší než 40  $\mu\text{m}$ . Může totiž dojít k usazení nevhodně velkých částic přímo v místě tavné lázně, kde pak dojde k jejich spečení, což zapříčiní větší výšku výsledné vrstvy viz Obrázek 6. To může způsobit kontakt s nanášecím systémem, které se může projevit nežádoucím opotřebením hrany recoateru nebo způsobením vibrace u dílů s menší velikostí a následné zhoršení jejich geometrické přesnosti. Po kolizi s nanášecím systémem může ale dojít až k úplnému zastavení tisku, kdy se recoater srazí s již vytvořenou strukturou nebo může být spěkaný díl recoaterem stržen z platformy. [15]



Obrázek 6 - Kolize recoateru [15]

U metody DMLS, tak jako u všech výrobních metod, jsou výsledné vlastnosti tištěných kusů ovlivněny procesními parametry: (parametry tisku, parametry stroje a zvolenou tiskovou polohou).

### 2.2.6 Parametry tisku

- Parametry související s laserem: výkon laseru, průměr laserového paprsku (plocha, kterou laser spéká), doba a frekvence pulzu laseru
- Parametry související s pohybem laseru, tzv. skenováním: rychlost skenování, skenovací strategie, vzdálenost jednotlivých laserových drah)
- Parametry související s práškem: velikostní a tvarové rozložení částic, hustota prášku, tloušťka vrstvy, chemické složení a další vlastnosti použitých prášků
- Parametry související s teplotou: teplota přehřevu platformy, teplota ve jednotlivých tištěných vrstvách, efektivita odvodu tepla z tištěných dílů

### 2.2.7 Parametry stroje

- Velikost výrobního prostoru
- Velikost zásobníku prášku
- Počet a maximální výkon použitých laserů
- Maximální skenovací rychlost atd.

### 2.2.8 Tisková poloha

- Rozmístění dílů na platformě
- Orientace dílů na platformě

## 2.3 Technologické aspekty aditivní výroby

Tato práce má za úkol zhodnotit, jestli a v jaké míře rozmístění a orientace vzorků na stavěcí platformě ovlivňuje jejich výsledné vlastnosti, a pokud ano, pak jak moc je tento vliv významný. Do procesu tisku zasahuje několik činitelů, které mohou ovlivnit výsledné vlastnosti tištěných kusů, ať už se jedná o parametry tisku nebo vlivy spojené se samotným charakterem procesu. Též je možné vzít v úvahu výrobní nepřesnosti vlastní tiskárny i nepřesnostmi při nanášení vrstev způsobené mechanickými vřely ve stroji. Tyto faktory ale nelze ovlivnit a jejich posouzení není předmětem této práce, a proto jim nadále nebude věnována pozornost.

Obecně tématu, které je zkoumáno v této práci, málo informací, což může být jedno důsledkem toho, že tato technologie je stále poměrně nová, ale i tím, že většina firem si své „know-how“ tajně střeží pro své interní účely.

Pro tuto práci je klíčový pojem „poloha na stavěcí platformě“, který může mít dva rozdílné významy. Jednak je pod ním rozuměna fyzická poloha konkrétního dílu na stavěcí platformě a jednak orientace, tzn. prostorové natočení, tohoto kusu v prostoru nad stavěcí platformou. Právě v těchto významech bude pojem „poloha“ používán a její aspekty detailněji vysvětleny.

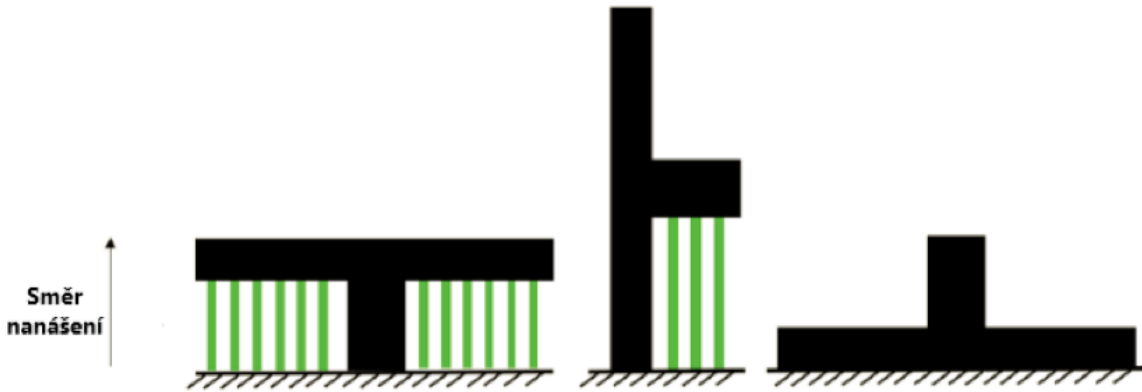
Mnoho prací v tomto odvětví pracuje s vlivem nastavených parametrů tisku na výsledné vlastnosti výrobků. Z těchto prací je obecně známo, že změna parametrů tisku znatelně ovlivňuje výsledné vlastnosti součástí. Mezi tyto parametry patří především tloušťky vrstvy, výkon laseru, rychlost pohybu laseru či změna tzv. dosing factoru. Pokud nastavíme defaultní parametry tisku, existuje několik činitelů, které mohou výsledné vlastnosti výrobků ovlivňovat. Některé lze ovlivnit či omezit, s některými musíme počítat, jelikož plynou z charakteru samotného procesu tisku. Je velice obtížné rozřazovat tyto vlivy do určitých skupin, jelikož se jedná o celistvý proces a všechny tyto vlivy do sebe vstupují a ovlivňují se navzájem. Avšak pro lepší pochopení problematiky a uvědomění si, co vše může ovlivnit výsledný tisk, je potřebné přesně definovat jednotlivé proměnné při výrobě touto technologií.

## 2.4 Orientace součástí na platformě

Orientace součástí na stavěcí platformě patří mezi nejvýznamnější činitele, které ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti, kvalitu, jakost povrchu a rozměrovou přesnost výsledného výrobku. Dále určují výsledné postavení podpůrných konstrukcí, zkráceně podpor, vůči součásti viz Obrázek 7. Použití podpor je potřeba především pro stabilizaci tištěných kusů na stavěcí platformě, pro odvod tepelné energie dodávané laserovým paprskem do tavených ploch a bránění deformacím dílů v průběhu tisku způsobeným vnitřním napětím. S těmito skutečnostmi operátor, který připravuje tisk kalkuluje a rozhoduje jak díly, které je nutné vytisknout, budou vysoce mechanicky namáhány. Zde by se nabízelo volit podpory k lepšímu odvodu tepla a vzniku menšího zbytkového napětí, které má za následek, v některých případech negativní ovlivnění mechanických vlastností (vznik koncentrátorů napětí, trhliny, praskliny) nebo či se jedná



o součásti, které nebudou vysoce namáhány, a urychlit post-processing vhodným zvolením orientace bez podpor, kdy budeme šetřit čas ale i materiál ve formě použitého prášku. Jak je zřejmé, do výběru orientace pro konkrétní tisk vstupuje mnoho proměnných a operátor se rozhoduje dle svých zkušeností, požadavků zákazníka a v některých případech i intuice.



Obrázek 7 - Různé orientace součástí na platformě v závislosti na potřebě podpor [16]

### 2.4.1 Podpůrné konstrukce

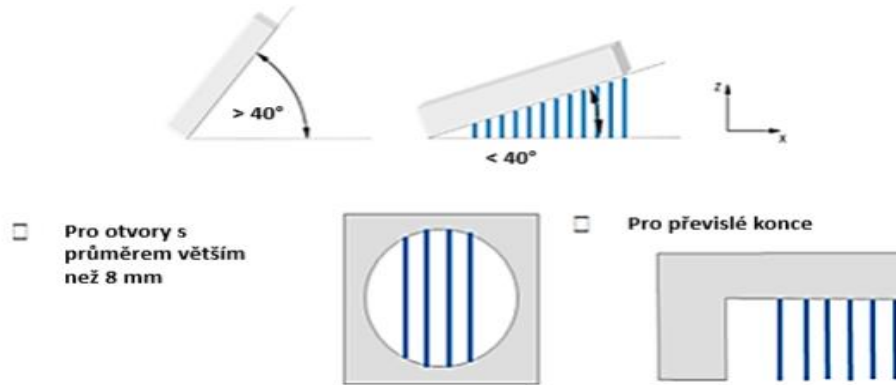
Podpůrné konstrukce či dočasné podpory zkráceně jen „podpory“ jsou využívány obecně v AM, jak pro plasty i kovy. Každý materiál má své specifické vlastnosti, a proto je využíváno mnoho druhů podpor, jak pro rozdílné materiály, tak i pro různé geometrické útvary (plochy, stěny pod úhlem, díry, tenké stěny, vysoké díly atd.).

Podpory mají tyto 3 hlavní účely:

- Stabilizace dílů na platformě
- Odvod tepla ze součástí
- Prevence proti deformacím vlivem vnitřního napětí

Pro metodu DMLS podpory zajišťují všechny tyto účely, především tedy zabezpečují přesnou polohu a tvar tištěného materiálu v prostoru v dané poloze (zjednodušeně – podporují „levitující“ části dílu, pod kterými není plný materiál, pouze prášek). Tím tedy umožňují tisknutelnost vyráběného kusu. Návrh a konstrukce podpor se řídí řadou pravidel a doporučení v kombinaci se zkušenostmi pracovníka (operátora), který příslušnou tiskovou úlohu připravuje. Obecně se doporučují podpory pro převislé konce s převisem větším než 0,3-0,5 mm. Pro kruhové díry s horizontální osou o průměrech větších než 6-8 mm a u stěn či ploch svírajících se stavěcí platformou úhel menší než 40-45°, viz Obrázek 8. Tato doporučení byla experimentálně ověřena.

Použití podpor má své i nevýhody, např. při tisku ploch svírajících s platformu úhel menší než  $45^\circ$ . Tyto plochy lze tisknout bez podpor, avšak dochází ke snížení jakosti povrchu, oproti tomu v případě použití podpor, je následně potřeba tyto podpory odstranit a opracovat plochy zasažené jejich zbytky. [3] [16]

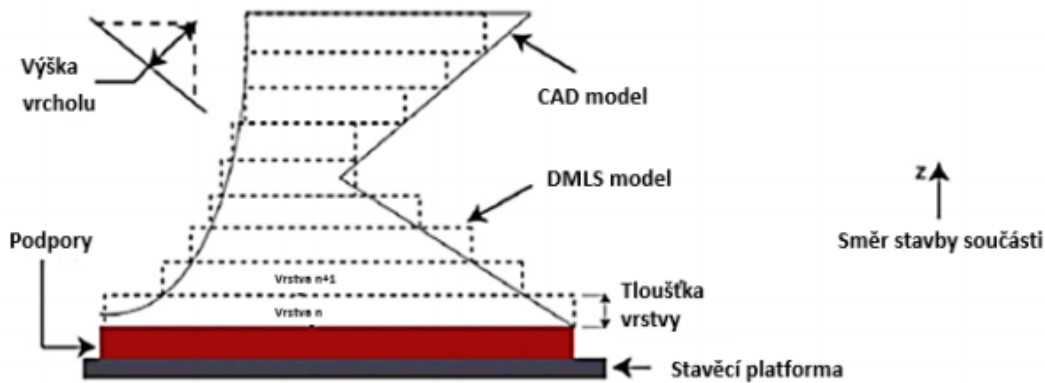


Obrázek 8 - Příklady použití podpor [3]

#### 2.4.2 Schodišťový efekt

Jeden ze zásadních parametrů, který ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti, kvalitu povrchu a geometrickou přesnost finálního výrobku, je tloušťka tiskových vrstev. Jak bylo již popsáno, recoater vždy nanese rovnoměrnou tloušťku prášku na platformu, kde následně dojde ke spečení potřebného průřezu součásti laserovým paprskem. Nanášená vrstva je velice tenká (desítky mikrometrů), v našem případě bude stroj nanášet  $40 \mu\text{m}$ , tedy  $0,04 \text{ mm}$ .

Nanášená vrstva materiálu o určité výšce udává výrobní čas, a především ovlivňuje kvalitu povrchu a s ním související tzv. schodišťový efekt viz Obrázek 9. Ten se např. projevuje u oblých, a nakloněných ploch nebo u válcových součástí s vodorovnou osou. Tento nežádoucí jev, lze snížit zmenšením tloušťky vrstvy, čímž ale i dojde ke zvýšení výrobního času a nákladů. Schodišťový efekt tak lze pouze regulovat snižováním tlouštěk vrstev, nelze jej však úplně odstranit. [3]

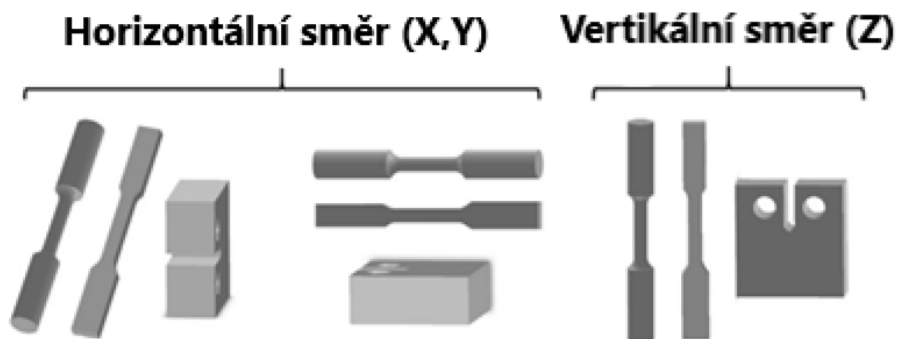


Obrázek 9 - Schodišťový efekt [3]

### 2.4.3 Anizotropie

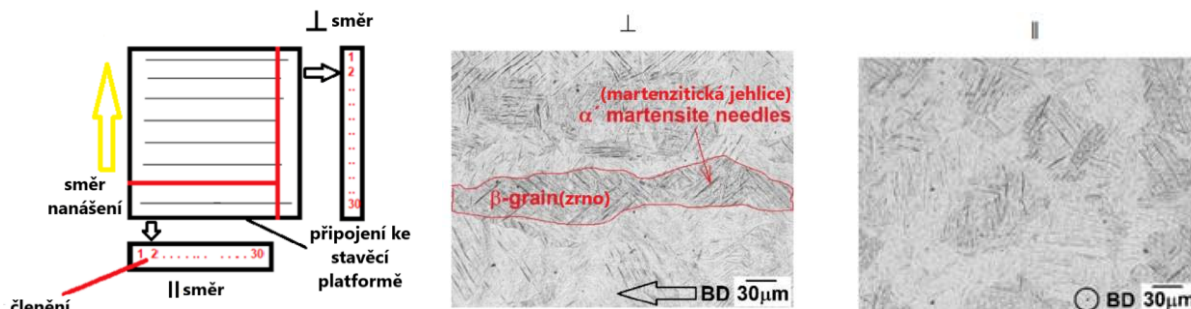
Při návrhu orientace se musí také počítat s anizotropií materiálu, kdy vytištěný díl má např. rozdílné mechanické vlastnosti v ose kolmé a rovnoběžné s tištěnými vrstvami. Tato anizotropie tedy vzniká samotným charakterem procesu, kdy laser protavuje do hloubky i několik vrstev, tzn. zde mají zrna materiálu čas krystalizovat do delších podlouhlejších zrn, zatímco na vrchu součásti dochází k menšímu přísunu energie, rychlejšímu chlazení a vzniku menších, méně podlouhlých zrn.

Taková anizotropie tištěného vzorku je např. popsána při zkoušce tahem ve studii [17], kdy se tisknuly tahové vzorky ve směru horizontálním a vertikálním viz Obrázek 10. Jak bylo zjištěno, tak tahové vlastnosti jsou opravdu v jednotlivých stavebních směrech odlišné. Vzorky, které byly tištěny podélně v osách XY vykazují o 20-30 MPa menší mez pevnosti a mez kluzu než vzorky tištěné v ose Z. Naopak tyto vzorky mají větší prodloužení, cca o 2 %. Vysvětlením tohoto jevu může být, že dle rozdílného času ochlazování dochází k jiné tvorbě zrn, kdy u vzorků tištěných v ose Z dochází ke vzniku podlouhlých zrn právě v tomto směru, tudíž mají lepší tahové vlastnosti.



Obrázek 10 - Orientace vzorků [17]

Další případ anizotropie vzorku byl popsán ve studii [18], kde byla zkoumána drsnost a tvrdost ve dvou odlišných rovinách vůči směru nanášení. První rovina byla rovnoběžná s rovinou nanášení a druhá byla na tuto rovinu kolmá, jak je patrné dle značek viz Obrázek 11. Ve všech místech platformy byly vzorky měřené v kolmé rovině a jejich hodnoty tvrdosti byly větší než u rovin vodorovných, což bylo vysvětleno metalografickým fázovým rozbohem a detekováním vzniku zrn martenzitu (přesněji tzv. martenzitických jehlic) viz Obrázek 11.



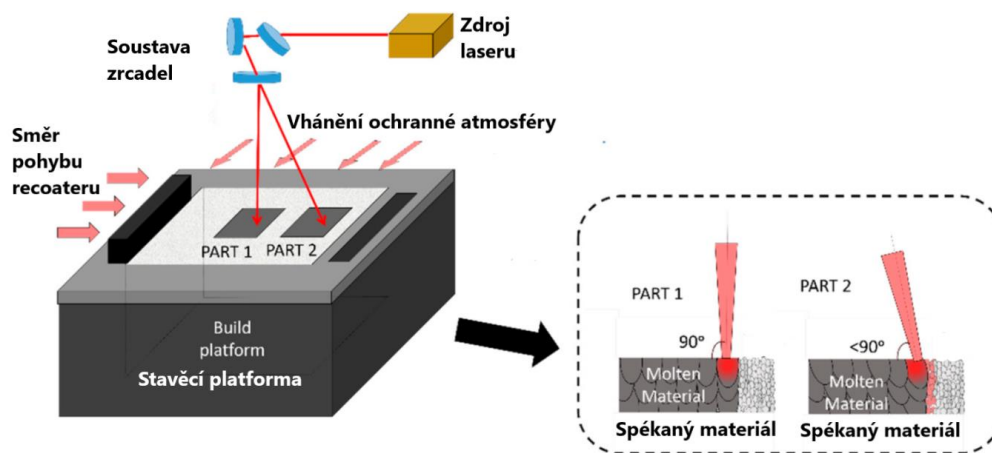
Obrázek 11 - Zkoumané roviny + Metalografický výbrus [18]

## 2.5 Rozmístění na platformě

Dalším významným činitelem, kterým se tato práce bude zabývat, je umístění jednotlivých dílů na platformě. V případě tiskárny EOS M290 se jedná o čtvercovou platformu o rozměrech 250 x 250 mm. Jednotlivá místa na platformě mají svá příslušná specifika, která musí operátor – technolog znát.

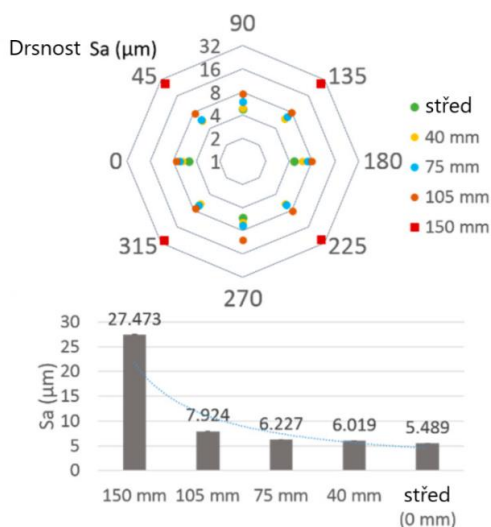
### 2.5.1 Úhel laseru

Laserový paprsek dopadá na jednotlivá místa platformy pod jiným úhlem. Laser je totiž umístěn přímo ve středu nad platformou, na součásti uprostřed platformy tak dopadá laserový paprsek kolmo, naopak součásti umístěné na okrajích platformy jsou spékány dopadajícím laserovým paprskem pod úhlem, dochází tak ke spékání zóny ve tvaru elipsy, viz Obrázek 12. Platforma se posouvá průběžně dolů o jednu vrstvu, takže úhel dopadajícího laseru je ovlivněn pouze rozmístěním součástí nikoliv jejich výškou, zjednodušeně řečeno, laser taví materiál stále ve stejné výšce (vrstvě). Většina prací, článků a studií se odkazuje právě na tento problém, kdy neberou v úvahu ostatní činitele a změnu vlastností odůvodňují rozdílným úhlem dopadu laseru.



Obrázek 12 - Dopad laserového paprsku [19]

Právě tímto problémem se např. zabývali ve studii [19], ve které při experimentálním tisku poměr stran elipsy se zvyšující se vzdáleností od středu platformy narůstal. Na středu platformy měl laser poměr 1, což je hodnota kružnice, a na úplném kraji platformy se poměr blížil k hodnotě 1,2. Z toho vyplývá, že na krajích platformy jsou díly spékány laserem ve tvaru elipsy, a to má za následek až pětinasobně vyšší drsnost. Dle provedeného měření se drsnost nemění lineárně od středu, ale dochází k exponenciálním nárůstům, viz Obrázek 13. Stejných výsledků se dobral i zdroj [18] a [20]. Poslední zmíněný článek došel ke stejným výsledkům pouze u rovinných ploch (= rovnoběžných s platformou). Šikmé plochy vykazovaly úplně opačný trend. Tento opačný jev nebyl ve studii zcela vysvětlen. Dále se zdroj [18] zabýval měřením tvrdosti, kdy největší hodnoty tvrdosti dosahovaly vzorky umístěné uprostřed platformy. Všechny zmiňované zdroje využívaly technologii DMLS, v experimentu [18] byla použita tiskárna EOSINT M 280 od firmy EOS, od stejné firmy ale novější verzi použili ve článku [20] EOSINT M 290 a poslední zdroj [19] využíval stroj – Renishaw AM 4007.



Obrázek 13 - Drsnost [19]

## 2.5.2 Způsob nanášení vrstvy

Vrstvy kovového prášku jsou při technologii DMLS vytvářeny speciálním nanášecím systémem, který je tvořen pohyblivým ramenem, které je poháněno elektromotorem. V dotyku s práškem je pouze část tohoto ramena, tzv. recoater blade, v překladu nanašeč vrstev (dále pouze nanašeč). První vrstva při přípravě tisku je založena operátorem tiskárny manuálně po vyrovnání platformy za pomoci úchylkoměru a spárových měrek. Dále následuje spuštění tisku, dojde ke spečení 1.vrstvy, která se zpravidla taví 2x, pro lepší připojení k platformě. Posléze dojde k pohybu platformy se zásobníkem o 1 vrstvu níže, dojde k přejezdu recoateru na pravou stranu, vyjetí zásobníku a nanášení další vrstvy, dále se proces opakuje, jak je naznačeno na obr. 4. Problémy spjaté s manuálním založením první vrstvy jsou dány lidským faktorem. První vrstva by zpravidla měla být transparentní a měla by mít tloušťku jedné vrstvy. Jelikož dochází k vizuální

kontrole operátora, dále může dojít během tisku ke špatnému přitavení dílů k platformě, a to může zapříčinit „stržení“ těchto dílů z platformy, či nestabilní přichycení dílů a s tím související vnášení zbytkového vnitřního pnutí vlivem špatného odvodu tepla.

Další faktorem může být druh zvoleného nanašeče. Pro jednotlivé tištěné materiály jsou používány odlišné druhy nanašečů, např. z HSS (rychlořezná ocel), keramiky či nanášecí kartáček. Každý nanašeč má svá pozitiva i negativa. Kartačový nanašeč přejede snadno spečenou nerovnost, naopak ale netvoří tak kompaktní vrstvu prášku. Tvrdší nanašeče vytvářejí kompaktní vrstvy, tzn. lépe pěchují prášek mezi nanašečem a platformou. Jejich nevýhodou ale je, že nepřekonají žádné větší nerovnosti při procesu spékání. Dále jen nutné často provádět kontrolu těchto nanašečů a důsledně je měnit, jelikož dochází k jejich opotřebení, a to může dále způsobovat procesní problémy či to může mít za následek pozměněné výsledné vlastnosti tištěných dílů.

Posledním jevem spadajícím do této skupiny je celkové dilatační prohnutí tištěné plochy, kdy jsou kraje výš než zbytek tištěného kusu, což způsobuje kontakt či kolizi s nanašečem vrstev. V praxi může kvůli tomuto jevu dojít k chvění (rozvibrování součásti), vnesení pnutí do materiálu, a to může dále také ovlivnit výsledné vlastnosti výrobků. Dále může vlivem dilatace docházet k: strhávání (narušení) krajních nanášených vrstev či může dojít k zastavení samotného tisku.

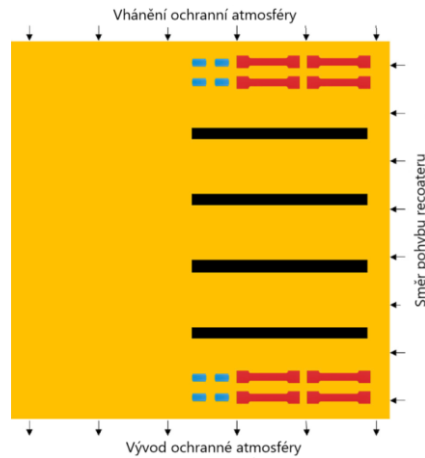
### 2.5.3 Cirkulace ochranné atmosféry

Cirkulace ochranné atmosféry nebo též proudění procesního plynu zkráceně tzv. flow, je jeden z dalších činitelů, které ovlivňují výsledné vlastnosti součástí. Při procesu je do stavěcí komory vháněna ochranná atmosféra, která je odlišná pro různé materiály (v případě oceli MS1 je to dusík, který si stroj sám dokáže vyrobit ze vzduchu, v případě oceli 316L je to argon, který musí být uměle dodáván). Jak je zřejmé viz Obrázek 14, na kterém jsou směry proudění naznačeny šipkami, ochranný plyn je vháněn tryškou z jedné strany, na protilehlé straně je pak odsávací tryška. Ochranný plyn s sebou odnáší poletující částice, které vznikají během procesu tavení a odsávací tryškou je eliminuje z pracovního prostoru tiskárny. Tento proces může zapříčinit navátí částic,

kteří vznikají během tisku, do oblasti blízko sběrné trysky a tím kontaminovat připravenou práškovou vrstvu, a tím způsobit jiné výsledné vlastnosti vzorků tisknutých na těchto místech.

Ve studii [21], kde se tímto jevem zabývali, potvrdili, že místa nacházející se, co nejdále od trysek mají největší pravděpodobnost výskytu těchto residuálních částic, které vznikají během procesu, zatímco umístěním součástí blízko trysek se výskyt částic převážně eliminuje. Při tomto pokusu byly tištěny 3 druhy vzorků viz Obrázek 14: vzorky na tahovou zkoušku (červená barva), válcové vzorky (modrá barva) a tzv. „vzorky na zaplnění platformy“ (černá barva), kvůli větší produkci odlétávajících částic a lepší detekci a vyhodnocení. Výsledky byly následující: díly

tisknuté dále od trysek vykazovaly větší pórovitost a maximální velikost pórů byla větší o 5 %.  
Vzorky s menší pravděpodobností obsahu residuálních částic mají o 5 % vyšší pevnost v tahu.



Obrázek 14 - Rozmístění vzorků [21]

Tisknuté válcové součásti blízko trysek mají o 28 % menší drsnost povrchu a vzorky na tahovou zkoušku spékané na stejném místě mají také zmenšenou drsnost, a to o 15 %. Dále je zde zmíněna informace, že zakřivené povrchy (myšleno válcové) mají větší drsnost než rovné plochy (tahové vzorky), a to až o 60 %. Dle zmíněných výsledků lze konstatovat, že pozice daleko od trysek jsou z hlediska mechanických vlastností s vysokou pravděpodobností horší než místa blízko trysek.

### 3 Ověření

V praktické části této práce jsou uvedeny provedené experimenty a jejich výsledky pro zjištění vlivu polohy součásti na platformě na jejich výsledné mechanické vlastnosti a strukturální kvalitu při použití technologie DMLS.

První provedený experiment byl zaměřený na ověření, do jaké míry ovlivňuje umístění tištěných kusů na platformě jejich zbytkové vnitřní napětí. Jak již bylo uvedeno dříve, při procesu DMLS dochází ke spékání jednotlivých vrstev, které se vrství na sebe. Při spékání každé jednotlivé vrstvy dochází tavení materiálu a jeho následnému smrštění vlivem chladnutí, což má za následek vznik zbytkového vnitřního pnutí v tištěném objemu. Od výrobců kovových 3D tiskáren jsou proto doporučována různá tepelná zpracování na snížení těchto pnutí. V případě technologie DMLS firma EOS doporučuje tepelné zpracování typu: rozpouštěcí žíhání, a to na 820 °C nebo 940 °C. Jak už je z názvu patrné, dochází při něm pouze k redukci tohoto pnutí v materiálu, ne však k jeho úplnému odstranění. Vnitřní napětí způsobuje zhoršení mechanických vlastností dílů, a proto je vhodné také ověřit, jestli jejich rozmístění a orientace ovlivňuje i velikost vnitřního zbytkového pnutí v materiálu.

Ve 3. experimentu byla přítomnost vnitřního zbytkového napětí na různých pozicích ověřena jiným způsobem, a to pomocí zjištění tvarové deformace speciálních kusů, která se projevila po jejich odříznutí od platformy.

Další provedený experiment byl zaměřený na ověření vlivu umístění na mechanické vlastnosti vytištěných dílů, a to pomocí mechanických zkoušek určujících houževnatost materiálu. Sledován byl přitom i vliv geometrie „V-vrubu“, který byl pro srovnání při posledním experimentu na vzorcích vytvořen až po jejich dokončení.

#### 3.1 Použité vybavení a materiály

Praktická část této práce byla realizována s pomocí laboratoří Regionálního technologického institutu (dále jen RTI). RTI je výzkumné centrum Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni. Tento institut je vybaven nejmodernějším vybavením pro výzkum, např. výzkum a vývoj moderních konstrukcí vozidel a pohonných systémů, výzkum a vývoj výrobních strojů, výzkum a vývoj tvářecích technologií a výzkum a vývoj obráběcích technologií. Tato práce mohla vzniknout díky spolupráci s Laboratoří kovové aditivní výroby, Mechanickou zkušebnou a Metalografickou laboratoří.





Obrázek 15 - EOS M 290 [10]

Samotná aditivní výroba vzorků pro tuto práci byla provedena na zařízení EOS M290 od německé firmy: EOS GmbH (Electro – Optical Systems). Tento stroj disponuje dle výrobce: vláknovým laserem o max. výkonu 400 W, rychlostí tisku až 7 m/s a velikostí výrobního prostoru 250 x 250 x 325 mm.

Pro tisk byl použit materiál EOS MaragingSteel MS1 (dále pouze značení MS1), chemické složení tohoto prášku je v souladu s normou EN 1.2709 a německou DIN X3NiCoMoTi18-9-5. Přesněji se jedná o martenziticky vytvrditelnou, nástrojovou ocel, viz Tabulka 1, Tabulka 2. Velikost částic tohoto prášku se pohybuje v rozmezí 10-65  $\mu\text{m}$ . Použitý nanašeč pro tento materiál byla keramika. [10]

Tabulka 1 - Vlastnosti a využití MS1 [10]

Základní vlastnosti	Využití
Vysoká pevnost a tvrdost	Formy na lisování plastů
Vynikající únavová pevnost	Nástroje pro lisování za tepla a studena
Dobrá obrobiteľnosť	Nástroje pro tlakové lití hliníku a slitin zinku
Vlastnosti závislé na tepelném zpracování	Řezné nástroje

Tabulka 2 - Chemické složení MS1 [10]

Chemické složení prášku (hm. %)		
Prvek	Min.	Max.
Fe	Zbytek objemu	
Ni	17	19
Co	8,5	10
Mo	4,5	5,2
Ti	0,8	1,2

Jako další materiál byla použita nerezová ocel s označením EOS StainlessSteel 316L (dále jen 316L). Jedná se o austenitickou ocel legovanou molybdenem pro zvýšení antikoročních vlastností viz Tabulka 3, Tabulka 4. Rozložení částic v prášku deklaruje výrobce, jak už bylo zmíněno o velikostech 10-65  $\mu\text{m}$ . Pro tento materiál byl použit nanašeč z oceli HSS. [10]

Tabulka 3 - Vlastnosti a využití 316L [10]

Základní vlastnosti	Využití
Vysoká odolnost proti korozi	Chemický průmysl
Vysoká pevnost	Zdravotnictví Potravinářství
Vysoká tažnost a houževnatost	Strojírenství

Tabulka 4 - Chemické složení 316L [10]

Chemické složení prášku (hm. %)		
Prvek	Min.	Max.
Fe	Zbytek objemu	
Cr	17	19
Ni	13	15
Mo	2,25	3
C	-	0,03
N	-	0,1

### 3.2 Návrh experimentálních vzorků

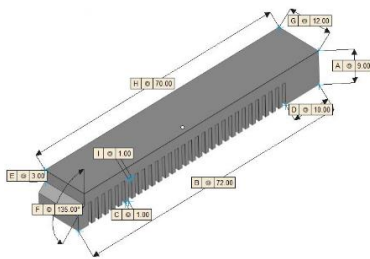
Pro tvorbu modelů byl použit běžně dostupný CAD software: Autodesk Inventor Professional 2022, ve kterém byly vytvořeny 3D model, které byly exportovány do stl. formátu (viz. úvod). Pro tyto díly byly doplněny podpurné konstrukce, a to v softwaru Materialise Magics. Tento software je všestranný a intuitivní program pro tvorbu tiskových modelů pro aditivní výrobu. 3D modely se nahrají do tohoto programu, počítač v něm vytvoří příslušný stavěcí (výrobní) prostor (kvádr o rozměrech 250 x 250 x 325 mm) a grafické znázornění umístění šroubů, kterými je platforma připevněna ke stroji. V tomto prostoru může operátor vytvořit potřebné podpory manuálně za použití svých znalostí a zkušeností, či použije automatické generování podpor. Po dokončení se tato sestava uloží ve formátu Magics project file. Dále se modely a podpory vyexportují do programu EOSPRINT od firmy EOS, který komunikuje s tiskárnou. V této aplikaci si operátor navolí prostředí: v jaké tiskárně bude tisknout a jaký použije prášek, v našem případě: M290, MS1 a 316L. Za těchto nastavení lze importovat modely s podporami do programu a vhodně je rozmístit po platformě. Jako poslední jsou nastaveny procesní parametry tisku, které mohou být defaultní (výchozí) nebo speciálně nastavené podle konkrétních potřeb a požadovaných vlastností tištěných kusů. V případě prováděných experimentů byly ale zvoleny defaultní parametry, jelikož by jakákoliv změna procesních parametrů tisku také ovlivnila výsledné vlastnosti jednotlivých tištěných kusů.

### 3.3 1. experiment

První z experimentů byl zaměřený na ověření, do jaké míry pozice kusů na tiskové platformě ovlivňuje jejich zbytkové vnitřní napětí.

#### 3.3.1 Vzorky pro stanovení vnitřního napětí

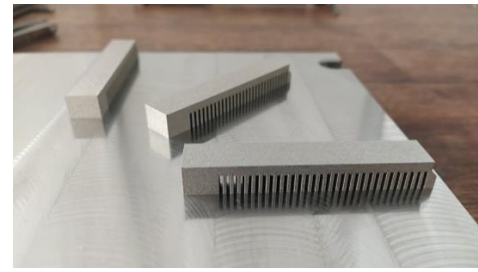
Jako zkušební vzorky pro tento experiment byly použity kalibrační hřebeny viz Obrázek 16, Obrázek 17, Obrázek 18 určené pro nastavení počítačové simulace procesu aditivní výroby od firmy Materialise, na kterých by se mělo vnitřní napětí projevit. Jako materiál byla použita nerezová ocel 316L. Tyto vzorky jsou pro potřeby této kalibrace tištěny v přesně definované formaci, jak je patrné viz Obrázek 18 a dále nejsou tepelně zpracované.



Obrázek 16 - Rozměry hřebenu



Obrázek 17 - Konec tisku kalibračních hřebenu



Obrázek 18 - Vydáný tisk

#### 3.3.2 Měření vnitřního napětí

Pro zjištění vnitřního napětí byla zvolena destruktivní metoda označovaná jako „odvrtávací“ nebo též „tenzometrická“ metoda. Jedná se o široce používanou a rozšířenou metodu z hlediska její jednoduchosti, finanční nenáročnosti a možnosti využití na různých materiálech.

Principem této metody je, že do vzorků, ve kterých je potřeba změřit vnitřní napětí, je za pomoci frézky navrtána z vrchní části díra o průměru 1 mm a hloubce zhruba 1 mm (dle průměru frézy). Navrtáním díry se uvolní napětí v dílu a následně pomocí aplikovaných tenzometrů je možné změřit odezvu od následných deformací. Použité tenzometry jsou sestaveny do podoby, tzv. tenzometrické růžice. Na každém ze tří vytištěných kalibračních hřebenu byly vyvrtány 2 díry, vždy na obou koncích, dohromady tedy 6 otvorů.

Předpokladem této metody je, že materiál, který je zkoumán, je izotropní, homogenní a lineárně elastický. Toto měření se řídí normou ASTM E837. Díky tomuto tisku a následnému měření napětí byly získány informace o vlivu natočení vzorků, umístěných v pravé horní části platformy, na vnitřní napětí. Srovnání bylo provedeno na vzorku rovnoběžném se nanašečem, svírajícím s nanašečem úhel 45° a kolmém na tento nanašeč.

### 3.3.3 Výsledky 1. experimentu

Tabulka 5 - Zbytkové napětí ve vzorcích

	Vzorek č. 1 (kolmý na nanašeč)	Vzorek č. 2 – 45°	Vzorek č. 3 (rovnoběžný s nanašečem)
Průměrná hodnota napětí ve vzorku [Pa]	647,351	541,522	631,435

Podle naměřených hodnot nejmenší hodnotu zbytkového vnitřního pnutí v materiálu vykazuje hřeben, který svírá s nanašečem 45°, viz Tabulka 5. Obecně platí, že operátor natáčí součásti, aby svíraly s nanašečem úhel větší než 5°, z důvodu minimalizace odporu a plynulého nanesení vrstvy. Z tohoto ověření tedy plyne, že díly, jejichž strany jsou kolmé na nanašeč, vykazují větší vnitřní zbytkové napětí než díly natočené. Lze z toho tedy učinit závěr, že ke snížení vnitřního pnutí v materiálu, které může vést ke snížení kvality a mechanických vlastností, je možné dosáhnout vhodnou orientací.

## 3.4 2. experiment

2. provedený experiment byl připravený na zjištění vlivu polohy zkušebních vzorků na jejich výsledné mechanické vlastnosti. Pro posouzení těchto mechanických vlastností byly provedeny zkoušky rázem v ohybu, z jejichž výsledků bylo možné porovnat vzorky různě rozmístěné a odlišně orientované.

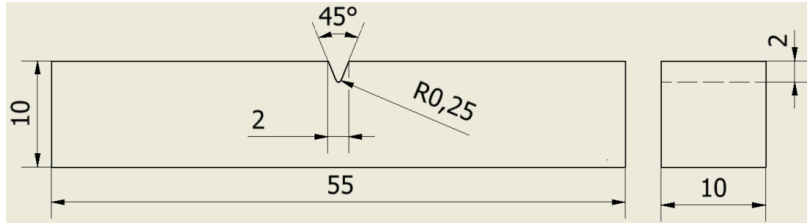
### 3.4.1 Popis experimentu

Pro 2. tisk byly vybrány standardní vzorky pro zkoušku rázem v ohybu dle Charpyho z materiálu MS1. V případě této zkoušky se jedná o dynamickou mechanickou zkoušku určenou pro získání hodnoty nárazové práce, která je měřítkem odolnosti proti rázovému namáhání. Při této zkoušce dochází k naměření nárazové práce – energie a maximální síly nutné k vytvoření lomu, což je předpoklad pro tuto zkoušku. Dále se provádí tzv. fraktografie, tedy se vizuálně hodnotí oblast lomu a dochází k určení, jestli se jedná o materiál křehký (nízká nárazová práce) nebo houževnatý (vysoká nárazová práce). Zkouška byla prováděna za pokojové teploty (20 °C).

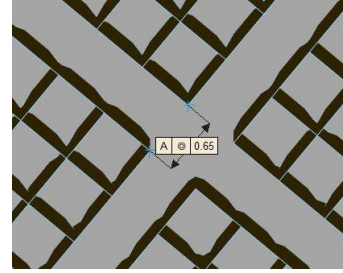
### 3.4.2 Konstrukce zkušebních vzorků

#### Použité vzorky

Značení zkoušky je KCV, jedná se tedy o vzorky s V – vrubem a s hloubkou 2 mm, viz Obrázek 19. Zkouška byla provedena na přístroji Zwick Roell RKP450 v Mechanické zkušebně RTI a byla pro ni použita norma: CSN EN ISO 14556.



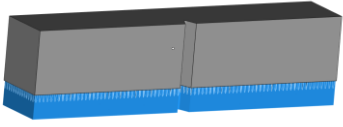
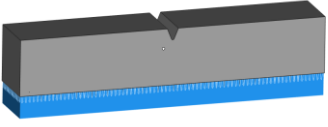
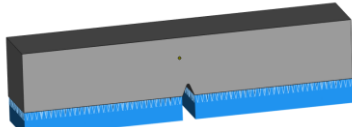



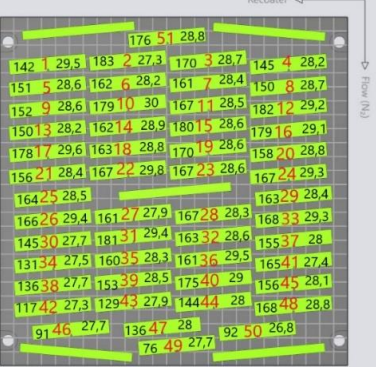
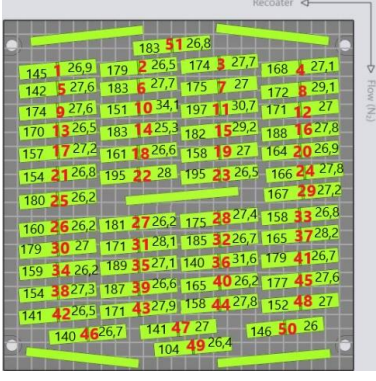
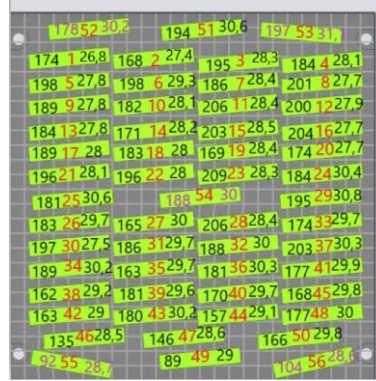
Obrázek 19 - Rozměry vzorku



Obrázek 20 - Fregmentace bloku

Při tomto experimentu byly vybrány 3 orientace vzorků s vrubem viz Tabulka 6 - 2. řádek. Na každé platformě bylo tištěno 51 vzorků s totožnou orientací viz Tabulka 6 – 4. řádek. Červené číselné značení od 1 do 51, značí číselné zařazení vzorku, hodnoty nalevo jsou hodnoty nárazové energie a hodnoty na pravé straně jsou hodnoty maximální nárazové síly. Na 3. platformě místo kalibračních hřebenů pro 3. experiment byly tištěny také vzorky pro rázovou zkoušku, kvůli zachování stejných podmínek pro všechny tisky. Hodnoty těchto vzorků nebyly dále použity pro vyhodnocení, aby nedošlo ke zkreslení výsledků při porovnávání jednotlivých platform.

Tabulka 6 - Přehled platform (orientace, použité podpory, rozmístění + výsledné hodnoty)

1. platforma	2. platforma	3. platforma
		
		
		

## Použité podpory

Pro vzorky byly zvoleny blokové podpory tištěné po 80  $\mu\text{m}$  vrstvách, což je dvojnásobná hodnota běžně tištěných vrstev pro plný materiál. Blokové podpory jsou výhodné kvůli menší spotřebě materiálu a rychlejšímu tisku, než je tomu v případě podpor z plného materiálu. Pro tyto podpory byla nastavena fragmentace o tloušťce 0,65 mm, viz Obrázek 20. Dále byly využity objemové podpory pro vyztužení delších vzorků z důvodu minimalizování jejich možného prohnutí a odtržení od platformy viz Tabulka 6 - 3. řádek, půdorysy jednotlivých vzorků.

## Technologický přídavek

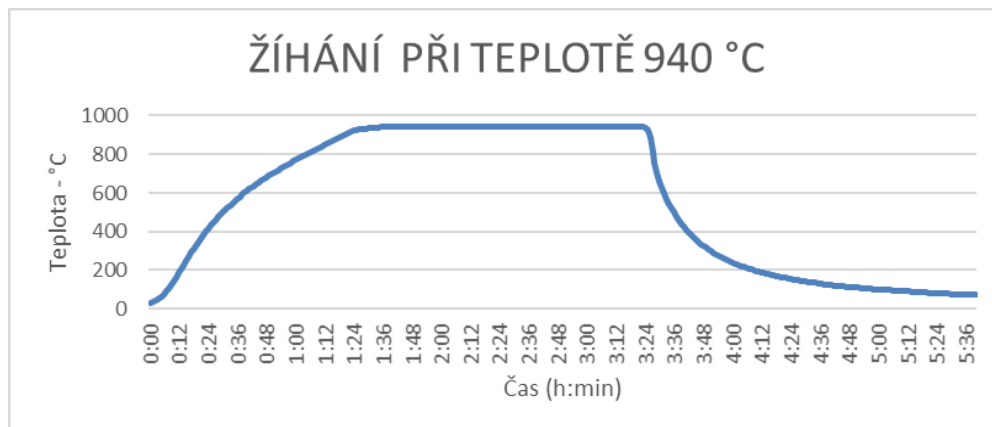
Po tepelném zpracování a odříznutí na pásové pile, jak je naznačeno viz Obrázek 21, dochází k broušení podporovaného povrchu. Broušení se provádí na pásové brusce. V části, kde podpory zabíhají do materiálu, se vrstva plného materiálu součástí a vrstva podpor pálí v jedné vrstvě současně, tato vrstva by mohla přispět k nekorektním výsledkům, proto je nutné jí odstranit, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Podpory zabíhají 2 vrstvy do materiálu, což je 0,080 mm, z toho důvodu byl zvolen technologický přídavek na broušení 0,1 mm.



Obrázek 21 - Odřez vzorků na pásové pile

### 3.4.3 Tepelné zpracování vzorků po tisku

Jak již bylo uvedeno, od firmy EOS, dodavatele práškových materiál a tiskáren, je pro takové kusy doporučované tepelné zpracování – rozpouštěcí žíhání ke snížení k redukci vnitřního pnutí v materiálu. V tomto případě bylo použito žíhání ke snížení pnutí při výdrži na 940  $^{\circ}\text{C}$ , jeho průběh je znázorněný viz Graf 1. Při tomto procesu dochází k nahřátí dílu a udržování požadované teploty po stanovenou dobu, potřebné k rekrystalizaci struktury a dále pozvolné chlazení.

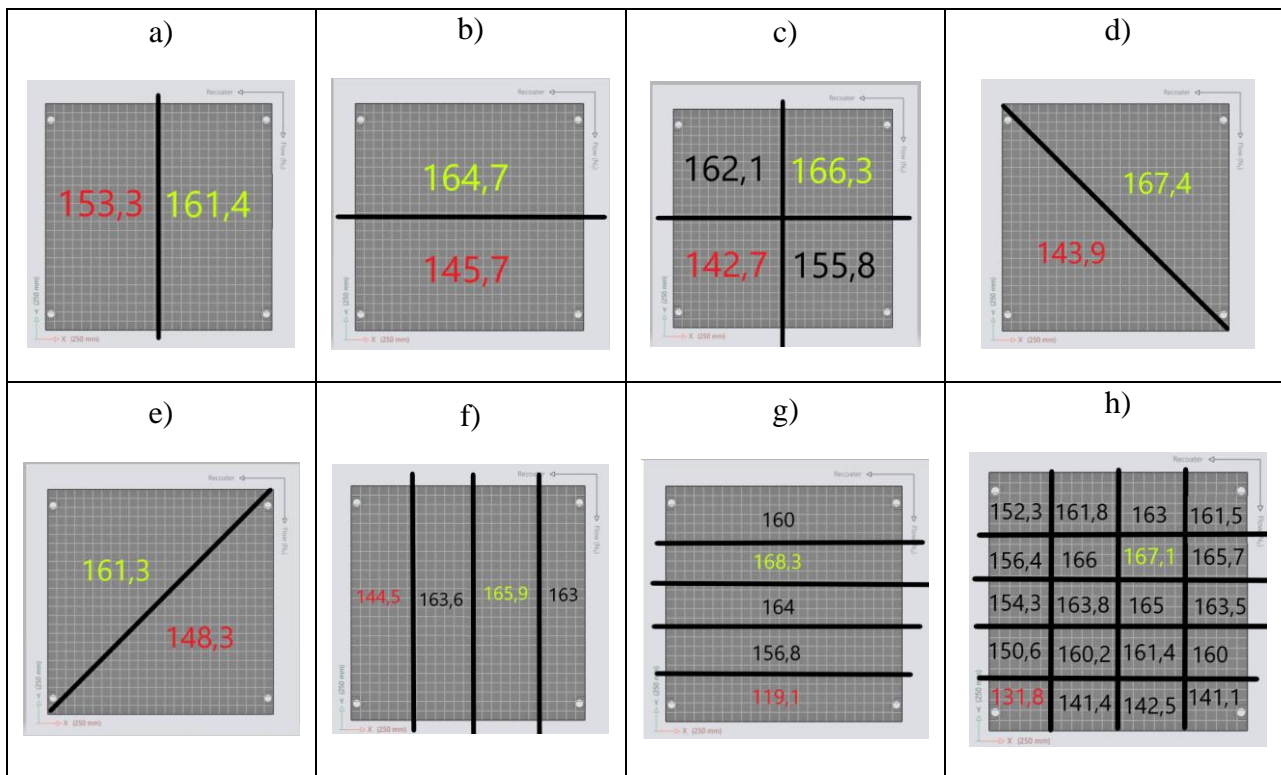


Graf 1 - průběh tepelného zpracování

### 3.4.4 Výsledky 2. experimentu- 1. platforma

Jako první byly tištěny vzorky s V – vrubem orientovaným v ose Z viz Tabulka 6. V tomto případě byla každou vrstvu tištěna stejná plocha. Průměrná hodnota nárazové práce pro tuto platformu je 156 J. Pro tuto práci je důležitá hodnota nárazové práce a její měnící se hodnoty v závislosti na pozici na platformě. Platforma ve vyhodnocení byla rozdělena na jednotlivé části, kde byl z hodnot rázových zkoušek určen aritmetický průměr konkrétních vzorků. Dle výsledků provedených mechanických zkoušek (Tabulka 7) byl učiněn závěr že: Větší míru houževnatosti vykazují vzorky umístěné v pravé a horní části platformy, viz a), b). Dále byla platforma rozdělena na kvadranty, kde 1. kvadrant vyšel nejlépe, nejhůře kvadrant 3. viz c). Horní části vykazovaly lepší houževnatost při rozdělení platformy úhlopříčně viz d), e). Dále byl určen průnik dvou množin f) a g) a bylo určeno celkově nejlepší postavení na platformě a nejhorší viz. h). Nejhorší místo dle výsledku je dolní levý roh, naopak nejlepší místo je okolí levého dolního rohu 1. kvadrantu. K úplnému přeražení na 2 části došlo u vzorků s číslem: 1, 49 a 46.

Tabulka 7 - Vyhodnocení 1. platformy

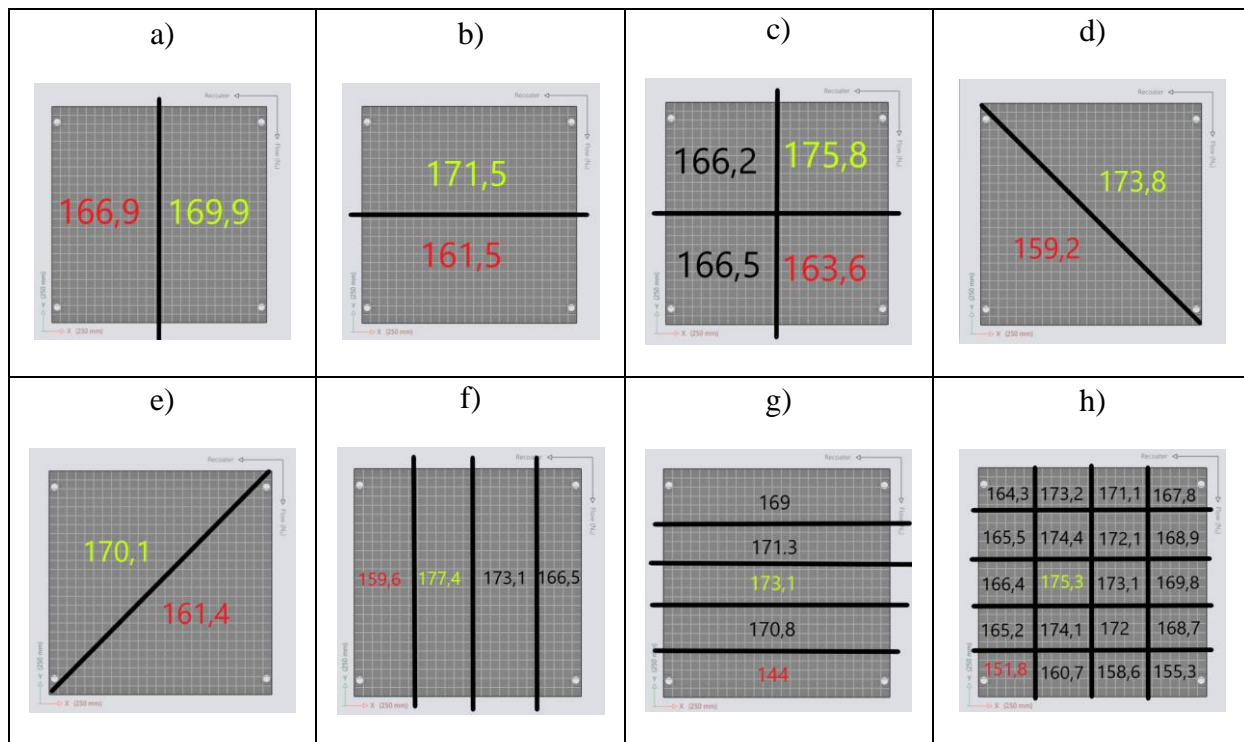


### 3.4.5 Výsledky 2. experimentu- 2. platforma

Při tisku druhé platformy byly tištěny vzorky s orientací V-vrubu na vrchu součásti (viz Tabulka 6 - 2. řádek). Tentokrát byla spékána plocha, která se v průběhu tisku zmenšovala (v oblasti V – vrubu). Průměrná hodnota nárazové práce pro tuto platformu je 167 J. Dále viz Tabulka 8 bylo doloženo, že vzorky, které jsou umístěny v pravé a horní části platformy vykazují větší vrubovou houževnatost viz a), b). 1. kvadrant má nejvyšší hodnoty a 4.kvadrant ty nejnižší viz. g). Co se týče úhlopříčného rozdělení, tak pozice v horní části vycházejí lépe viz. h), e). Dle průniku f) a g) je možné učinit závěr, že nejhorší pozice, kam lze umístit vzorky, je levý dolní roh a nejvhodnější je nalevo od středu viz. h). Žádný ze vzorků v tomto případě nebyl přeražen na 2 části.



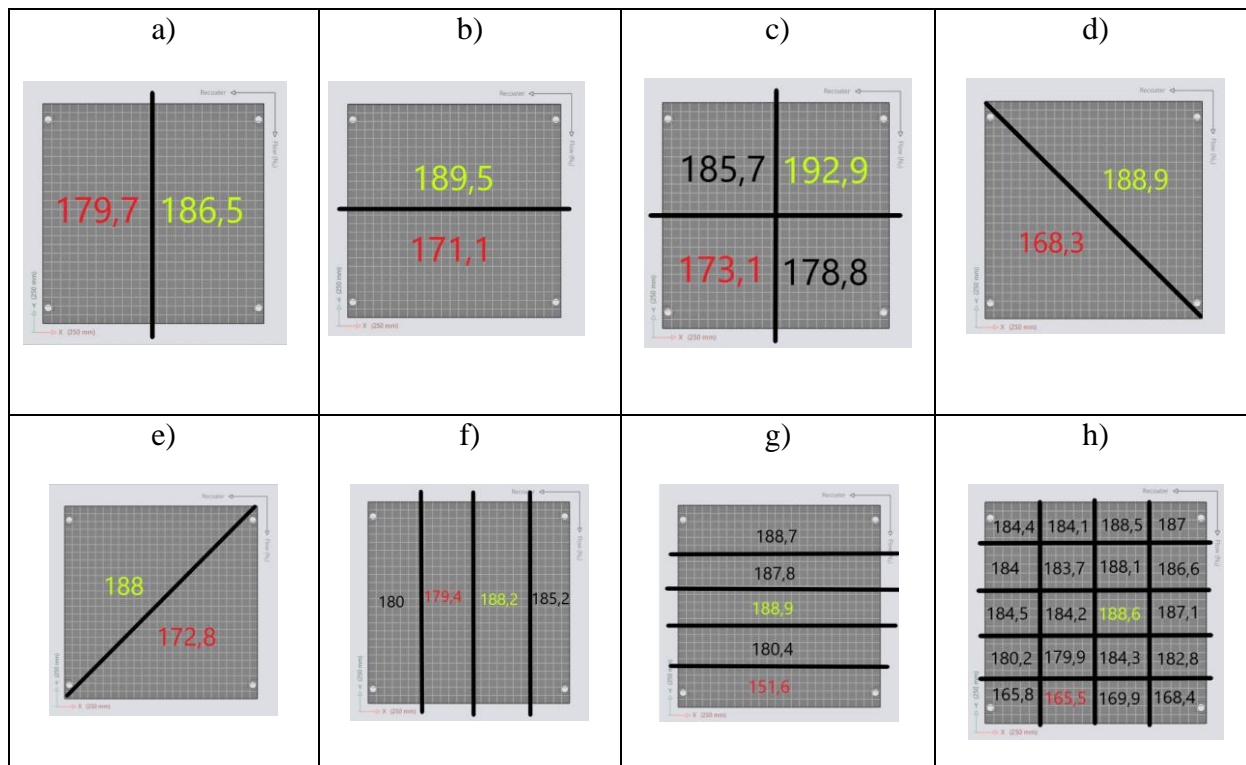
Tabulka 8 - Vyhodnocení 2. platformy



### 3.4.6 Výsledky 2. experimentu- 3. platforma

Na této platformě byly tištěny vzorky s V – vrubem směřujícím dolů. Spékající plocha součástí teda rostla ve směru osy Z. Úhel vrubu splňuje podmínku tisku bez podpor, a proto byla podporována jen upínací část viz Tabulka 6. Průměrná hodnota nárazové práce pro rázové vzorky tištěné na této platformě činí 181 J. Porovnání rozmístění vzorků na platformě je následující: viz Tabulka 9, porovnání a), b), c), d) a e) vykazují stejné výsledky jako na předchozích platformách, tedy lepší mechanické vlastnosti vykazuje pravá a horní část platformy plus 1. kvadrant. Při úhlopříčném rozdělení vzorky v horních částí disponují vyššími hodnotami houževnatosti. Rozdělení h) ukazuje, že pro tuto platformu je nejlepší postavení na středu a nejhorší v levém dolním rohu viz Tabulka 9. Vzorek s číslem 49 byl přeražen na 2 části.

Tabulka 9 - Vyhodnocení 3. platformy

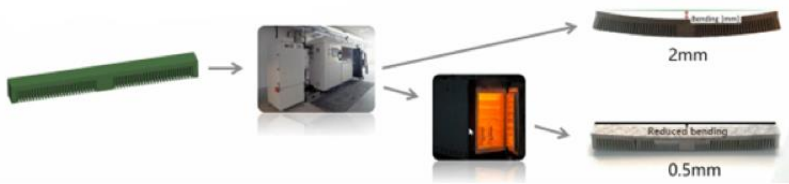


### 3.5 3. experiment

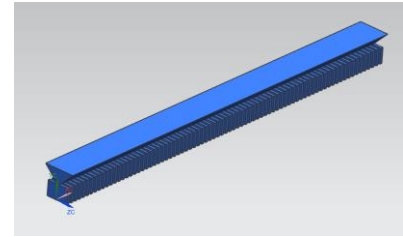
3. experimentů provedený za účel zjištění vnitřního zbytkového napětí ve speciálních kusech, které byly rozmístěny na různých místech tiskových platform a na základě jejich tvarových deformací byl hodnocen vliv jejich pozice.

#### 3.5.1 Popis experimentu

Pro 3. experiment byly na 1. a 2. platformě vytištěny kalibrační hřebeny, které se používají pro kalibraci simulačního programu Amphyon, který podobně jako již uvedený simulační modul od firmy Materiallise simuluje průběh aditivní výroby. Tyto vzorky jsou po vytištění určeny k odříznutí od platformy, kdy stupeň jejich naměřené deformace by měl reprezentovat míru vnitřního napětí v materiálu, a v případě tohoto experimentu jeho závislost na umístění na platformě. Postup pro měření hodnot pro kalibraci je schematicky popsán viz Obrázek 22. Pro zjištění hodnot potřebných pro kalibraci programu Amphyon jsou hodnoty deformací vzorků odříznutých ihned po vytištění a odříznutých až po tepelném zpracování zadány. Při tomto experimentu byl postup stejný, pouze se navíc sledoval rozdíl v deformacích vzorků umístěných na jiných pozicích. Jednotlivé vzorky z oceli MS1 byly rozmístěny po platformě mezi vzorky pro rázovou zkoušku (viz Tabulka 6).



Obrázek 22 - Kalibrace



Obrázek 23 - Kalibrační hřeben

### 3.5.2 Úpravy vzorků po tisku

Hřebeny na 1. platformě byly podle předepsaného postupu tepelně zpracovány a posléze odříznuty společně se vzorky pro rázovou zkoušku. Vzorky na 2. platformě byly odříznuty již před tepelným zpracováním, pro porovnání míry vnitřního napětí v materiálu před a po tepelném zpracování. Pro znatelnější detekci deformací pro tento pokus byly použity nové kalibrační hřebeny se speciální geometrií viz Obrázek 23. Tento odlišný tvar a rozměry hřebenu by měly být citlivější na deformace vlivem zbytkového vnitřního napětí po odříznutí. Hřebeny na středu platformy viz. Tabulka 6, byly z důvodu nemožnosti odříznutí před tepelným zpracováním, vystaveny oba tepelnému zpracování.

Díky tomuto tisku bylo možné zjistit, jestli poloha na platformě má vliv na vnitřní napětí či nikoliv. Dále bylo porovnáváno zbytkové vnitřní napětí tepelně zpracovaných dílu a dílů, které nebyly podrobeny tepelnému zpracování. Jako poslední byly porovnány 2 hřebeny ze středu obou platforem kvůli rozptylu hodnot.

### 3.5.3 Výsledky 3. experimentu

Při měření deformací odříznutých vzorků vytištěných z oceli MS1 nedošlo k žádnému výraznějšímu zdeformování vzorků je by bylo důsledkem existence zbytkového vnitřního napětí v materiálu. Zjištěné deformace byly minimální, hodnoty se pohybovaly v mezích nepřesnosti tisku a stroje.

## 3.6 4. experiment

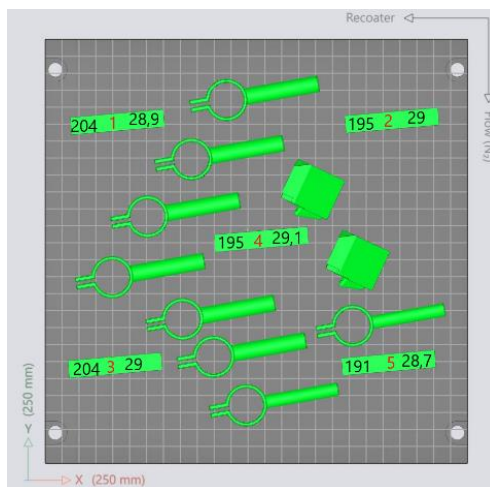
Při tomto experimentu byly separátně vytištěny kusy bez V-vrubu, který byl na nich dodatečně vytvořen, a to možnost porovnání, do jaké míry výsledky mechanických zkoušek provedených ve 2. experimentu jsou ovlivněny geometrickou přesností V – vrubu.

### 3.6.1 Popis experimentu

Dále bylo vytištěno 5 vzorků bez předčištěného V – vrubu, kdy byl vrub po vytištění obroben pro získání hodnot s normovaným V – vrubem pro porovnání s jednotlivými platformami. Vzorky

budou jako předešlé tištěny s technologickým přídatkem 0,1 mm na broušení a byly použity stejné podpory. Vzorky byly rozvrženy po celé platformě pro určení směrodatné hodnoty pro

porovnání. Obrábění bylo provedeno v Mechanické zkušebně RTI. Vrub byl obroben na místě, kde byl vrub na 1. platformě, tedy taven v ose Z. Tyto vzorky byly kvůli zaplnění platformy tištěny i s dalšími díly viz Obrázek 24, které ale nejsou pro tuto práci relevantní.



Obrázek 24 - Rozmístění vzorků bez tištěného vrubu

### 3.6.2 Výsledky

Tabulka 10 - Hodnoty obráběných vzorků

Obráběný vrub [J]	
Aritmetický průměr= $\mu$	197,8
Směrodatná odchylka= $\sigma$	5,3
Výběrová směrodatná odchylka= s	5,9
Průměrná odchylka	5
Minimum	191
Maximum	204
Geometrický průměr	197,7

Aritmetický průměr u vzorků s obráběným V – vrubem je 197,7 J. Hodnoty z 4. experimentu jsou použity pouze pro zhodnocení orientace, k použití pro srovnání nebylo tištěno dostatečné množství vzorků.

## 4 Zhodnocení

### 4.1 Zhodnocení 1. experimentu

V tomto experimentu bylo dokázáno, že způsob nanášení vrstvy má vliv na výsledné vnitřní zbytkové pnutí v materiálu. Kde nejmenší pnutí vykazoval vzorek natočený o 45° k nanašeči, při této orientaci dochází k nejmenšímu odporu dílu vůči nanašeči, a to má za následek nejmenší zbytkové pnutí.

### 4.2 Zhodnocení 2. experimentu

Na tomto experimentu byl demonstrován vliv rozmístění na výslednou houževnatost materiálu. Je zde ověřen technologický aspekt ofuku, kdy nejvyšší míru residuálních částic nalezneme v součástech nejdále od trysek, což bylo ověřeno nejnížší mírou houževnatosti materiálu na těchto místech. Dále zde byl potvrzen vliv rozdílného úhlu paprsku laseru při tavení, kdy místa, kde je vrstva tavena ve tvaru elipsy, tedy kraje platformy, vykazují menší míru houževnatosti než vzorky uprostřed platformy, které jsou spékány zhruba kruhově viz Obrázek 12.

#### 4.2.1 Fraktografie

Při zkoušce u všech 153 vzorků došlo k houževnatému – tvárnému lomu. Jedná se o tzv. jamkový lom viz Obrázek 25, což svědčí o houževnatosti materiálu.



Obrázek 25 - Houževnatý lom

### 4.3 Zhodnocení 3. experimentu

Ve srovnání s 1. experimentem, při kterém byly vzorky tištěny z materiálu 316L, a vykazovaly bez tepelného zpracování daleko větší míru deformace způsobené zbytkovým vnitřním pnutím, u materiálu MS1 se takové pnutí ve formě deformace tohoto materiálu neprojevalo, a to ani po tepelném zpracování, ani před ním.

### 4.4 Zhodnocení 4. experimentu

Díky tomuto experimentu se došlo k závěru, že došlo k vlivu tvaru vrubu na výsledky mechanické zkoušky v 2. experimentu. Proto byl proveden a je zde uveden tvarový rozbor jednotlivých vrubů. Tento vliv na celkové vyhodnocení rozmístění vliv nemá, jelikož se

srovnávaly vždy vzorky totožně tištěné, kde tento jev vliv má, je vyhodnocení orientace viz Tabulka 11. Pokud by bylo požadováno srovnání s konvenčně vyráběnou a obráběnou ocelí (vrub) tištěných vzorků z 2. experimentu, musely by se všechny tyto vzorky dále obrábět, konkrétně jejich vruby. Dále vzorky tištěné při tomto experimentu vykazovaly hodnoty houževnatosti srovnatelné s konvenčními materiály.

#### 4.4.1 Porovnání s konvenčním obráběným vrubem

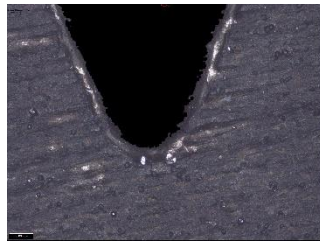
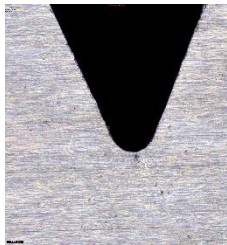
Pro porovnání s běžným obráběným konvenčním V – vrubem byla provedena kontrola V – vrubu pomocí opticko-skenovacímu zařízení IFM G4. Snímky z tohoto zařízení byly pořízeny při 10x násobném zvětšení. Při tomto pozorování byl zkoumán tvar V – vrubu tištěných v různých orientacích a srovnán s běžným obráběným V – vrubem (Obrázek 26). Jak je z obrázku zřejmé, nelze metodou kovového 3D tisku dosáhnout tvarové přesnosti jako u běžného konvenčního obrábění. Co se týče tvarové přesnosti nejlépe dopadly vzorky na 1. platformě, avšak oproti běžnému V-vrubu je naměřený radius 0,4 mm oproti normovanému 0,25 mm. Dále vruby na 2. platformě vykazovaly vysokou tvarovou nepřesnost, kdy při tisku nevznikl radius, nýbrž tvar připomínající lichoběžník s podstavou dlouhou 0,4 mm. Vzorky na 3. platformě disponovaly vrubem, jehož průřez se měnil s hloubkou (Obrázek 27), kde je vidět necelistvý povrch v závislosti na hloubce vrubu, dle skenů je možné vidět jednotlivé navařence v různých hloubkách.

Obráběný vrub

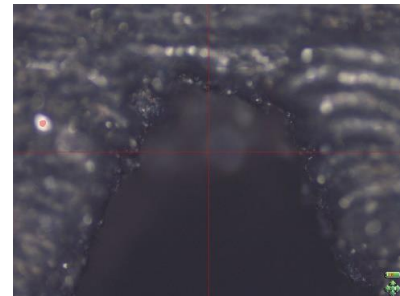
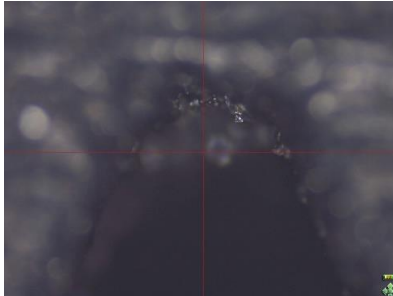
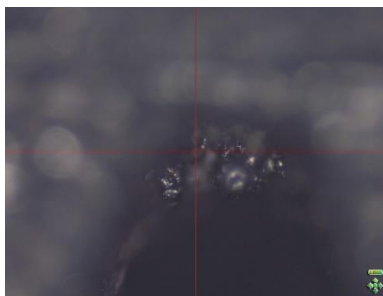
1. platforma

2. platforma

3. platforma



Obrázek 26 - Srovnání V – vrubů



Obrázek 27 - Skeny v hloubce V – vrubu z 3. platformy

## 4.5 Porovnání vlivu orientace na výsledky

Průměrná hodnota absorbované nárazové práce všech provedených vzorků je 168 J. Dle průměrné hodnoty absorbované nárazové práce všech vzorků na platformě, největší míru houževnatosti vykazuje 3. platforma. Nejmenší hodnoty nárazových prací se nacházejí na 1. platformě viz. Tabulka 11. Průměrná hodnota obráběného vrubu je 197,8 J viz Tabulka 10, nejbližše se, co se týče houževnatosti materiálu se blíží k této hodnotě vzorky tisknuty na 3. platformě.

Tabulka 11 - Nárazové energie na všech platformách

	1. platforma [J]	2. platforma [J]	3. platforma [J]
Aritmetický průměr= $\mu$	155,6	166,8	180,7
Směrodatná odchylka= $\sigma$	22,5	17,7	20,4
Výběrová směrodatná odchylka= s	22,7	17,9	20,6
Průměrná odchylka	16	14	14,4
Minimum	76	104	89
Maximum	183	197	209
Geometrický průměr	153,6	165,9	179,3

## 4.6 Porovnání rozmístění – určení nejlepší pozice

Dle tabulek: Tabulka 7, Tabulka 8, Tabulka 9 je patrné, že rozdělení a), b), c), d) a e) mají až na drobné odchylky stejný trend ve výsledcích. Naopak v rozděleních f), g) a h) můžeme najít mnoho odlišných výsledků. Pomocí výsledků h) ze všech platform je vyhodnoceno sjednocením nejvýhodnější postavení na platformě viz Obrázek 28. Kde zelená barva značí nejvyšší hodnotu, červená nejnižší, černá podprůměrnou a žlutá nadprůměrnou.



Obrázek 28 - Vyhodnocení pro všechny platformy

## 5 Závěr

Tato práce se zabývá vlivem polohy komponenty tisku na výsledné mechanické vlastnosti a povrchovou kvalitu tištěných dílů. V jejím úvodu je popsán cíl práce a postup řešení, dále pak uvedena analýza současného stavu, jejíž hlavní součástí je stručný popis možností a omezení technologie kovové aditivní výroby a popsány její klíčové technologické aspekty, které mají výsledné mechanické vlastnosti, strukturální kvalitu a geometrickou přesnost.

V kapitole Aditivní výroba je podrobně popsána technologie 3D tisku a jeho rozdělení, jsou zde uvedeny její hlavní výhody a nevýhody. Významná část této kapitoly je pak věnována popisu technologie DMLS, která byla použita při experimentech popisovaných v této práci.

V technologických aspektech je definován význam-poloha komponenty při procesu tisku pomocí technologie DMLS, kdy byla poloha rozdělena na rozmístění na platformě a na orientaci tištěných dílů. Dále byla provedena rešerše dostupných materiálů, jaký výzkum byl v této problematice udělán, jaké vzorky by byly tištěny, z jakého materiálu, na jakých strojích a jaký výsledný vliv měla poloha na výsledné vlastnosti a kvalitu.

Praktická část této práce je popsána prostřednictvím jednotlivých experimentů. V 1. experimentu byly tištěny kalibrační hřebeny z materiálu 316L pro ověření závislosti vnitřního napětí na pozici na platformě. 2. experiment obsahoval 3 jednotlivé tisky z oceli MS1 se vzorky na rázovou zkoušku. Společně s prvními dvěma platformami z 2. experimentu byly tištěny další kalibrační hřebeny pro 3. experiment, který zjišťoval přítomnost vnitřního napětí podle tvarové deformace odříznutých vzorků. A konečně 4. experiment obsahoval tisk vzorků pro zkoušku rázem v ohybu, na kterých byl vrub dodatečně vytvořen. V této části práce byly uvedeny postupy řešení, provedený post – procesing, tepelné zpracování vzorků a jako poslední byly uvedeny výsledky těchto experimentů.

Z těchto čtyř experimentů bylo určeno, že poloha na kvalitu a výsledné mechanické vlastnosti vliv má, a to takové, že pokud zvolíme nejvhodnější rozmístění, můžeme dosáhnout až o 5 % zvýšení houževnatosti materiálu. O 11 % snížení houževnatosti materiálu může být dosaženo, pokud zvolíme nejméně vhodné rozmístění při tisku z materiálu MS1. Dále byla určena nejvhodnější orientace vzorků s V-vrubem, kterým byly vzorky z 1. platformy s tištěným vrubem v ose Z, z důvodu nejbližšího geometrického přiblížení tvaru ke konvenčně obráběným vrubům. Dále bylo určeno, že v 1. kvadrantu platformy má vliv orientace kalibračních hřebenů tištěných z materiálu 316L na výsledné zbytkové vnitřní napětí, nejmenší zbytkové pnutí vykazoval vzorek natočený vůči recoateru o 45°. Provedený experiment ukázal, že orientace na platformě má vliv na zbytkové vnitřní pnutí v materiálu, ale především v případě vzorků z oceli 316L, při tisku z materiálu MS1 nebyla zjištěna žádná významnější deformace tištěných vzorků.



Výsledky této práce budou použity v budoucích výzkumných aktivitách při tisku vzorků pro rázovou zkoušku, kdy bude používána orientace vrubu v ose Z. Dále bude využíváno doporučení pro nejvhodnější rozmístění pro díly, na které je kladen vysoký nárok z hlediska vysoké houževnatosti materiálu. Všechny tyto poznatky budou využívány a dále podrobněji zkoumány na ve výzkumném centru RTI ZČU v Plzni.

## Zdroje

- [1] „Encyklopedie 3D tisku“, *3D-tisk.cz*. [Online] [Citováno: 20.10.2021]  
<https://www.3d-tisk.cz/encyklopedie-3d-tisku/>
- [2] VESELÝ Daniel, „Využití SW Magics pro efektivní návrh podpurných konstrukcí pro tištěné součásti“, bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2020. [Online]. Dostupné z:  
[https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:WjJnjDSgjZwJ:https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/41282/1/BP\\_Vesely.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:WjJnjDSgjZwJ:https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/41282/1/BP_Vesely.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz)
- [3] I. ZETKOVÁ Ivana, „Problematika výroby strojních kovových součástí D tiskem“, disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2017. [Online]. Dostupné z:  
<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:TESwVQd8Zf4J:https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/28412/1/Zetkova.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>
- [4] „What is Additive Manufacturing | GE Additive“. [Online] [Citováno: 20.10.2021]  
<https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
- [5] „showdocument.pdf“. [Online] [Citováno: 27.10.2021] Dostupné z:  
<https://www.colliercountyfl.gov/home/showdocument?id=94253>
- [6] „Rozdělení technologií | ČVUT Fakulta strojní“. [Online] [Citováno: 20.11.2021]  
<https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/>
- [7] „VAT Photopolymerisation | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University“. [Online] [Citováno: 21.11.2021]  
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>
- [8] „Directed Energy Deposition | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University“. [Online] [Citováno: 21.11.2021]  
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>
- [9] JANOVEC Martin, „Užitné vlastnosti výrobků připravených pomocí technologie 3D tisku“, diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín, 2019. [Online]. Dostupné z:  
<https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/45097>
- [10] „Industrielle 3D-Drucklösungen von EOS Electro Optical Systems“. [Online] [Citováno: 22.11.2021]  
<https://www.eos.info/de>
- [11] „Direct Metal Laser Sintering (DMLS) – Simply Explained“, *All3DP*, 15. duben 2021. [Online] [Citováno: 22.11.2021]  
<https://all3dp.com/2/direct-metal-laser-sintering-dmls-simply-explained/>
- [12] „DMLS: Understanding Additive Metal Manufacturing | Stratasys Direct“, *Stratasys*. [Online] [Citováno: 23.11.2021]  
<https://www.stratasysdirect.com/technologies/direct-metal-laser-sintering/dmls-understanding-additive-metal-manufacturing> (viděno 25. květen 2022).
- [13] „Post Processing, The Biggest Hurdle for Metal AM“, *3D Printing*, 16. prosinec 2019. [Online] [Citováno: 27.11.2021]  
<https://3dprinting.com/metal/post-processing-the-biggest-hurdle-for-metal-am/>
- [14] M. Nozar, I. Zetkova, a O. Hronek, „Searching for Favourable Powder Bed Fusion Settings in Sintering of Maraging Steel MS1“, in *DAAAM Proceedings*, 1. vyd., roč. 1, B.

- Katalinic, Ed. DAAAM International Vienna, 2018, s. 0777–0785. [Online] [Citováno: 27.11.2021]  
doi: 10.2507/29th.daaam.proceedings.113.
- [15] M. Daňa, I. Zetková, a P. Hanzl, „The Influence of a Ceramic Recoater Blade on 3D Printing using Direct Metal Laser Sintering“, *Manuf. Technol.*, roč. 19, č. 1, s. 23–28, úno. 2019, [Online] [Citováno: 14.1.2022]  
doi: 10.21062/ujep/239.2019/a/1213-2489/MT/19/1/23.
- [16] J. Jiang, X. Xu, a J. Stringer, „Support Structures for Additive Manufacturing: A Review“, *J. Manuf. Mater. Process.*, roč. 2, č. 4, Art. č. 4, pro. 2018, [Online] [Citováno: 14.1.2021]  
doi: 10.3390/jmmp2040064.
- [17] S. Liu a Y. C. Shin, „Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review“, *Mater. Des.*, roč. 164, s. 107552, úno. 2019, [Online] [Citováno: 14.1.2021] doi: 10.1016/j.matdes.2018.107552.
- [18] A. Guzanová *et al.*, „The Effect of Position of Materials on a Build Platform on the Hardness, Roughness, and Corrosion Resistance of Ti6Al4V Produced by DMLS Technology“, *Metals*, roč. 9, č. 10, Art. č. 10, říj. 2019, [Online] [Citováno: 18.1.2021] doi: 10.3390/met9101055.
- [19] S. Sendino, M. Gardon, F. Lartategui, S. Martinez, a A. Lamikiz, „The Effect of the Laser Incidence Angle in the Surface of L-PBF Processed Parts“, *Coatings*, roč. 10, č. 11, Art. č. 11, lis. 2020, [Online] [Citováno: 18.1.2021]  
doi: 10.3390/coatings10111024.
- [20] Z. Öter, M. Coşkun, a E. Koç, „Effect of Building Platform Position on the Surface Quality, Dimensional Accuracy, and Geometrical Precision of Direct Metal Laser Sintering (DMLS) Parts“, říj. 2018. [Citováno: 10.3.2021]
- [21] U. Ali *et al.*, „Identification and characterization of spatter particles and their effect on surface roughness, density and mechanical response of 17-4 PH stainless steel laser powder-bed fusion parts“, *Mater. Sci. Eng. A*, roč. 756, s. 98–107, kvě. 2019, [Online] [Citováno: 15.3.2021] doi: 10.1016/j.msea.2019.04.026.