

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program: N0715A270011 - Obrábění, aditivní  
technologie a zabezpečování kvality**

**Studijní specializace: Bez specializace**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Optimalizace chlazení dvoubřité frézy s využitím 3D tisku**

**Autor: Bc. Petr STEJSKAL**

**Vedoucí práce: Doc. Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

**Akademický rok 2020/2021**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr STEJSKAL**  
Osobní číslo: **S19N0217P**  
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**  
Studijní obor: **Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**  
Téma práce: **Optimalizace chlazení dvoubřité frézy s využitím 3D tisku**  
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh a realizace vlastních experimentů
4. Zhodnocení výsledků a doporučení
5. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. München: Hanser Publications, 2016. ISBN 9781569905821.
- GIBSON. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. 2nd edition. United States, 2015. ISBN 9781493921126.
- KUMAR, L. Jyothish. *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 2019. ISBN 9811303045.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění

Konzultanti diplomové práce: **Ing. Ivana Zetková, Ph.D.**  
Regionální technologický institut  
**Ing. Martin Nozar, Ph.D.**  
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

---

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

---

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

V Plzni dne 15. října 2020

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Miroslavu Zetkovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a za pomoc při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ivaně Zetkové Ph.D. a Ing. Martinu Nozarovi Ph.D. za konzultaci praktické části práce. Velké poděkování patří také celému týmu lidí z Regionálního technologického institutu při Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni, kde byly experimenty prováděny. V neposlední řadě bych rád poděkoval celé své rodině za to, že mi umožnila dostudovat vysokou školu a byla mi oporou po celou dobu mého studia.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Stejskal	<b>Jméno</b> Petr		
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	N0715A270011 - Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality			
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Doc. Ing. Zetek, Ph.D.		<b>Jméno</b> Miroslav	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KTO			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>		<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Optimalizace chlazení dvoubřité frézy s využitím 3D tisku			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	71	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	55	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	16
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	<p>Tato práce se zabývá návrhem procesních parametrů pro tisk kovového prášku oceli MS1 na slinutý karbid s cílem zajistit stabilní přívod procesní kapaliny k řezné části frézovacích nástrojů. Teoretická část je zaměřena na představení problematiky 3D tisku a seznámení s možnostmi chlazení fréz. V praktické části je popsán postup experimentů k získání požadovaných procesních parametrů a představeny návrhy chlazení frézy. Vybrané vzorky byly ověřeny metalografickou analýzou a tahovou zkouškou.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	<p>3D tisk, procesní parametry, chlazení fréz, aditivní výroba, slinutý karbid, MS1</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Stejskal	Name Petr		
<b>STUDY PROGRAMME</b>	N0715A270017 - Machining, additive technology and quality assurance			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav		
<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>	Optimization of the cooling of two bladed milling tool when 3D printing is used			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2021
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	71	<b>TEXT PART</b>	55	<b>GRAPHICAL PART</b>	16
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>The goal of this diploma thesis was to design process parameters for 3D printing powder material to sintered carbide and optimized cooling system of the milling tools. Theoretical part is focused on the introduction to the issue of 3D printing and getting acquainted with the cutter cooling possibilities. The practical part describes the procedure of experiments to obtain the required process parameters and present proposals for cooling options of the cutter. Selected samples were verified by metallographic analysis and tensile test.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>3D printing, process parameters, cooling of the milling tools, additive manufacturing, sintered carbide, MS1</p>

## Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků .....	11
Seznam tabulek .....	12
Seznam grafů.....	12
1 Úvod.....	13
1.1 Cíl práce.....	13
2 Rozbor současného stavu .....	14
2.1 Využití aditivní technologie .....	14
2.2 3D tisk.....	15
2.2.1 DMLS.....	16
2.2.2 SLM.....	17
2.2.3 LMD .....	17
2.2.4 Výhody a nevýhody 3D tisku.....	18
2.3 Slinutý karbid .....	19
2.3.1 Fyzikální vlastnosti .....	19
2.3.2 Mechanické vlastnosti .....	20
2.4 MS1 .....	20
2.5 Nastavení procesu 3D tisku .....	21
2.6 Současné trendy přívodu procesní kapaliny u rotačních nástrojů .....	26
2.6.1 Nízkotlaké chlazení .....	27
2.6.2 Vysokotlaké chlazení .....	28
2.6.3 Chlazení MQL.....	30
2.6.4 Chlazení CO <sub>2</sub> .....	30
3 Návrh a realizace vlastních experimentů .....	31
3.1 Použité zařízení.....	31
3.2 Použitý materiál.....	33
3.2.1 Ceratizit CTS20D.....	33
3.2.2 EOS martenzitická ocel MS1 .....	33
3.3 Příprava tisku.....	33
3.4 Průběh tisku .....	35
3.5 Monitorování průběhu tisku .....	36
3.5.1 EOSTATE Exposure OT.....	36
3.5.2 EOSTATE Powder Bed .....	37



3.6	Nastavení strategie tisku .....	38
3.7	Návrh procesních parametrů .....	39
3.8	Návrh vnitřního chlazení .....	56
4	Zhodnocení výsledků a doporučení .....	58
5	Závěr .....	61
	Seznam použitých zdrojů .....	63
	Seznam příloh .....	65

## Přehled použitých zkratk a symbolů

DMLS	direct metal laser sintering – technologie 3D tisku kovů
MS1	maraging steel – prášková nástrojová ocel třídy 19 určená pro 3D tisk
DED	directed energy deposition – řízená energetická depozice – metoda 3D tisku
PBF	powder bed fusion – tisk z práškového lože – metoda 3D tisku
STL	formát souboru
SLM	selective laser sintering – technologie 3D tisku kovů
LMD	laser metal deposition – laserové práškové navařování
CNC	počítačem řízený obráběcí stroj
WC	karbid wolframu
SK	slinutý karbid
WC-CO	slinuté karbidy skupiny K
CO	kobalt
TiC	karbid titanu
WC-TiC-CO	slinuté karbidy skupiny P
MQL	minimum quantity of lubrication – technologie minimálního množství maziva
3D	trojrozměrný prostor
VBD	vyměnitelná břitová destička
SW	software
CAM	computer aided manufacturing – Počítačová podpora obrábění
HRC	jedna ze zkoušek tvrdosti
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý

## Seznam obrázků

Obr. 1: Využití aditivní technologie v jednotlivých sektorech [26].....	14
Obr. 2: 3D tisk metodou DLMS [27] .....	16
Obr. 3: Laserové práškové navařování LMD [28] .....	17
Obr. 4: Oblast použitelných procesních parametrů [18] .....	22
Obr. 5: Nízké množství energie zanechává neroztavený materiál [18].....	22
Obr. 6: Velký efekt tzv. „klíčové dírky“, tvorba pórů [18] .....	23
Obr. 7: Dopad vzdálenosti šrafování na proces 3D tisku [18] .....	24
Obr. 8: Změna velikosti oblasti použitelných procesních parametrů v závislosti na tloušťce vrstvy [18] .....	25
Obr. 9: Matice kombinací výkonu laseru a skenovací rychlosti s hodnotou hustoty energie [20] .....	26
Obr. 10: Metody obrábění a jejich požadavky na mazání a chlazení [21] .....	27
Obr. 11: Nízkotlaké chlazení [29] .....	28
Obr. 12: Vrták s vnitřním chlazením [30] .....	29
Obr. 13: CoroMill 690 [31] .....	29
Obr. 14: Fréza s protiběžnými břity [17].....	29
Obr. 15: 3D tiskárna EOS M290 .....	31
Obr. 16: Broušení válečku z SK pomocí brusky ANCA MX7 .....	32
Obr. 17: Rozmístění vzorků na platformě .....	34
Obr. 18: Detail válečků rozdělených na dvě části .....	35
Obr. 19: Průběh tisku .....	36
Obr. 20: Pracovní prostředí EOSTATE Exposure OT .....	37
Obr. 21: Pracovní prostředí Powderbed Inspector .....	38
Obr. 22: a) vzor šachovnice, b) vzor pruhů, c) bez vzoru [38] .....	38
Obr. 23: Natočení v jednotlivých vrstvách o 67 stupňů a počet pruhů po natočení.....	39
Obr. 24: Válečky ze SK s natištěným materiálem MS1 .....	41
Obr. 25: Platforma s 24 vzorky po 2. experimentu .....	44
Obr. 26: Na levé straně SK po tisku, na pravé straně odtržené natisknuté části .....	44
Obr. 27: Vzorek číslo 3 .....	45
Obr. 28: Vzorky po 3. experimentu.....	47
Obr. 29: Uštípnuté vzorky .....	48
Obr. 30: Jednotlivé části které byly dotisknuty .....	48
Obr. 31: Problém strategie tisku v pruzích.....	49
Obr. 32: Detail přehřátých okrajů válečku .....	50

Obr. 33: Průběh tisku 3. experimentu z programu EOSTATE Powderbed .....	50
Obr. 34: Vznik trhlin ve slinutém karbidu .....	51
Obr. 35: Vznik pórů v tisknutém materiálu.....	52
Obr. 36: Tisk se strategií bez vzorů.....	54
Obr. 37: Vytisknuté válečky.....	55
Obr. 38: Detail jednoho natisknutého válečku .....	55
Obr. 39: Návrh vnitřního chlazení frézy .....	57
Obr. 40: Návrh chladících kanálek varianta 1 .....	57
Obr. 41: Návrh chladících kanálek varianta 2.....	58

## Seznam tabulek

Tab. 1: Shrnutí výhod a nevýhod 3D tisku.....	19
Tab. 2: Matice vlivu zvýšení vybraných procesních parametrů [19].....	25
Tab. 3: Parametry tiskárny EOS M290 .....	32
Tab. 4: Vlastnosti slinutého karbidu CTS20D .....	33
Tab. 5: Chemické složení martenzitické oceli EOS MS1 .....	33
Tab. 6: Návrh procesních parametrů pro 1. experiment.....	40
Tab. 7: Návrh procesních parametrů pro 2. experiment.....	41
Tab. 8: Výsledky 2. experimentu .....	42
Tab. 9: Návrh procesních parametrů pro 3. experiment.....	45
Tab. 10: Výsledky 3. experimentu .....	46
Tab. 11: Návrh procesních parametrů pro 4. experiment.....	53
Tab. 12: Procesní parametry natisknutých válečků v 5. experimentu.....	54

## Seznam grafů

Graf 1: Tahový diagram pro vzorek 3 .....	56
---	----

# 1 Úvod

V poslední době je 3D tisk na vzestupu, a to nejen ve strojírenství, ale i v dalších oborech jako je stavebnictví nebo zdravotnictví. Často se také lze setkat s termínem „3D tisk“, který se používá jako synonymum pro „aditivní výrobu“.

Aditivní výroba je proces, při kterém se nanášejí tenké vrstvy na sebe. Tím vzniká trojrozměrný objekt. Historie 3D tisku tak, jak ho známe nyní, sahá do 80. let minulého století. V této době však byly vytisknuté výrobky vhodné spíše jako rychlé prototypy. Až v posledních pár letech se přesnost, opakovatelnost a rozsah materiálů zvýšila tak, že tato technologie je vhodná pro průmyslové využití s tím, že může nahradit některé běžné technologie výroby. Pojem aditivní výroba zahrnuje mnoho metod tisku, kdy každá metoda má své výhody, ale i nevýhody, a tak je volena zejména podle druhu materiálu.

Tato diplomová práce se zabývá tiskem kovového prášku na jiný konvenčně vyráběný materiál. Využívá při tom jednu z metod 3D tisku, a to konkrétně metodu PBF (Powder Bed Fusion) technologií DMLS (Direct Metal Laser Sintering), při níž dochází k nanášení tenkých vrstev kovového prášku a následnému spečení pomocí laseru tak, že vznikne trojrozměrný objekt. Každý tisk vyžaduje důkladnou přípravu a také nastavení celého procesu 3D tisku. Ačkoliv v případě již probádaných oblastí tisku se to může zdát jako poměrně jednoduchá úloha, tak v případě zatím nevyzkoušených druhů materiálů se může jednat o velký a často neřešitelný problém. To je případ i této diplomové práce, kdy je prováděn tisk martenzitické vytvrditelné oceli s označením MS1 na základní materiál slinutého karbidu.

Mnoho výzkumů se zabývá samotným tiskem martenzitické oceli nebo slinutých karbidů. Lze dohledat také vědecké články o tisku obou těchto materiálů v různých poměrech. Avšak výzkum o tisku martenzitické oceli na základní materiál ze slinutého karbidu nejsou dostupné.

## 1.1 Cíl práce

Diplomová práce se zaměřuje na komplexní řešení daného problému skládající se z optimalizace procesních parametrů tisku pro rozhraní slinutého karbidu a oceli MS1 a návrhu konstrukce speciální frézy se systémem chlazení. Hlavním cílem této diplomové práce je tedy správné nastavení procesních parametrů 3D tisku tak, aby se na řeznou část frézy ze slinutého karbidu mohla natisknout upínací část z prášku martenzitické vytvrditelné oceli s označením MS1. Výsledkem práce by měly být nové procesní parametry tisku zajišťující reprodukovatelnost tisku rozhraní slinutý karbid a MS1 s dostatečnou pevností.

Dalším cílem práce je navržení chladicích kanálků v upínací části, respektive následné vhodné vyústění v řezné části nástroje za účelem zvýšení intenzity chlazení při obrábění těžkoobrobitelných materiálů na bázi Ni a Ti. Díky tomu dojde k významnému zlepšení procesu obrábění a zvýšení produktivity obrábění.

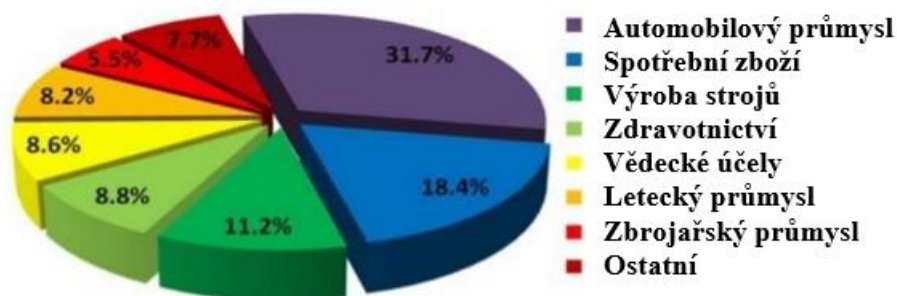
## 2 Rozbor současného stavu

Aby mohlo být dosaženo cílů této diplomové práce, je potřeba nejprve provést rozbor současného stavu. V této kapitole budou vysvětleny základní pojmy související s 3D tiskem, popsány základní materiály, jichž se týká výzkum, a představeny základní druhy chlazení rotačních nástrojů.

### 2.1 Využití aditivní technologie

3D tisk je v současnosti široce používán ve zdravotnictví, energetice, automobilovém nebo leteckém průmyslu. V tomto směru je zejména 3D tisk kovů nejrychleji rostoucím odvětvím. Nerezové oceli, hliník nebo slitiny titanu se většinou tisknou metodou fúze práškového lože PBF (Powder Bed Fusion) nebo DED (Directed Energy Deposition), což je způsob tisku, kde dochází k roztavení naneseného prášku pomocí laserového paprsku. Požadovaného tvaru se poté docílí fúzí taveniny do požadovaného tvaru.

#### Aditivní výroba v jednotlivých sektorech



Obr. 1: Využití aditivní technologie v jednotlivých sektorech [26]

Jedním z největších odvětví, kde se využívá 3D tisk, je, jak můžeme vidět i na obrázku 1, automobilový průmysl. Při výrobě každého automobilu se musí začít prototypem. Nejprve v malém měřítku, poté v reálné velikosti. Při tom aditivní výroba konstruktérům velmi výrazně pomáhá k vytvoření plně funkčního prototypu, a to bez dalších výrobních kroků. Jedním z největších průkopníků v automobilovém průmyslu je firma Rolls-Royce. Ta vyrábí několik tisíc různých 3D tištěných dílů pro své vozy. Při vývoji nového automobilu inženýři analyzují stovky dílů a testují, do jaké míry ve výroba pomocí aditivní výroby vhodná z hlediska hmotnosti, geometrie a také hospodárnosti v porovnání s běžnou výrobou. Držáky světlometů, designové vybavení interiéru a další jsou všechno díly vyrobené pomocí 3D tisku. Efektivnost nákladů a času společně s rychlostí a přesností jsou hlavními důvody, proč je tato technologie v tak velké míře populární. Využitelnost této technologie bude v příštích letech stále narůstat. [1]

Firmy zabývající se výrobou rezných nástrojů již pracují na vývoji jejich výroby pomocí aditivních technologií. Švédská firma Sandvik vytváří pomocí aditivní technologie diamantový

kompozit. I když se takto vyrobený diamant netřpytí, je vhodný pro průmyslové využití. Velkou výhodou takto vytvořeného velmi tvrdého materiálu je to, že je možné vytisknout velmi složité tvary. Rozdíl mezi takto vyrobeným, syntetickým a přírodním diamantem je ten, že materiál vyrobený aditivní technologií je kompozitního charakteru. Většina materiálu je diamant, ale kvůli zajištění tisknutelnosti a hustoty musí být smíšen ve velmi tvrdém matricovém materiálu. Díky tomu lze udržet nejdůležitější fyzikální vlastnosti čistého diamantu. [2]

Například lucemburská firma Ceratizit, která se zabývá výrobou nástrojů pro obrábění tvrdých materiálů, získala v roce 2020 ocenění za inovaci aditivní výroby karbidových dílů. Toto ocenění bylo uděleno za vývoj nového procesu aditivní výroby karbidu wolframu a kobaltu. Nové procesní parametry a technologie jsou chráněny patentem. [3]

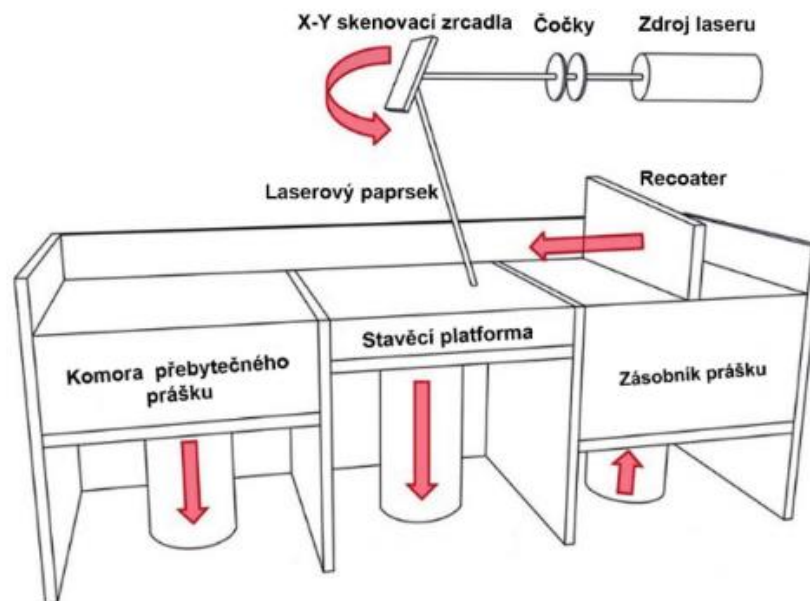
## 2.2 3D tisk

3D tisk, patřící do skupiny aditivních technologií, může být řešen různými metodami, jež jsou vždy založeny na podobném principu. Základem je digitální model ve formátu STL, který je tisknut postupným nanášením stavebního materiálu ve velmi tenkých vrstvách, jež se vzájemně spojují například tavením nebo lepením. Na rozdíl od běžných způsobů výroby, mezi něž řadíme například třískové obrábění, při nichž je materiál naopak odebírán, lze s pomocí 3D tisku vytvářet náročné tvary a konstrukce, které by nebylo možné, případně jen velmi obtížně vyrobit jiným způsobem. Jedná se o mladou technologii, jež byla představena na konci 20. století a která se neustále dynamicky vyvíjí. 3D tisk je pro poměrně rychlou přípravu výroby vhodný zejména pro kusové a malosériové využití. Hojně je proto využíván pro výrobu prototypů.

3D tisk z prášků můžeme rozdělit na dvě nejčastěji používané metody, a to Powder bed Fusion (PBF) a Directed energy deposition (DED), které se dále dělí na další metody. Rozdíl mezi těmito dvěma způsoby tisku je, že při PBF dochází k výstavbě požadovaného dílu vrstva po vrstvě, které jsou fúzovány pomocí laseru. Zatímco metoda DED využívá nanášení prášku, který je nejprve laserem roztaven a požadovaný tvar se docílí fúzováním do požadovaného tvaru. [4],[5],[6]

### 2.2.1 DMLS

Velmi častým způsobem tisku kovů je metoda DMLS. Na obrázku 2 je možné vidět, jak tisk pomocí DMLS funguje.



Obr. 2: 3D tisk metodou DLMS [27]

Metoda DLMS (Direct Metal Laser Sintering) umožňuje výrobu složitých a lehkých nástrojů, zkracuje dobu výroby speciálních nástrojů a umožňuje optimalizovat design chladicích kanálů pro chladicí kapalinu, což je u běžných metod výroby složité nebo nemožné. Díly jsou vytvářeny postupným nanášením tenkých vrstev práškového kovu, které se spékají laserovým paprskem. Tisk probíhá v inertní atmosféře, díky níž je možné deklarovat čistotu zpracovaného materiálu. Po ozáření laserem se práškový materiál zahřeje. Jak je možné vidět na obrázku 2, ze zásobníku je vytlačeno určité množství prášku. Pomocí recoateru s keramickým břitem je prášek rovnoměrně rozprostřen po platformě, čímž vytvoří požadovanou vrstvu prášku. Následně laser přejíždí po předem stanovené trajektorii. Tím je prášek nataven a dochází ke spékání vrstev. Po naskenování průřezu vrstvy se plošina sníží o tloušťku vrstvy, nanese se nová vrstva prášku a proces se opakuje, dokud není výrobek dokončen. Tloušťka vrstvy bývá zpravidla od 20  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$ . Materiál, který nebyl laserem ozářen, slouží k podpoře dalších vrstev. Po dokončení procesu se nepoužitý prášek proseje a lze ho znovu použít. [7]

I když metoda DMLS vypadá jednoduše, je nutné přesně nastavit parametry procesu tak, aby se zabránilo možným defektům jako jsou póry, mikrotrhliny, delaminace vrstev, deformace a degradace finálních vlastností vyráběného dílu. Je zapotřebí kontroly parametrů laseru. Práškový materiál, který je pod středem laserového paprsku, absorbuje více energie než materiál na okraji laserového paprsku. Tím může docházet k nerovnoměrnému tavení prášku. Pro správný a kvalitní tisk je potřeba vhodně nastavit jednotlivé proměnné jako jsou rychlost skenování, výkon laseru, vzdálenost šrafování a tloušťka vrstvy. Tyto proměnné mají vliv na konečné vlastnosti vyráběného produktu. Platí, že procesní parametry ovlivňují množství laserové energie dopadající na prášek. Nízký výkon laseru, vysokorychlostní skenování nebo velká tloušťka vrstvy mohou vést k nedostatku energie k natavení prášku. Naopak velká energie laseru může vést k odpařování práškového materiálu a způsobit vznik pórů v důsledku tvorby bublin. [7]



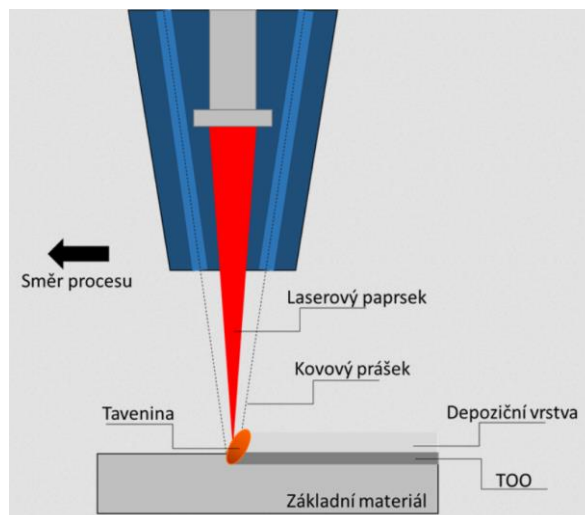
### 2.2.2 SLM

Technologie SLM (Selective Laser Melting) je velice podobná výše zmíněné metodě DLMS. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma způsoby tisku je, jak moc dochází k roztavení částic. U metody DMLS se částice zcela neroztaví. Materiály, které se například používají u technologie SLM, jsou kobalt, hliník, ocel, titan nebo slitiny niklu. Touto technologií se dají v současné době tisknout i slinuté karbidy.

Karbid wolframu je žáruvzdorný kov s vysokou teplotou tání a těžko vyrobitelný konvenčními způsoby. Je často vyráběn práškovou metalurgií lisováním a slinováním. Díky neustálému vývoji lze nyní slinuté karbidy tisknout na 3D tiskárnách. Praskliny a póry jsou jeden z nejčastějších problémů při tisku tohoto materiálu. Trhliny se tvoří kvůli odpařování pojiva a tvorbě zbytkových napětí. Póry se vytvářejí v souvislosti s odpařováním pojiva a špatným rozložením prášku. Pórovitost lze snížit úpravou tloušťky vrstvy. Velikost a tvar práškových granulí také přispívají k hustotě konečného produktu. Mikrostruktura dílů ze slinutého karbidu je důležitá pro dosažení mechanických vlastností. Na mikrostrukturu má velký vliv rychlost skenování. Interakcí výkonu laseru mezi spodní a sousední vrstvou dochází k opakovanému ohřevu vrstev. Opětovné zahřívání a ochlazování vrstev, může vést k růstu zrn, tím ke zhoršení mikrostruktury a mechanických vlastností finálního dílu. [8],[9],[24],[25]

### 2.2.3 LMD

Jednou z metod aditivní technologie je laserové práškové navařování, které umožňuje laserové nanášení kovů. Často se můžeme setkat s anglickým názvem pro tuto metodu, a to Laser Metal Deposition (LMD).



Obr. 3: Laserové práškové navařování LMD [28]

Tato metoda funguje tím způsobem, že laserový paprsek lokálně zahřeje navařovaný díl a vytvoří tak tavnou lázeň. Na rozdíl od metody SLM, kde je kovový prášek rovnoměrně rozprostřen a následně roztaven. Naopak u laserového navařování je z trysky do vytvořené lázně přiváděn kovový prášek. Ten se v tavné lázni roztaví, čímž vznikne vrstva 0,2 až 1 mm silná. Na takovou vrstvu se v případě potřeby může navařit další vrstva. Celý tento proces probíhá v ochranné atmosféře s plynem. Jako plyn se nejčastěji používá argon. V porovnání s metodou SLM tento způsob tisku vyniká rychlostí. Může být použit k lokální opravě nebo

k výrobě celého dílu. Umožňuje také výrobu vysoce přesných součástí. Tato metoda má široké uplatnění v různých oborech jako je letectví, energetika, automobilový nebo lékařský průmysl. LMD je obzvláště výhodné pro malé a středně velké součásti. Jedním z problémů je, že u součástí vyrobených metodou LMD je velmi těžké předpovědět vlastnosti, protože je při výrobě zahrnuto mnoho procesních proměnných. Co se týká mikrostruktury u dílů vyráběných metodou LMD, ta závisí na teplotních gradientech a rychlostech ochlazování a také na opětovných ohřevech materiálu. Rychlost ochlazování bývá vysoká z důvodu velmi malé plochy, kterou laserový paprsek zahřívá, zpravidla také kvůli vysoké vodivosti používaných materiálů. To vše vede k tomu, že výsledkem bývají malé zóny ovlivněné teplem a též jemnější mikrostruktury v porovnání s konvenčně vyráběnými součástmi. Rychlost ochlazování je ovlivněna teplem dodávaným laserem, které závisí na jeho výkonu, rychlosti posuvu laserového paprsku a rychlosti dodávání prášku do lázně. Nižší výkon laseru a vyšší rychlost posuvu laserového paprsku způsobuje nižší přívod tepla, tím také rychlejší ochlazení. Naopak při vyšším výkonu a snížení posuvu dochází k vyššímu přívodu tepla a zahřátí většího množství substrátu který následně déle chladne. Mechanické vlastnosti takto vyráběných dílů jsou přinejmenším stejně dobré jako u konvenčně vyráběných součástí. Díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem je často používána v aditivní výrobě ocel s označením MS1.

Výhoda této metody spočívá v tom, že díky malému tepelnému přívodu vzniká malá tepelně ovlivněná oblast. Také dokáže vytvořit jemnou mikrostrukturu. Nabízí z hlediska nákladů efektivní opravy součástí nebo výrobu nových dílů a má vysokou adhezi navařovaných materiálů. Naopak vzhledem k ceně speciálních práškových surovin a laserových zařízení s ochranou atmosférou se jedná o nákladnou metodu, která má uplatnění většinou jen u oborů s aplikacemi s vysokou přidanou hodnotou, kam patří například letecký průmysl nebo zdravotnictví. [10], [11], [12]

#### **2.2.4 Výhody a nevýhody 3D tisku**

Jednou z největších výhod 3D tisku je rychlost u kusové malosériové výroby nebo při výrobě prototypů, jejichž výroba v minulosti trvala dlouho. Příchodem této stále poměrně nové technologie se výroba velmi zrychlila. S tím také souvisí snižování nákladů. Zatímco dříve se k výrobě prototypů používaly CNC stroje na obrábění a vstřikování, nyní lze tuto výrobu nahradit na 3D tiskárně. Díky tomu není potřeba mít tolik pracovníků, čímž lze snížit náklady. Další výhodou je menší produkce odpadu ve srovnání s konvenčními obráběcími technologiemi. Nevyužitý prášek při tisku se znovu zpracuje a může být opakovaně použit. Tím mohou společnosti ušetřit spoustu peněz. Mezi výhody musíme rozhodně zařadit také flexibilitu vyráběných součástí. Můžeme prakticky vyrábět součásti jakéhokoliv tvaru. Maximální velikost tisknutého dílu je závislá na velikosti pracovní komory tiskárny. Na tiskárně lze vyrobit tvary, jež by běžným způsobem výroby byly velice těžko nebo dokonce nevyrobitelné. Co se týká materiálů, lze na 3D tiskárně vytvořit nové se strukturami a vlastnostmi, jaké konvenčně vyráběné materiály nenabízí. [13]

Tak jako má 3D tisk spoustu výhod, má samozřejmě i své nevýhody. Primárně jsou to vysoké náklady na tuto technologii, které odporují trendu maximální hospodárnosti. Pořizovací cena tiskáren pro tisk kovů je velmi vysoká a v kombinaci s drahým materiálem pro tisk je tato technologie stále poměrně drahou záležitostí. Navíc zařízení pro aditivní výrobu jsou velmi energeticky náročné, proto se hodí spíše pro malosériovou nebo kusovou výrobu. V současnosti se objevuje stále více případů, kdy je 3D tisk zneužit k výrobě zbraní, výbušnin, nožů a dalších nebezpečných předmětů. Díky výrobě bez použití kovových částic navíc lze snadno projít bezpečnostními kontrolami, aniž by byl odhalen nějaký takto nebezpečný předmět. Mezi nevýhody je potřeba zařadit také omezené rozměry tisknutých dílů v závislosti na velikosti

tiskárny. Současně s tím, že na 3D tiskárně se dají vytvořit nové materiály, mnoho běžně vyráběných materiálů nelze na tiskárně vytisknout. V tabulce 1 jsou shrnuty výhody a nevýhody 3D tisku. [14],[12]

Tab. 1: Shrnutí výhod a nevýhod 3D tisku

Výhody 3D tisku	Nevýhody 3D tisku
Méně spotřebovaného materiálu	Poměrně drahá technologie
Flexibilita součástí	Většinou nutnost dodatečného opracování
Výroba tvarově složitých součástí	Energeticky náročná technologie
Zjednodušení výroby	Omezená velikost tisknutých dílů

## 2.3 Slinutý karbid

Karbid wolframu (WC-Co) je žáruvzdorný kov s vysokou teplotou tání kolem 2 900 °C. Je obtížně vyrobitelný konvenčními způsoby, proto je vyráběn práškovou metalurgií. V současnosti už lze také produkovat karbid wolframu pomocí aditivní technologie 3D tisku. Tato možnost se často využívá proto, že při slinování jsou díly omezené geometrickou složitostí. Aditivní výroba karbidu wolframu často snižuje dobu výroby a lze jejím prostřednictvím optimalizovat například chladicí kanálky pro chladicí kapalinu. K tomu, abychom mohli správně nastavit tisk, je zapotřebí znát fyzikální a mechanické vlastnosti slinutých karbidů. [4],[5]

### 2.3.1 Fyzikální vlastnosti

#### 2.3.1.1 Měrná hmotnost

Je nejjednodušším kritériem k určení vlastností. Velikost měrné hmotnosti je závislá na obsahu strukturních složek a pojiva. Měrná hmotnost slinutých karbidů (dále jen SK) typu WC-Co je poměrně vysoká (až 15,2 g\*cm<sup>-3</sup>) a je dána vysokou měrnou hmotností karbidu wolframu. S rostoucím množstvím pojiva se měrná hmotnost snižuje. Skutečná měrná hmotnost je odlišná od teoretické, což je dáno zbytkovou pórovitostí slinutého karbidu. Stanovuje se pomocí vah nebo dvojího vážení. [4],[5]

#### 2.3.1.2 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost u SK s obsahem Co do 30 % je jen málo závislá na jeho obsahu a pohybuje se v rozmezí 50—105 W\*m<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup>. Pokud pojivová fáze, kromě kobaltu, obsahuje i nikl, hodnoty tepelné vodivosti klesají. Hodnota tepelné vodivosti s rostoucí teplotou klesá, vyšší hodnoty mají materiály s hrubším zrnem. Čím je tepelná vodivost nižší, tím menší je tepelné zatížení nástroje. Toto teplo přechází do obrobku. Na druhou stranu nižší tepelná vodivost snižuje odolnost proti teplotním šokům. Měření tepelné vodivosti probíhá tak, že se měří čas, za jak dlouho projde teplo zkušebním vzorkem. Tento čas se pak porovnává s etalonem. Slinuté karbidy obsahující TiC mají nižší tepelnou vodivost než slinuté karbidy typu WC-Co. [4],[5]

#### 2.3.1.3 Součinitel tepelné roztažnosti

Součinitel tepelné roztažnosti závisí na obsahu kobaltu a s jeho rostoucím obsahem se hodnota součinitele zvětšuje, je však nižší než u ocelí. [4]

### **2.3.1.4 Absorpce energie**

Kovový prášek pro 3D tisk umožňuje absorbovat energii laserového paprsku. Průnik vrstvou prášku závisí na několika faktorech, a to například na vlnové délce laserového paprsku, na poměru prášků WC a Co, na velikosti a tvaru částic prášku a jiných. Tyto faktory také ovlivňují vlastnosti tisknutého slinutého karbidu, jako jsou pórovitost a korozní odolnost materiálu. Absorbovaná energie je závislá na tloušťce práškové směsi WC-Co. Energie je absorbována do určité hloubky od povrchu práškové vrstvy. Vysoká koncentrace bývá zpravidla v blízkosti povrchu. [4],[5]

## **2.3.2 Mechanické vlastnosti**

### **2.3.2.1 Tvrdost**

Tvrdost u slinutých karbidů typu WC-Co nejvíce ovlivňuje obsah pojiva (kobaltu) a velikost zrna, přičemž platí, že nejvyšší tvrdosti dosahují jemnozrnné materiály s nízkým obsahem Co. Naopak s rostoucí teplotou tvrdost velmi rychle klesá. To je způsobeno vlivem pojiva, které má vždy nižší bod tavení než karbidická fáze (Co má bod tavení asi 1 500 °C, bod tavení WC je asi 2 600 °C). Pokud je struktura jemnozrnná, pokles tvrdosti s narůstající teplotou není tak velký a slinuté karbidy si zachovávají tvrdost až do 900 °C. Tvrdost slinutých karbidů typu WC-Co se pohybuje až do 1 850 HV, v případě slinutých karbidů WC-TiC-Co se tvrdost pohybuje v rozmezí 1 300 až 1 900 HV. [15,16]

### **2.3.2.2 Pevnost v ohybu**

Pevnost v ohybu roste u slinutých karbidů typu WC-Co s rostoucím obsahem kobaltu. Se zvyšujícím se obsahem kobaltu se nelineárně zvyšuje i pevnost v ohybu, která při obsahu Co kolem 15 % dosahuje svého maxima a pak s přibývajícím Co klesá. Pevnost v ohybu s rostoucí teplotou klesá. Pohybuje se v rozmezí 2 000–4 700 MPa. Slinuté karbidy s obsahem TiC mají nižší ohybovou pevnost než slinuté karbidy typu WC-Co. [15,16]

### **2.3.2.3 Pevnost v tahu a tlaku**

Pevnost v tahu lze zjišťovat u SK velmi obtížně, protože se vyznačují nízkou tažností a vysokou křehkostí. Je uváděno, že pevnost v tahu je zhruba poloviční než pevnost v ohybu. Mez pevnosti v tahu klesá s rostoucím obsahem kobaltu a TiC.

Pevnost v tlaku je u slinutých karbidů typu WC-Co vysoká, závisí na obsahu pojiva a velikosti zrn karbidické fáze. Pevnost klesá s rostoucím obsahem Co a rostoucí teplotou. Naopak materiály s jemnozrnnou strukturou vykazují vyšší pevnost v tlaku. [15,16]

### **2.3.2.4 Lomová houževnatost**

Lomová houževnatost určuje množství napětí potřebného k vytvoření vad v materiálu. U SK typu WC-Co s rostoucím obsahem kobaltu a velikostí zrna WC roste i lomová houževnatost. Trhliny se šíří po hranicích zrn a pojiva. U SK typu WC-TiC-Co se šíří trhliny zejména v karbidické fázi. [15,16]

## **2.4 MS1**

MS1, kterou můžeme také znát pod evropským označením 1.2709 anebo německým X3NiCoMoTi 18-9-5, je vysokopevnostní ocel známá svou vysokou pevností, lomovou houževnatostí, dobrou svařitelností a rozměrovou stabilitou během stárnutí. Jedná se o stále častěji používaný materiál pro 3D tisk. Díky kombinaci již zmíněných vlastností, se

vysokopevnostní oceli stále častěji využívají při 3D tisku v takových aplikacích, jako jsou výkonné průmyslové a strojní díly, formy na vstřikování plastů, raketové motory v leteckém průmyslu, v automobilovém průmyslu a dalších. Součásti z vysokopevnostní oceli vyrobené aditivní technologií lze dobře dodatečně vytvrdit. Používají se často jako součásti pro dynamické zatížení. [24], [7]

## 2.5 Nastavení procesu 3D tisku

Pro kvalitní tisk je důležité zvládnutí několika fyzikálních jevů, které jsou důležité pro správné zvládnutí 3D tisku. Generování, přenos a rozvod tepla, dále pak vývoj mikrostruktury jako je pórovitost a fázové přeměny a v neposlední řadě mechanické problémy, jako jsou nerovnoměrné rozložení tepelných deformací během ochlazování, které způsobují pnutí a deformace.

Tepelný proces lze shrnout do čtyř hlavních fází:

Příkon a absorpce energie

Ohřev práškového lože

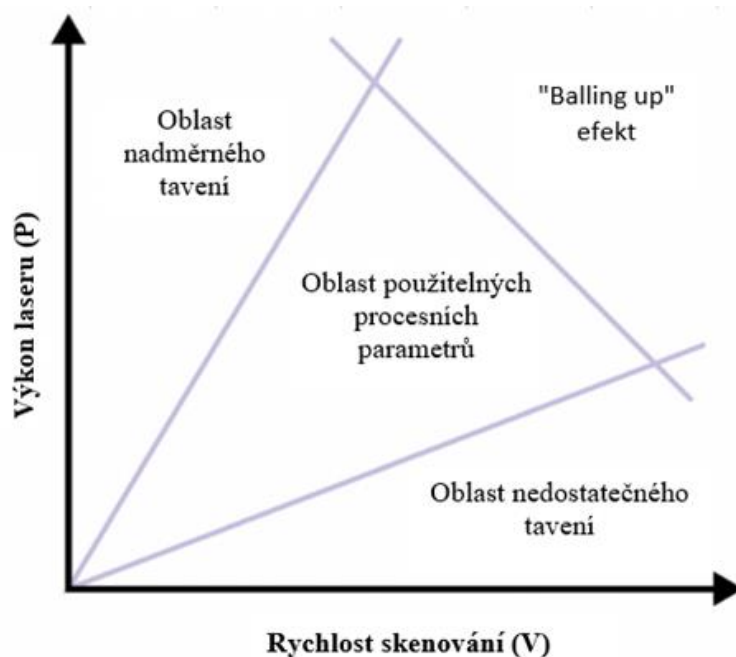
Tavení a slinování pojiva

Chlazení slinutého vzorku

Návrh procesních parametrů pro 3D tisk materiálu MS1 na váleček ze slinutého karbidu je velice složitý. Zahrnuje spoustu proměnných, které je potřeba vhodně zvolit tak, aby byl proces výhodný z hlediska funkčnosti tisknutého kusu, ale i z pohledu časové náročnosti a ekonomické efektivity. Existuje spousta omezujících parametrů ovlivňujících kvalitu produktu a mechanických vlastností a to například výkon laseru, rychlost skenování, velikost laserového bodu, vzdálenost šrafování, orientace tisku, tloušťka vrstvy, typ laseru a další. Velmi důležité jsou mechanické vlastnosti mezi směrem přírůstku vrstvy (z) a rovinou stavební plochy (x a y), které vyplývají z principu technologie, kde je prášek tisknut vrstvu po vrstvě.

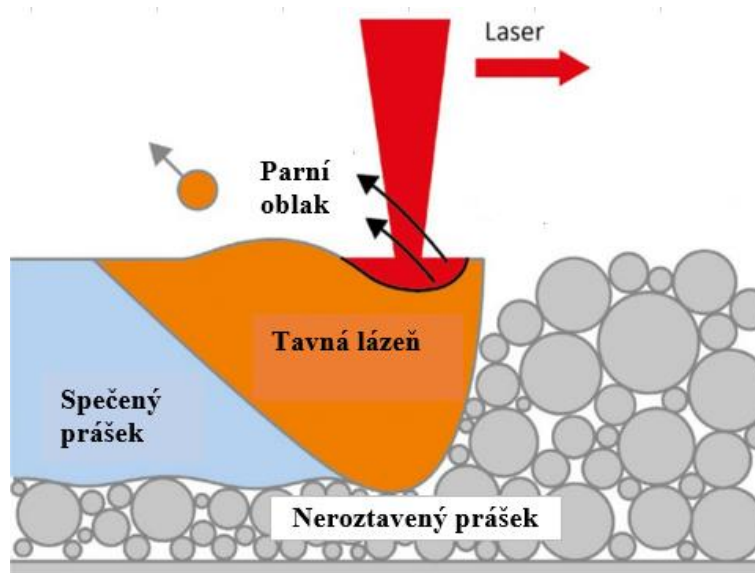
Ve srovnání s polymerními prášky jsou ty kovové značně náchylné ke kontaminaci, protože jsou velmi reaktivní na vlhkost. Kromě procesních parametrů hrají důležitou roli také vlastnosti jako čistota, morfologie a velikost kovových prášků. Velikost částic prášku ovlivňuje účinnost tavení. Platí, že prášky s většími částicemi potřebují k tavení více energie.

Při volení parametrů tisku existuje několik nástrojů, které mohou pomoci k nastavení procesních parametrů. K definování oblasti použitelných procesních parametrů může pomoci graf na obrázku 4, který znázorňuje závislost výkonu laseru na rychlosti skenování.



Obr. 4: Oblast použitelných procesních parametrů [18]

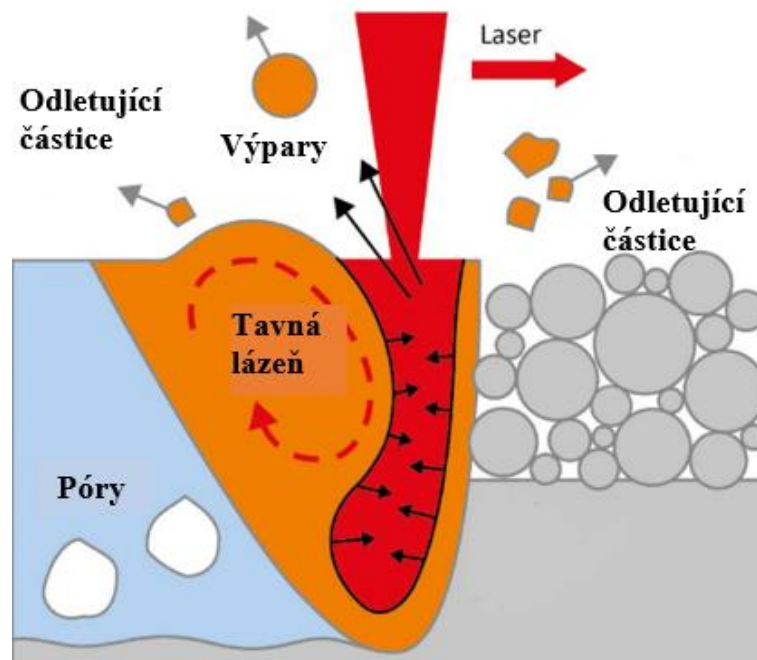
Na obrázku 4 můžeme vidět, že při zvolení příliš malého výkonu laseru spolu s vysokou skenovací rychlostí dosáhneme oblasti, kde se materiál zcela neroztaví, což vede k nedostatečné fúzi. Výsledkem toho je materiál o vysoké pórovitosti. Druhým příkladem je opačná volba parametrů, a to vysoký výkon laseru při nízké rychlosti skenování, což může vést k přehřívání materiálu a efektu tzv. „klíčové dírky“. Mezi těmito dvěma oblastmi leží okno použitelných procesních parametrů, kde je dosaženo dobré hustoty materiálu. V této oblasti je dostatek energie k roztavení kovu, ale laser neprostoupí příliš hluboko. Na obrázku 5 můžeme vidět případ nedostatečného množství energie.[18]



Obr. 5: Nízké množství energie zanechává neroztavený materiál [18]

Pokud je použito malé množství energie, laserový paprsek nepronikne dostatečně hluboko do té míry, aby byl schopen roztavit vrstvu prášku. Dochází ke vzniku neroztavené vrstvy, která

způsobuje pórovitost a může také dokonce dojít k delaminaci vrstev, jak je zobrazeno na obrázku 6.



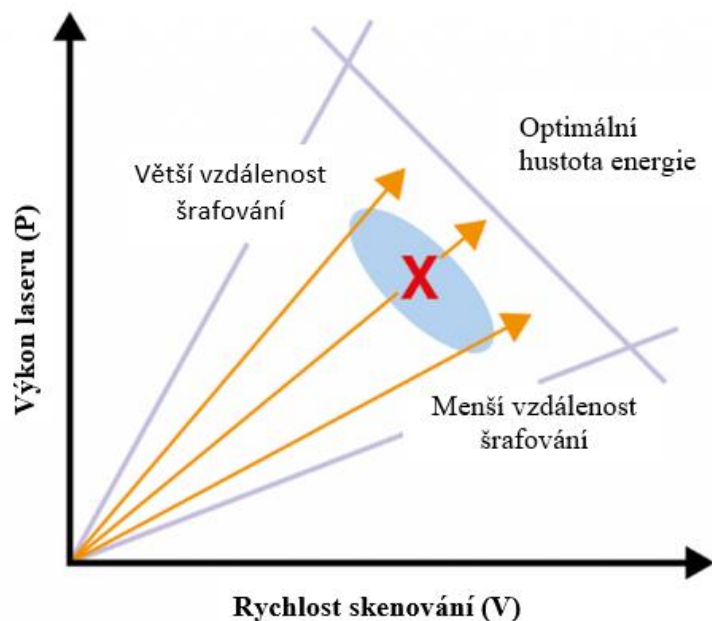
Obr. 6: Velký efekt tzv. „klíčové dírky“, tvorba pórů [18]

Vnitřní odrazy laserové energie zachycují více tepla hluboko v materiálu, což vede k hlubšímu tavnému bazénu. To zvýší turbulenci taveniny a dochází k odletování částic do okolí.

Doposud jsme si představovali parametry ovlivňující proces tavení. Velice důležitou částí je proces tuhnutí. Ten totiž určuje mikrostrukturu a tím i konečné vlastnosti materiálu. Chlazení bývá nejrychlejší tam, kde dochází k úniku tepla, a většina tepla je odváděna do okolního pevného kovu. Relativně málo tepla odchází přes ještě neroztavený prášek. Doba a rychlost ochlazování je důležitá, protože tavenina, která se ochladí pomaleji, vytvoří hrubší mikrostrukturu s většími zrny. Naopak menší oblasti taveniny se ochladí rychleji a následně vznikne jemnější mikrostruktura.

Pokud se najde vhodná kombinace rychlosti a výkonu, která vytvoří směs taveniny s optimální hloubkou, šířkou a dobou trvání, to znamená dodání optimální množství energie, v tom případě získáme materiál s nízkou pórovitostí a mikrostrukturou.

Důležitá je i správná rozteč šrafování. Velká rozteč způsobuje nesprávné tavení práškového lože, protože dojde ke snížení překrytí vrstvy. V tomto případě mohou vzniknout póry a separační zóny, což jsou prostory mezi sousedními skenovacími stopami, pokud je rozteč větší než průměr bodu. To má za následek snížení relativní hustoty. [18]



Obr. 7: Dopad vzdálenosti šrafování na proces 3D tisku [18]

Na obrázku 7 můžeme vidět tři oranžové šipky, které mají optimální hustotu energie. Pokud zvolíme vyšší energii laseru, k nižší rychlosti skenování dostaneme strmější šipku. Hustotu energie můžeme udržovat konstantní za pomoci zvětšení vzdálenosti šrafování. Bod X znázorňuje ideální bod, protože většina energie laserového paprsku je absorbována uvnitř laserového bodu uvnitř stopy taveniny.

Nyní jsme si představili všechny parametry pro výpočet celkové absorbované energie. Ta se také někdy nazývá objemová energetická hustota. Tato hodnota je orientačním ukazatelem laserem dodávané energie při sinteringu, nikoliv ale skutečná hodnota absorbované energie.

Celková absorbovaná energie se vypočítá z následujícího vzorce:

$$E = \frac{P}{v * h * l}$$

kde: E – celková absorbovaná energie [J/mm<sup>3</sup>]

P – výkon laseru [W]

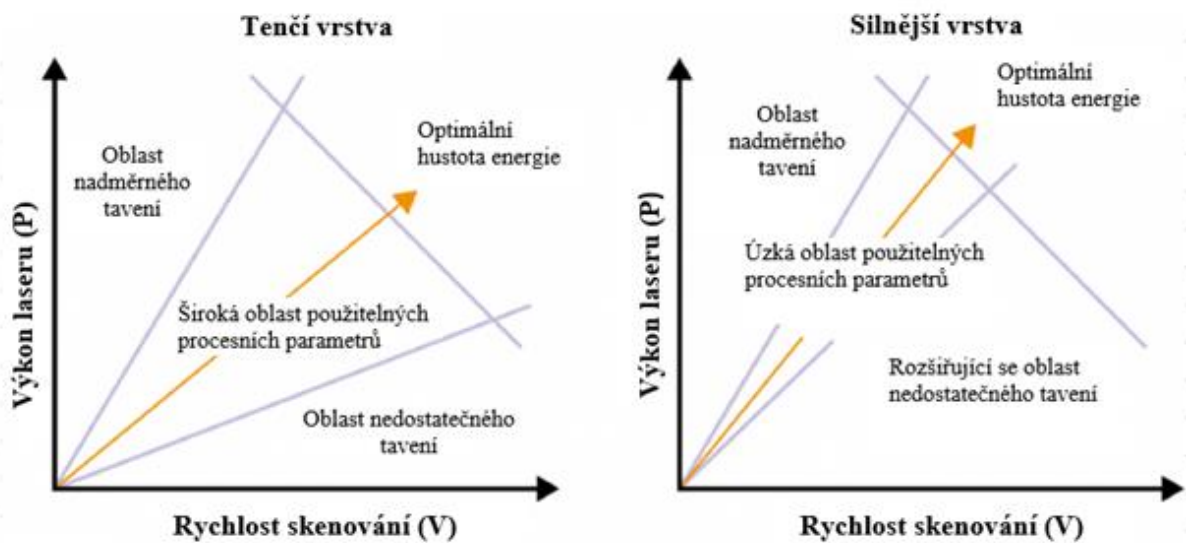
v – skenovací rychlost [mm/s]

h – rozestup mezi stopami [mm]

l – tloušťka vrstvy [mm]

Dalším důležitým parametrem je tloušťka vrstvy. Je jasné, že pokud zvýšíme tloušťku vrstvy, musíme také změnit ostatní parametry, aby došlo k hlubšímu proniknutí laserové energie, a to tak, aby byla zajištěna dostatečná fúze se spodní vrstvou. Jak je vidět na obrázku 9, zvyšující se tloušťka vrstvy zmenšuje oblast použitelných procesních parametrů.





Obr. 8: Změna velikosti oblasti použitelných procesních parametrů v závislosti na tloušťce vrstvy [18]

Při tisku je snaha se držet uprostřed této oblasti, protože ne vždy je dosaženo stejných tepelných podmínek, a to v závislosti na geometrii součásti a vlastnostech materiálu. Výběr správných parametrů je zásadní pro úspěšný tisk. Protože každý prášek absorbuje laserovou energii, přenáší teplo a tuhne různými způsoby, musí být parametry upraveny speciálně pro prášek, který tavíme. Dokonce i pro jednu součást jsou parametry tisku upravovány pro různé oblasti k dosažení optimální kvality. [18]

V tabulce 2 můžeme vidět vliv zvýšení vybraných procesních parametrů na tisk. Tyto čtyři parametry byly vybrány z toho důvodu, že se jedná o nejčastěji upravované parametry při tisku. V tabulce je pomocí šipek zobrazeno zvýšení, snížení anebo žádný účinek při zvýšení procesního parametru. Barvy jako červená, zelená nebo žlutá označují, zda se jedná o negativní, pozitivní nebo neutrální vliv. Tam, kde nebyly k dispozici žádné výsledky ani žádná literatura, je uveden otazník. [19]

Tab. 2: Matice vlivu zvýšení vybraných procesních parametrů [19]

	Síla podpory	Síla součásti	Drsnost povrchu	Spotřeba materiálu	Čas tisku
Výkon laseru	↑	↑	↓	↗	→
Skenovací rychlost	↓	↓	↑	→	↓
Tloušťka vrstvy	→	→	↑	?	↓
Vzdálenost šrafování	↗	↗	↗	?	↘
Předehřev platformy	↗	↗	↘	?	?

Nozar, Zetková a kol. (2018) provedli výzkum se 118 vzorky, na nichž zkoumali různé kombinace výkonu laseru a skenovací rychlosti vysokopevnostní martenzitické oceli MS1, a to při konstantní tloušťce vrstvy a vzdálenosti šrafování. Na obrázku 9 můžeme vidět matici kombinací výkonu laseru a skenovací rychlosti s hodnotou hustoty energie. Po vytisknutí byly vzorky s použitelnými parametry podrobeny zkoumání na mikroskopu. Díky tomu mohla být sestavena matice, jež přesně ukazuje, jaké procesní parametry jsou vhodné a které nikoli. Červená pole s přeškrtnutými hodnotami nebyla vůbec tisknuta z důvodu příliš vysoké hustoty energie. Zbylá červená pole způsobila přehřívání a v průběhu tisku musel být s takovými procesními parametry zastaven. Modře vybarvená pole měla naopak příliš malou energii a nedošlo u nich vůbec k sinteraci prášku během tisku. Tečkovaná a šrafovaná pole znamenají neuspokojivé výsledky tisku. Nejvhodnějšími parametry pro tisk MS1 při zvolených konstantních parametrech jsou bílá pole.[20]

350	438	292	194	146	109	88	58	44	36	31	27
305	381	254	169	127	95	76	51	38	32	27	24
250	313	208	139	104	78	63	42	31	26	22	20
195	244	163	108	81	61	49	33	24	20	17	15
150	188	125	83	63	47	38	25	19	16	13	12
138	173	115	77	58	43	35	23	17	14	12	11
100	125	83	56	42	31	25	17	13	10	9	8
80	100	67	44	33	25	20	13	10	8	7	6
50	63	42	28	21	16	13	8	6	5	4	4
35	44	29	19	15	11	9	6	4	4	3	3
20	25	17	11	8	6	5	3	3	2	2	2
	200	300	450	600	800	1000	1500	2000	2400	2800	3200

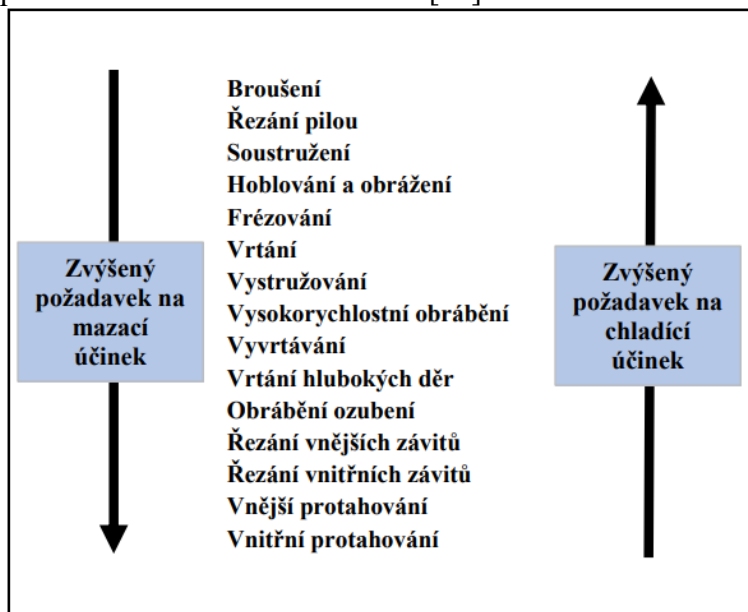
V [mm/s]

Obr. 9: Matice kombinací výkonu laseru a skenovací rychlosti s hodnotou hustoty energie [20]

## 2.6 Současné trendy přívodu procesní kapaliny u rotačních nástrojů

Stejně jako ve všech oblastech strojírenství i v oblasti přívodu chladicí kapaliny dochází k postupnému vývoji. Velká pozornost je v současné době věnována ekologii. Z tohoto důvodu je snaha co nejvíce snížit množství používané procesní kapaliny a celý proces zefektivnit. Současné moderní rezné nástroje s vnitřním přívodem procesní kapaliny se používají ke zlepšení chlazení nástrojů a k lepšímu odvodu třísek z místa řezu.

Procesní kapaliny můžeme rozdělovat podle různých kritérií. Podle jejich účinku na proces řezání je můžeme rozdělit na dvě skupiny. Kapaliny s převažujícím chladicím účinkem a na kapaliny s převažujícím mazacím účinkem. Na obrázku 10 můžeme vidět jednotlivé metody obrábění a jejich požadavek na mazání a chlazení. [21]



Obr. 10: Metody obrábění a jejich požadavky na mazání a chlazení [21]

Jako kapaliny s mazacím účinkem, kde je požadována vysoká kvalita obráběného povrchu, se používají oleje mísitelné s vodou. Naopak tam, kde je požadován efekt chlazení, se používají emulze obsahující minerální oleje nebo řešení na bázi mýdla. Procesní kapaliny mají při obrábění především chladicí, mazací a čisticí účinek. Chladicí účinek snižuje teplotu v místě řezu, mazací účinek snižuje tření a čisticí účinek má za úkol odstraňovat třísky z místa řezu. Prívod chladicí kapaliny také pomáhá k lepší tvorbě a lámání třísek.

Při procesu řezání se až 97 % mechanické energie na tvorbu třísky přemění na teplo. To je potřeba odvádět, a proto se používají procesní kapaliny. Ty zvyšují produktivitu a trvanlivost nástroje.

Řezné oleje a emulze pro obrábění kovů se stále vyvíjí. Často dochází ke styku s obsluhou nebo úniku do okolí, proto jsou hygienické a bezpečnostní předpisy čím dál tím víc regulovány. Velký důraz je také kladen na ekologičnost. Díky tomu dochází ke změnám složení řezných kapalin.

V současné době můžeme pozorovat nové způsoby chlazení jako například tlakové, MQL, CO<sub>2</sub>, vnitřní chlazení nebo podchlazování procesní kapaliny. Cílem těchto způsobů chlazení je zvýšení chladicího a mazacího účinku. [22] [23]

### 2.6.1 Nízkotlaké chlazení

Spočívá v přívodu chladicí kapaliny standardním potrubím dodávaným s obráběcím strojem. Zařízení se skládá z nádrže, čerpadla a potrubí. Množství kapaliny dodávané k místu řezu je dáno výkonem čerpadla a potrubím. Při nízkotlakém chlazení dochází při vysokých teplotách v místě řezu k tomu, že chladicí kapalina se mění v páru a brání tak v přísunu nové. Dalším problémem bývá neefektivní využití kapaliny, kvůli špatně nastavenému kanálu chlazení. Nízkotlaké chlazení má i další nevýhody, a to například: vznik přehřáté páry a tím zamezení dalšího přísunu kapaliny do místa řezu, špatné mazání, chlazení nepronikne až ke špičce

nástroje, může docházet ke zpětnému nalétávání třísek na hranu nástroje a tím způsobit jeho poškození nebo poškození obrobku. Naopak výhodou je, že není třeba dalších investic. Na obrázku 11 je vidět klasický příklad nízkotlakého chlazení při frézování. [22]



Obr. 11: Nízkotlaké chlazení [29]

## 2.6.2 Vysokotlaké chlazení

Jedním z nejvíce používaných způsobů chlazení je vysokotlaké chlazení. U rotačních nástrojů bývá přívod chladicí kapaliny řešen skrz vřeteno a nástroj pomocí chladicích kanálků přímo do místa řezu.

Na rozdíl od nízkotlakého, vysokotlaké chlazení eliminuje problém tvorby páry. Velký objem přesně zamířené kapaliny do místa řezu zajistí odvod tepla z místa řezu, dostatečné mazání a odstranění třísek a zabrání vzniku páry. Je potřeba při tomto způsobu chlazení správně nastavit množství chladicí kapaliny tak, aby byla efektivně využita a zbytečně nezaplavovala místo řezu. Taková kapalina je zbytečná a zvyšuje náklady na filtraci, navíc zbytečně zatěžuje čerpadlo. Při použití vysokotlakého chlazení nastává otázka, zda je výhodnější použití vysokotlakého chlazení s konstantním průtokem, anebo chlazení s proměnlivým průtokem kapaliny. Výhodou proměnlivého průtoku je úspora chladicí kapaliny, která není přiváděna do místa řezu. Pomocí ventilu je nastaven maximální průtok s ohledem na aktuálně prováděnou operaci a používaný nástroj. Následně přebytečná kapalina odtéká pryč. Tím je proces energeticky méně náročný. Mezi výhody tohoto typu chlazení patří možnost zvýšení rezné rychlosti a posuvu, zvýšení trvanlivosti rezného nástroje nebo usnadnění lámání třísek. Mezi nevýhody můžeme zařadit vyšší pořizovací náklady a vyšší spotřebu elektrické energie. [22],[23]

### 2.6.2.1 Vnitřní chlazení

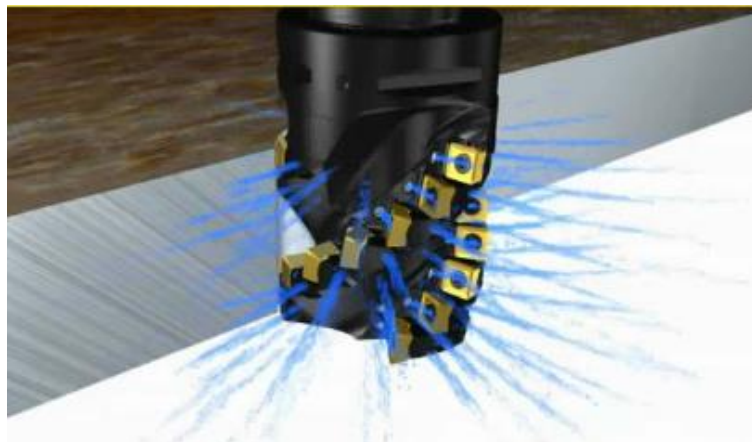
Vnitřní chlazení je metodou, která také přináší zvýšení výkonu obrábění. U rotačních nástrojů, například vrtáků, je chlazení upraveno tak, že kapalina je přiváděna centrálními otvory až do místa řezu. Tento způsob chlazení je využíván při vrtání hlubokých děr a při vrtání těžko obrobitelných materiálů. To umožňuje nejen dobré chlazení, ale také dobrý odvod třísek z místa řezu.



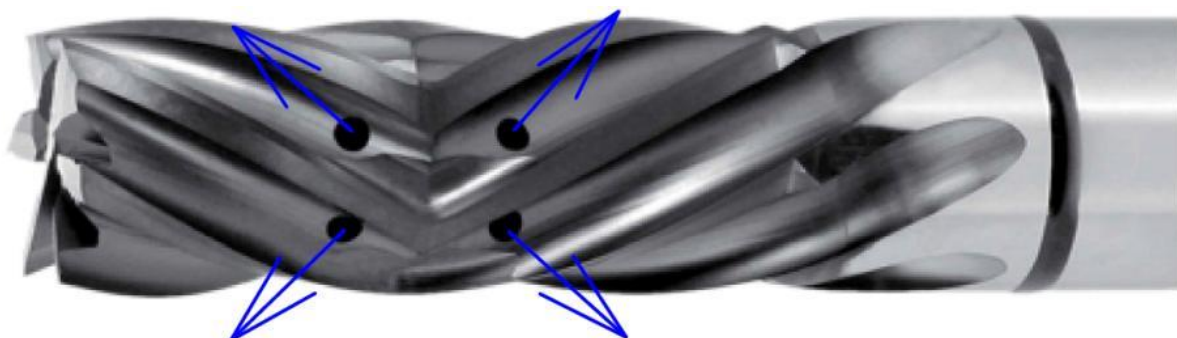
Obr. 12: Vrták s vnitřním chlazením [30]

U fréz je upínání a vstupní otvor pro přívod chladicí kapaliny řešen stejně jako u vrtáků. Výstupní otvory jsou umístěny tak, aby paprsek kapaliny směřoval na čelo břitu.

Jedním z frézovacích nástrojů je ten od společnosti Sandvik Coromant CoroMill 690. Ta má po obvodu spoustu řezných VBD destiček, které jsou chlazeny chladicí kapalinou. Ta je k destičkám přiváděna pomocí kanálků. Ty mají na konci závit, do kterého je našroubována tryska. Díky velkému množství výstupních otvorů je zapotřebí použít čerpadlo, které je schopno vytvořit potřebný tlak pro chlazení tohoto nástroje. [24],[25]



Obr. 13: CoroMill 690 [31]



Obr. 14: Fréza s protiběžnými břity [17]

Pomocí vnitřního chlazení jsou chlazeny i monolitní frézy na obrázku 14. Je potřeba zvážit, zda se takovéto nástroje pro výrobu vyplatí. Mají spoustu výhod jako například zvýšení trvanlivosti nástroje či zvýšení produktivity, tomu ale také odpovídá vyšší pořizovací cena nástrojů. [24]

### 2.6.3 Chlazení MQL

Další využívanou metodou je mazání minimálním množstvím maziva. Často se také můžeme setkat s anglickou zkratkou MQL (Minimum Quantity of Lubrication). Jedná se o aerosolovou směs vzduchu a maziva, v níž je rozptýleno minimální množství oleje. Jak samotný název napovídá, jedná se o metodu, při které se spotřebovává velmi malé množství maziva (do 30 ml/h), které je směřováno přímo do místa řezu. Řezná kapalina je přiváděna ve formě mlhy (aerosolu), proto se jako řezné kapaliny používají přírodní oleje a maziva. Metoda se používá pro obrábění šedé litiny, hliníku nebo ocelí. [25]

### 2.6.4 Chlazení CO<sub>2</sub>

Jednou z možností je chlazení pomocí stlačeného CO<sub>2</sub>. Tento způsob se používá u chlazení těžko obrobitelných materiálů. Chladicí médium je vedeno vřetenem až do místa řezu pod tlakem 0,5 až 0,7 MPa. Teplota kapalného CO<sub>2</sub> bývá zpravidla od -78 °C. Tím se sníží opotřebení hřbetu nástroje. Díky tomu se může zvýšit řezná rychlost, posuv na zub a výrazně tak bude navýšena produktivita obrábění. Mezi nevýhody tohoto chlazení patří vysoké náklady na CO<sub>2</sub> či relativní nebezpečnost jejího používání. Je proto potřeba zajistit dokonalé odsávání pracoviště. [20]

### 3 Návrh a realizace vlastních experimentů

Následující část práce využívá poznatků z předchozí části práce. Obsahuje představení strojů, které byly pro experimenty použity, a popis přípravy, průběhu a vyhodnocení jednotlivých experimentů. Klíčový byl proces navaření, na který navazují další kroky. V této části bylo nejdůležitější správně nastavit procesní parametry tisku, aby vznikl homogenní materiál s vlastnostmi, jež budou schopny přenášet zatížení frézy v průběhu obrábění. Na tom jak dobře se podaří zvládnout proces navaření, bude záviset způsob chlazení a jeho geometrie. Součástí této části jsou také výsledky zkoušek na vytisknutých vzorcích, a to zejména metalografické analýzy a tahové zkoušky.

#### 3.1 Použité zařízení

Nejdůležitějším zařízením využívaným při experimentu je 3D tiskárna. K této práci bylo zvoleno zařízení EOS M290, které pracuje na principu DMLS. Tiskárna má objem pracovní komory 250 mm × 250 mm × 325 mm. Vlákenný laser o výkonu až 400 W poskytuje vysokou kvalitu paprsku v kombinaci s dobrou stabilitou výkonu. Tisk probíhá v ochranné atmosféře dusíku, ale může pracovat i v prostředí argonu. To umožňuje systému zpracovávat široké spektrum materiálů. Na obrázku 15 je znázorněna tiskárna, jež byla použita při experimentech. Součástí zařízení je i monitor, na němž je možné sledovat průběh tisku. [32]



Obr. 15: 3D tiskárna EOS M290

Tab. 3: Parametry tiskárny EOS M290

<b>Velikost stavební komory</b>	250 × 250 × 325 mm
<b>Typ a výkon laseru</b>	Vláknový laser, 400 W
<b>Přesnost optiky</b>	Čočka F-theta, vysokorychlostní laser
<b>Rychlost skenování</b>	až 7 m/s
<b>Průměr zaostření</b>	100 $\mu\text{m}$
<b>Příkon</b>	32 A
<b>Napětí</b>	400 V
<b>Váha</b>	1 250 kg
<b>Software</b>	EOSPRINT, EOSTATE

Další stroj, který byl použit k broušení válečků ze slinutého karbidu, je nástrojařská bruska ANCA MX7. Tento stroj je určený k broušení monolitních nástrojů, a to už od průměru 0,5 mm. Jedná se tedy o velice přesný stroj. Tato bruska byla využita k zarovnání a přebroušení vrchní části válečků tak, aby na ně bylo možno natisknout další materiál. K přebroušení válečků byl použit diamantový kotouč. Toto broušení probíhalo při nepřetržitém chlazení chladicí kapalinou. [33]



Obr. 16: Broušení válečku z SK pomocí brusky ANCA MX7



## 3.2 Použitý materiál

### 3.2.1 Ceratizit CTS20D

Jako substrát byl zvolen slinutý karbid s označením CTS20D od firmy Ceratizit. Tento materiál je složený z tvrdého materiálu karbidu wolframu (WC), který má průměrnou velikost zrna 0,7  $\mu\text{m}$ . Spojení zrn při slinování je zajištěno pojivem v podobě kobaltu (Co). Tento materiál je zařazen do třídy pro univerzální obrábění legovaných a nelegovaných ocelí, slitin titanu a slitin na bázi niklu. Vylepšená houževnatost zajišťuje snížené riziko praskání břitů. Polotovary jsou vyráběny v různých průměrech a pro každý průměr s několika variacemi délek. Lze zvolit i polotovar, kde jsou již vytvořeny různé varianty chladicích kanálek. Pro tento výzkum byly použity válečky od firmy Ceratizit o průměru 12 mm a délce 100 mm. V tabulce 4 můžeme vidět vlastnosti materiálu CTS20D. [34]

Tab. 4: Vlastnosti slinutého karbidu CTS20D

Označení	Velikost zrna [ $\mu\text{m}$ ]	Obsah kobaltu [%]	Hustota [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	HV	TRS [MPa]
CTS20D	0,7	10	14,38	1600	4000

### 3.2.2 EOS martenzitická ocel MS1

Základem pro 3D tisk kovů je práškový materiál. Rozdílné druhy prášků mají odlišné vlastnosti, proto je důležitý jejich správný výběr. Pro tuto práci byl zvolen prášek vysokopevnostní martenzitické oceli 1.2709 od firmy EOS, jež bývá také často označována jako MS1. Tato ocel má velmi dobré mechanické vlastnosti, které se dají ještě zlepšit tepelným zpracováním. Takto vyrobené díly lze snadno obrobit, případně kalit na více než 50 HRC.

Jedním z cílů této diplomové práce je nastavení vhodných procesních parametrů pro tisk martenzitické oceli na substrát slinutého karbidu.

V tabulce 5 je uvedeno chemické složení materiálu MS1. Další vlastnosti materiálu MS1 vyrobeného aditivní technologií je možné najít v příloze v materiálovém listě.

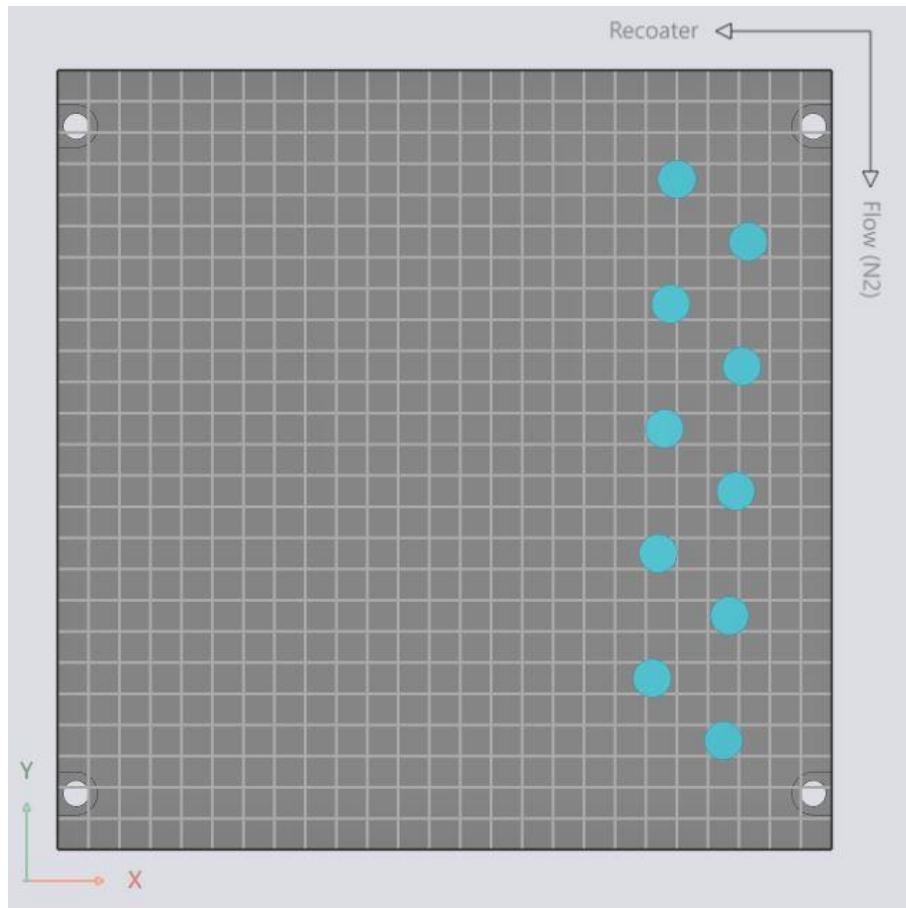
Tab. 5: Chemické složení martenzitické oceli EOS MS1

Prvek	Fe	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	Cu	Mn	Si
min [hm. %]		17.00	8.50	4.50	0.60	0.05				
max [hm. %]		19.00	9.50	5.20	0.80	0.15	0.50	0.50	0.10	0.10

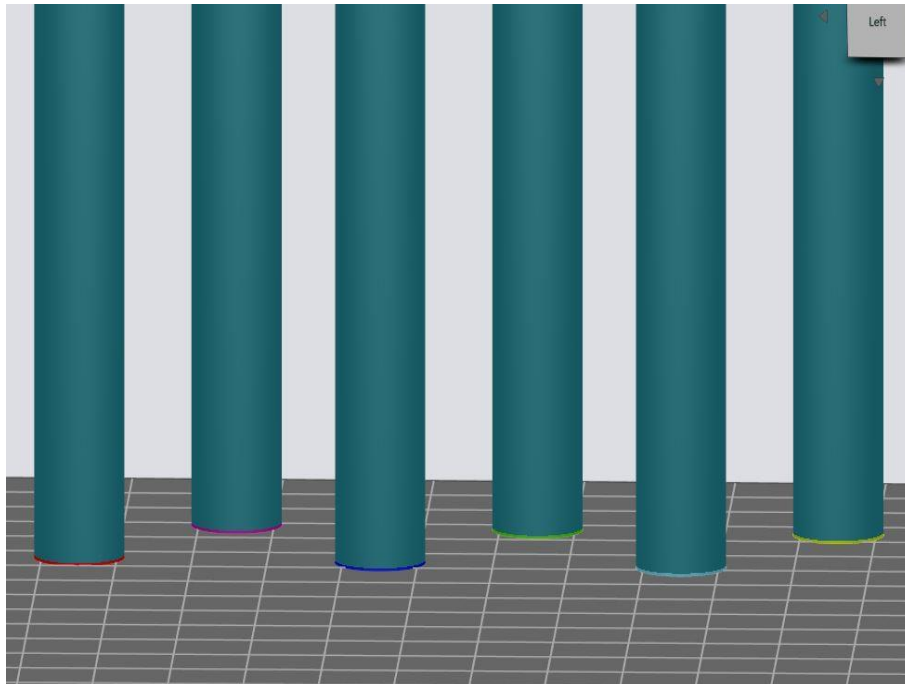
## 3.3 Příprava tisku

Příprava vzorků proběhla v softwaru Materialise Magics. V tom byly vymodelovány válečky a umístěny na přesné pozice, kde byly předtištěny držáky. Umístění válečků bylo navrženo

s ohledem na optimální využití celé platformy. Samotný tisk byl připravován v softwaru EOSPRINT 2.6. Tento software je nástupcem starší verze stejného programu. Jedná se o intuitivní a produktivní nástroj CAM pro systémy EOS, který umožňuje přiřadit a optimalizovat procesní parametry tisku. V tomto SW byly válečky rozděleny na dvě části. První část, tj. prvních osm vrstev, se tiskne navrhovanými optimalizovanými parametry. Druhá část se tiskne standardními parametry pro materiál MS1. V tomto programu lze nastavit celý proces tisku. Výsledkem takto připraveného souboru je model rozdělený na vrstvy. Ten se následně pošle přímo do tiskárny. Na obrázku 17 můžeme vidět rozmístění vzorků na platformě. Na dalším obrázku pak jednotlivé válečky, které jsou rozděleny na dvě části s různými parametry tisku.



Obr. 17: Rozmístění vzorků na platformě



**Obr. 18: Detail válečků rozdělených na dvě části**

Tak jako se musí tisková úloha připravovat v softwaru, je nezbytné připravit i samotnou tiskárnu na tisk. Nejdůležitější částí je platforma, na kterou jsou připevněny držáky pro válečky ze slinutých karbidů. Válečky musí být nejprve zbrošeny na stejnou požadovanou výšku. Na určitých pozicích byly předtištěny objímky, do nichž byly následně upnuty válečky karbidu. Další krok je upevnění platformy do tiskárny a její vyrovnání. Platforma musí být přesně vyrovnána, aby byla nanášená vrstva prášku rovnoměrná po celé ploše všech válečků. Když jsou všechny popsání úkony provedeny, je možné nanést vrstvu o příslušné tloušťce (v našem případě 0,04 mm). V poslední fázi je nutné načíst program vytvořený v softwaru a následně nechat v tiskárně vytvořit ochranou atmosféru. Poté může začít samotný tisk.

### **3.4 Průběh tisku**

Samotný průběh tisku probíhá tak, že je recoaterem nanášena vrstva prášku, který je následně sinterován (taven) na programem specifikovaných místech pomocí koncentrovaného laserového paprsku. Následně je nanášena další vrstva a proces se tak opakuje. Na obrázku 19 lze vidět jak již dokončený tisk v dané vrstvě, tak i jednu z ploch, která je právě sinterována.



Obr. 19: Průběh tisku

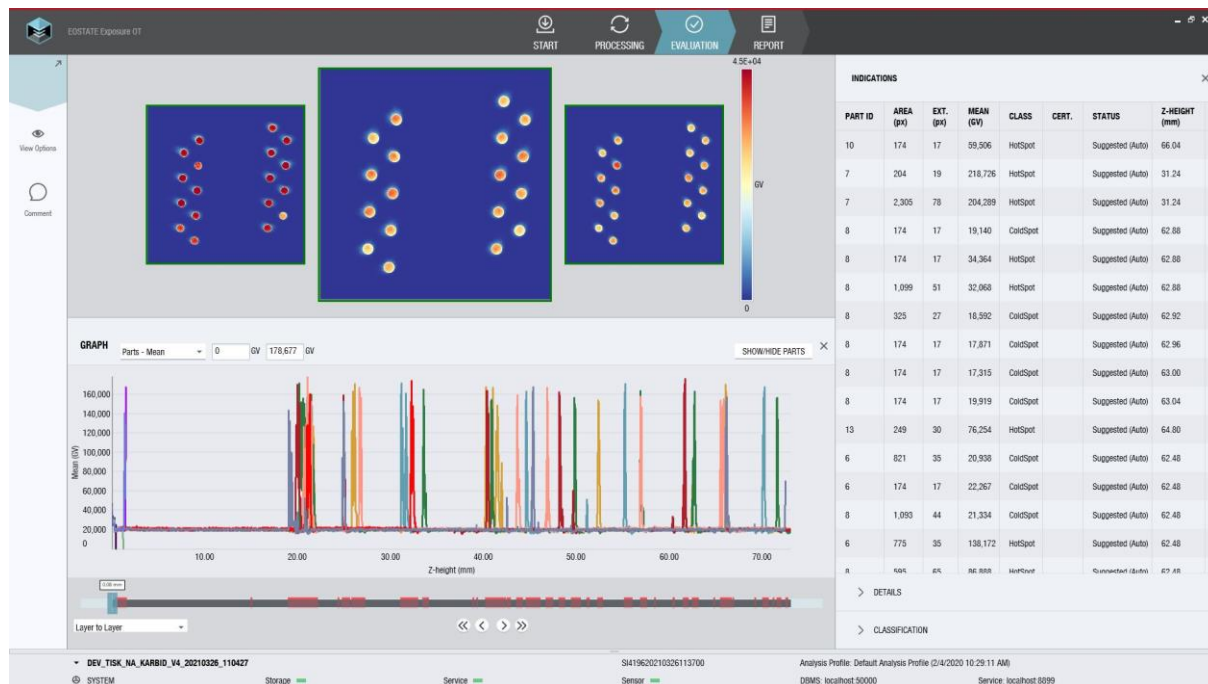
Při tisku zároveň z jedné strany dochází k odsávání nečistot, které se tvoří při tisku, a z druhé strany je do komory dodáván inertní plyn.

### 3.5 Monitorování průběhu tisku

V dnešní době specificky u určitých aplikací se velmi dbá na kvalitu tisku. Z tohoto důvodu chtějí mít výrobci k dispozici stroj se spolehlivým systémem. K zajištění správného a kvalitního tisku je zapotřebí monitorovacích systémů. Mnoho společností nabízí komplexní hardwarové a softwarové řešení, které zachycuje všechna data související s produkcí a kvalitou v reálném čase. Většina výrobců 3D tiskáren v současné době nabízí ke svým tiskárnám také monitorovací systémy pro sledování a vyhodnocování průběhu tisku. K tomu byl v této práci využit monitorovací systém a programy od výrobce tiskárny firmy EOS, a to konkrétně systém Powder Bed a Exposure OT.

#### 3.5.1 EOSTATE Exposure OT

Systém Exposure OT (Optical Tomography) provádí kamerové monitorování procesu tisku v reálném čase. Systém pomocí kamery s vysokým rozlišením mapuje každou část procesu tisku při rychlosti snímání deset snímků za vteřinu. Kamera zachycuje celou platformu ve vysoké frekvenci blízké infračervené oblasti. Poskytuje tak podrobná data o chování materiálu v průběhu tisku.

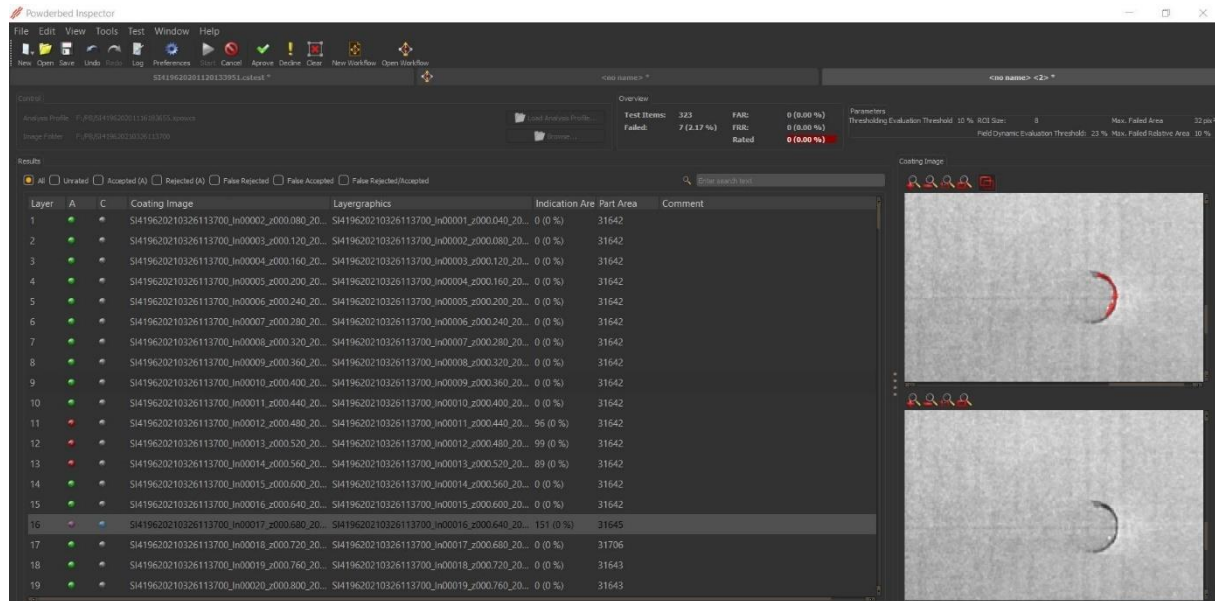


Obr. 20: Pracovní prostředí EOSTATE Exposure OT

Na základě takto získaných dat lze poté proces tisku velmi podrobně sledovat a analyzovat pomocí speciálního softwaru. Celý systém funguje tak, že jednotlivé snímky z každé vytisknuté vrstvy jsou sloučeny do jednoho obrazu. Ten pak umožňuje analyzovat tepelné záření emitované roztaveným kovem v jakémkoliv místě modelu. [35] [36]

### 3.5.2 EOSTATE Powder Bed

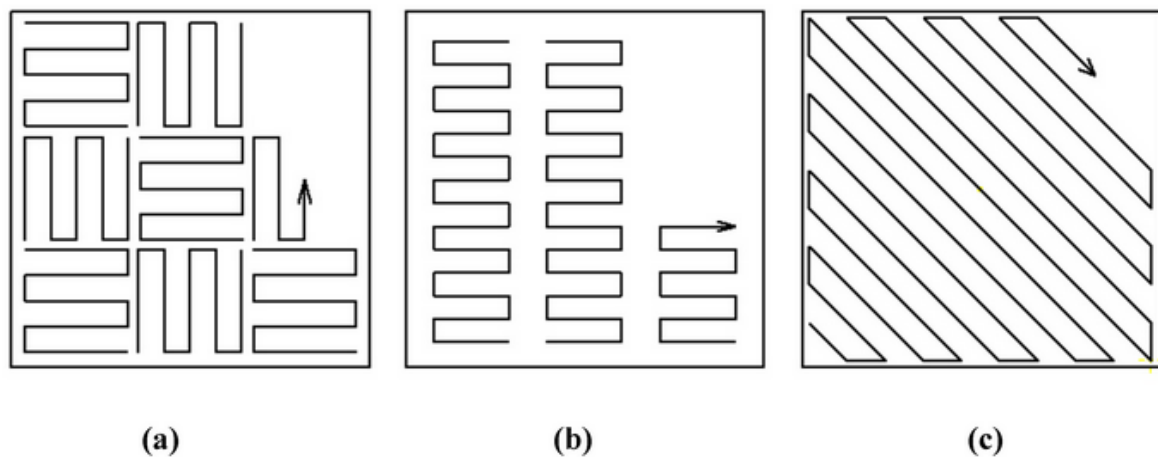
Systém Powder Bed sleduje rovnoměrnost nanášení vrstev prášku. To znamená, že v případě kolize se špatně vytisknutým materiálem může dojít k tomu, že tento materiál vytvoří pomocí posouvajícího se recoateru v prášku rýhu. Kvůli tomu vznikne v určitém místě nedostatek prášku, což může zapříčinit ohrožení bezproblémového procesu tisku. Uspořádání součástí na platformě nebo nějaké neočekávané změny v průběhu tisku mohou mít také nežádoucí vliv na rovnoměrné nanášení vrstvy. Systém funguje tím způsobem, že pomocí kamery, která je umístěna nad procesní komorou, snímá průběh tisku. Po každé nanášené vrstvě udělá snímek, který je možné sledovat živě, a tak případně ihned dokázat reagovat na neočekávané nanášení vrstvy prášku. Snímky je také možné nechat ukládat a následně se na ně podívat zpětně. [37]



Obr. 21: Pracovní prostředí Powderbed Inspector

### 3.6 Nastavení strategie tisku

Jedním z ovlivňujících faktorů tisku je strategie skenování laseru. Je potřeba vybrat pro konkrétní geometrii součásti tu nejvhodnější. Volbou skenovací strategie můžeme ovlivnit délku skenovacích vektorů a tím i velikost zbytkového napětí, které by se v součásti mohlo vytvořit. Při výběru skenovací strategie můžeme vybírat ze tří vzorů. Jak je vidět na obrázku 22, jedná se o vzor šachovnice, pruhů případně bez vzoru. Šipky znázorňují pohyb středu laserového paprsku. Při prvních dvou strategiích dochází k částečnému překrývání ploch, které jsou laserovým paprskem sinterovány.



Obr. 22: a) vzor šachovnice, b) vzor pruhů, c) bez vzoru [38]

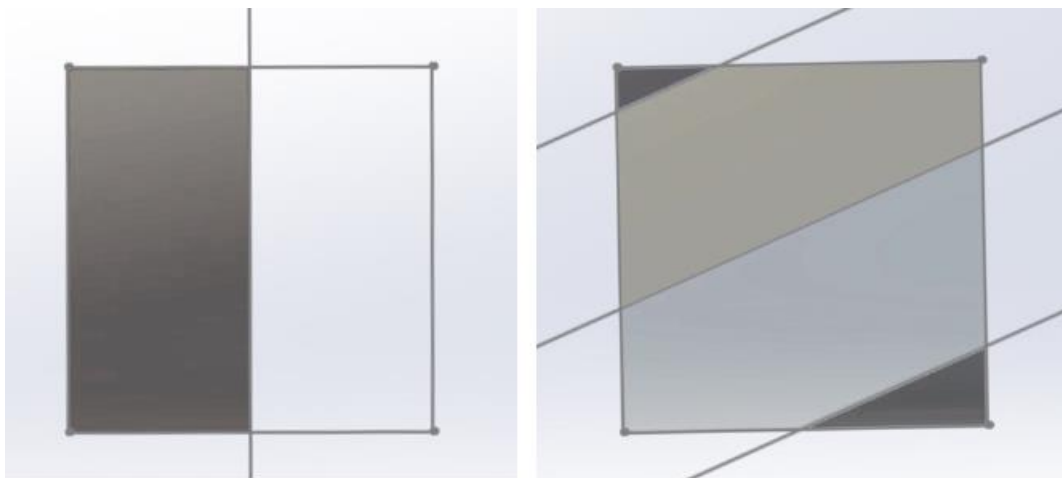
Každý z uvedených vzorů má své výhody a nevýhody a hodí se pro jinou geometrii součásti.

- a) Pro rovnoměrné rozložení zbytkového napětí se u velkých součástí volí jako skenovací strategie laseru vzor šachovnice. Tento způsob bývá časově náročnější než využití ostatních vzorů.
- b) Vzor pruhů se používá u středních až velkých součástí. Ty jsou rozděleny na pruhy s jejich předem definovanou šířkou, což pomáhá lépe rozložit zbytkové napětí. Se

zvětšující se velikostí součástí se na rozdíl od strategie bez vzorů neprodlužují dráhy, ale zvyšuje se počet pruhů.

- c) Strategie bez vzoru, kde se laser pohybuje po tištěné ploše tam a zpět, se využívá spíše u menších součástí. Velkou výhodou této strategie je její rychlost. U větších součástí dochází ke zvýšení zbytkového napětí. To je u velkých součástí často způsobeno tím, že jsou jednotlivé dráhy příliš dlouhé a než laser vytvoří jednu dráhu a začne druhou, tak ta už může být vychladnutá a nemusí dojít k dostatečnému protavení vrstev tisknutého materiálu. Navíc může dojít ke zhoršení povrchu tisknuté součásti a již ke zmíněnému nárůstu zbytkových napětí. [38]

Aby se dosáhlo dobré kvality tisku, dochází k tomu, že se jednotlivé pruhy se svými okraji překrývají a jsou vždy natočené oproti předchozí vrstvě o 67 stupňů.



**Obr. 23: Natočení v jednotlivých vrstvách o 67 stupňů a počet pruhů po natočení**

V každé vrstvě jsou pruhy umístěny trochu jinak. To může způsobit, že v některých případech mohou být pruhy umístěny vzhledem ke geometrii součásti výhodně a někdy zase méně výhodně.

V prvních experimentech, při nichž byla zapnuta strategie skenování laseru se vzorem pruhů, byla nastavena tloušťka mezi jednotlivými pruhy na 10 mm. Kvůli výše zmíněné rozdílnosti umístění pruhů v jednotlivých vrstvách na součástech byla tištěná plocha sinterována dvěma, někdy i třemi pruhy. Kvůli tomu docházelo na okrajích k vytváření úzkých pruhů a v nich k jejich přehřívání. V těchto částech se s největší pravděpodobností právě kvůli přehřívání vznikala deformace, která způsobila následné odtržení. Laser tam sice dodával energii jen zlomek sekundy, ale zato na mimořádně malé ploše. Protože ani zvětšením šířky pruhu nebylo možné zajistit, že všechny vzorky budou sinterované v jednom pruhu, byl tento vzor vypnut. Nově byla zvolena strategie tisku bez vzoru, čímž bylo dosaženo toho, že laser bude dodávat energii každému vzorku vždy pouze jednou. Tím byly eliminovány nežádoucí teplotní rázy, které mohli negativně ovlivnit spojení materiálů.

### 3.7 Návrh procesních parametrů

Na první experiment bylo připraveno šest válečků ze slinutého karbidu. Tyto válečky o průměru 12 mm byly připevněny na platformu pomocí držáků. Na základě teoretické části této diplomové práce byly pro každý vzorek navrženy různé procesní parametry tisku tak, aby byly zjištěny nejlepší možné parametry pro tisk materiálu MS1 na slinutý karbid vyrobený konvenčním způsobem.

Při navrhování matice procesních parametrů bylo stanoveno, že procesní parametry jako tloušťka vrstvy a vzdálenost šrafování zůstanou konstantní. Naopak proměnnými parametry zůstanou výkon laseru a rychlost skenování. Navržení samotných parametrů bylo velice složité, protože se nepodařilo dohledat žádný výzkum, kde by se řešila tato problematika navařování výše zmíněných materiálů na sebe. Při návrhu se proto vycházelo ze zkušeností s tiskem jednotlivých materiálů. Jak bylo zmíněno, tloušťka vrstvy byla zvolena pro všechny vzorky 40  $\mu\text{m}$  a vzdálenost šrafování 0,11 mm. V posledním sloupci tabulky je vypočítána celková absorbovaná energie. Ta se vypočítá jako podíl výkonu laseru a zbylých tří parametrů, tedy skenovací rychlosti, vzdálenosti šrafování a tloušťky vrstvy. V tabulce 6 jsou uvedeny navržené parametry pro první experiment.

Tab. 6: Návrh procesních parametrů pro 1. experiment

n	Výkon laseru	Skenovací rychlost	Tloušťka vrstvy	Vzdálenost šrafování	Celková absorbovaná energie
	[W]	[mm/s]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[J/mm <sup>3</sup> ]
1	40	130	40	0,11	69,93
2	100	200	40	0,11	113,64
3	180	350	40	0,11	116,88
4	285	960	40	0,11	67,47
5	300	700	40	0,11	97,40
6	350	600	40	0,11	132,58

Tiskárna pro tento tisk byla standardně přehřátá na 40 °C. Experiment byl nastaven tak, že se po vytisknutí prvních osmi vrstev navrženými parametry pozastaví, aby materiál vychladnul. Poté bylo možné pokračovat se standardními podmínkami pro tisk materiálu MS1 a dotisknout zbylou část o celkové výšce 80 mm. Standardními parametry pro vysokopevnostní martenzitickou ocel je výkon laseru 285 W a skenovací rychlost 960 mm/s.

Při samotném tisku se ukázaly jako nejhorší parametry 2 a 3, u nichž došlo k delaminaci vytištěných vrstev, následnému zdeformování a odtržení. Ty byly při nanášení nové vrstvy recoaterem odsunuty. Proto další tisk těchto vzorků byl zastaven, aby nedošlo ke kolizi a následnému přerušení experimentu nebo dokonce poškození recoateru. Na to poté navázal i vzorek 4, který byl tištěn se standardními parametry pro tisk MS1. Při jedné z posledních vrstev byly recoaterem odsunuty i vzorky 5 a 6, u nichž se při tisku dala pozorovat velká tepelná koncentrace. Jediným vzorkem, který byl tedy umožňoval nanesení všech osmi vrstev, byl vzorek číslo 1. Po desetiminutové přestávce a ponecháním vychladnutí na něj mohly být nanášeny standardními parametry další vrstvy. Po nanesení tří vrstev se ukázalo, že ani tento vzorek nebude schopen vydržet až do konce, a tisk musel být zastaven. Na obrázku 24 je vidět platforma s válečky ze slinutého karbidu s různým množstvím natisknutého materiálu.





**Obr. 24: Válečky ze SK s natištěným materiálem MS1**

Ačkoliv tento první experiment nepřinesl pozitivní výsledky, ukázal cenné poznatky o tom, s jakými parametry nadále nelze kalkulovat při řešení této problematiky a jaké by se naopak daly využít k přípravě dalšího experimentu. Těchto zkušeností bylo využito při přípravě druhého experimentu, na který již bylo připraveno 24 vzorků. Z toho měly 3 vzorky opískované povrch kvůli lepší adhezi tisknutého prášku ke slinutému karbidu (v tabulce označené písmenem O před pořadovým číslem). V tabulce 7 jsou navrženy parametry pro druhý experiment.

**Tab. 7: Návrh procesních parametrů pro 2. experiment**

n	Výkon laseru	Skenovací rychlost	Tloušťka vrstvy	Vzdálenost šrafování	Celková absorbovaná energie
	[W]	[mm/s]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[J/mm <sup>3</sup> ]
1	50	150	40	0,11	75,76
2	50	130	40	0,11	87,41
3	60	150	40	0,11	90,91
4	40	100	40	0,11	90,91
5	138	600	40	0,11	52,27
6	150	800	40	0,11	42,61
7	90	400	40	0,11	51,14
O 7	90	400	40	0,11	51,14

<b>8</b>	200	900	40	0,11	50,51
<b>O 8</b>	200	900	40	0,11	50,51
<b>9</b>	38	120	40	0,11	71,97
<b>O 9</b>	38	120	40	0,11	71,97
<b>10</b>	45	140	40	0,11	73,05
<b>11</b>	70	200	40	0,11	79,55
<b>12</b>	70	225	40	0,11	70,71
<b>13</b>	30	95	40	0,11	71,77
<b>14</b>	40	140	40	0,11	64,94
<b>15</b>	60	190	40	0,11	71,77
<b>16</b>	45	120	40	0,14	66,96
<b>17</b>	55	110	40	0,17	73,53
<b>18</b>	40	130	40	0,11	69,93
<b>19</b>	285	960	40	0,11	67,47
<b>20</b>	300	700	40	0,11	97,40
<b>21</b>	350	600	40	0,11	132,58

V tabulce 8 jsou seřazeny jednotlivé parametry tisku podle toho, jak byly postupně v průběhu tisku zastavovány. Pro druhý experiment byla platforma rozšířena o další držáky tak, že bylo možné tisknout 24 vzorků najednou. To umožnilo větší variabilitu navrhovaných parametrů. Tabulka je rozdělena do tří bloků, kde první blok (označen šedou barvou) tvoří vzorky, které nevydržely tisk prvních osmi vrstev. V prostředním bloku jsou parametry, jež byly vyřazeny při tisku vrstev standardními podmínkami pro materiál MS1. Poslední část vzorků (označena zeleně) vydržela nanesení všech vrstev.

Tab. 8: Výsledky 2. experimentu

n	Výkon laseru	Skenovací rychlost	Tloušťka vrstvy	Vzdálenost šrafování	Celková absorbovaná energie
	[W]	[mm/s]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[J/mm <sup>3</sup> ]
<b>13</b>	30	95	40	0,11	71,77
<b>O 9</b>	38	120	40	0,11	71,97
<b>5</b>	138	600	40	0,11	52,27
<b>19</b>	285	960	40	0,11	67,47
<b>8</b>	200	900	40	0,11	50,51

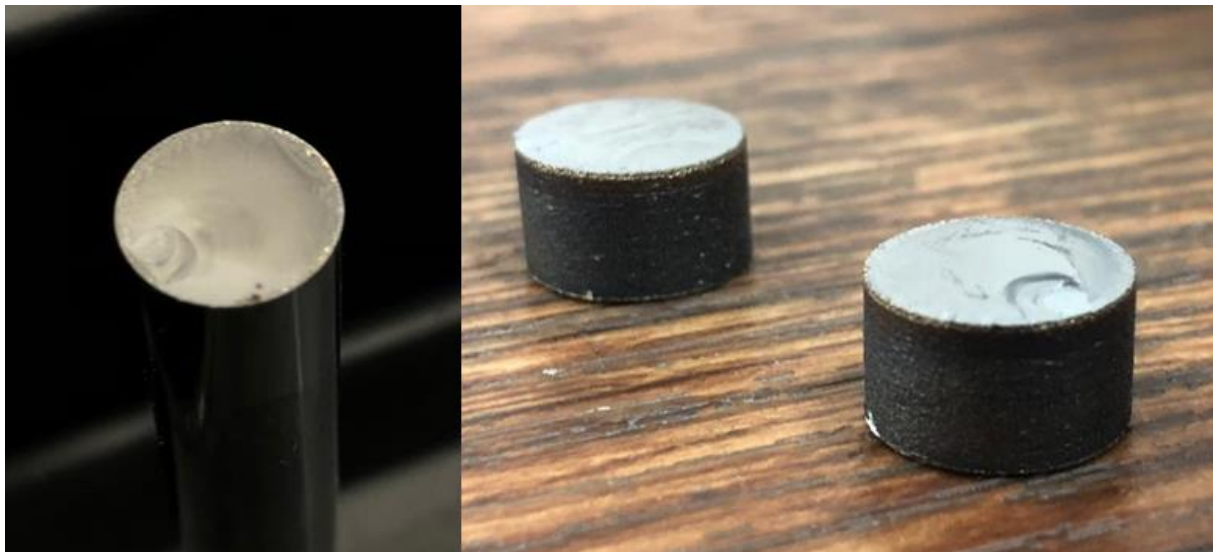
<b>O 8</b>	200	900	40	0,11	50,51
<b>6</b>	150	800	40	0,11	42,61
<b>12</b>	70	225	40	0,11	70,71
<b>20</b>	300	700	40	0,11	97,40
<b>21</b>	350	600	40	0,11	132,58
<b>9</b>	38	120	40	0,11	71,97
<b>11</b>	70	200	40	0,11	79,55
<b>O 7</b>	90	400	40	0,11	51,14
<b>7</b>	90	400	40	0,11	51,14
<b>10</b>	45	140	40	0,11	73,05
<b>2</b>	50	130	40	0,11	87,41
<b>4</b>	40	100	40	0,11	90,91
<b>1</b>	50	150	40	0,11	75,76
<b>14</b>	40	140	40	0,11	64,94
<b>18</b>	40	130	40	0,11	69,93
<b>17</b>	55	110	40	0,17	73,53
<b>15</b>	60	190	40	0,11	71,77
<b>16</b>	45	120	40	0,14	66,96
<b>3</b>	60	150	40	0,11	90,91

Z tabulky je patrné, že jako nejlepší se ukázal tisk s parametry, které měly poměrně nízký výkon laseru. U dvou parametrů byla také pozměněna hodnota vzdálenosti šrafování. Tři válečky měly opískovanou vrchní část, aby byla plocha hrubší a lépe na ní ulpěl tisknutý materiál. Parametry tisku byly duplikovány proto, aby mohl být zjištěn rozdíl mezi povrchy. Výsledky ukazují, že není vidět žádný větší rozdíl mezi takto upraveným a standardně používaným válečkem pro ostatní parametry. Po ukončení tisku a následném zchlazení byla celá platforma očištěna od nespečeného prášku, jenž byl vysátý a následně přiset pro další použití. (obr. 25).



Obr. 25: Platforma s 24 vzorky po 2. experimentu

Následně byly válečky vyjmuty z držáků. Již při běžné manipulaci se vzorky došlo k odtržení natisknuté vrstvy, a to u vzorku 15 a 16. Na obrázku 26 v levé části můžeme vidět váleček, ze kterého byl natisknutý materiál odtržen a na pravé straně obrázku odtržené části.



Obr. 26: Na levé straně SK po tisku, na pravé straně odtržené natisknuté části

Z tohoto experimentu tak nejlépe vyšly parametry pro vzorek 3. Část natisknutého materiálu můžeme vidět na obrázku 27.



Obr. 27: Vzorek číslo 3

Na základě výsledků druhého experimentu byly navrženy procesní parametry pro přípravu dalšího. Kvůli odštípnutí materiálu z některých válečků byl počet vzorků v nadcházejícím experimentu zredukován na 20. Bylo potřeba najít vazby mezi jednotlivými parametry, aby mohlo dojít k jejich rozdělení na ty, které při tomto nastavení nejsou perspektivní, a na ty, jež vykazovali nadějný výsledek. Díky poznatkům z předchozích experimentů byly navrženy parametry pro další tisk. V tabulce 9 můžeme vidět parametry dvaceti vzorků pro třetí experiment.

Tab. 9: Návrh procesních parametrů pro 3. experiment

n	Výkon laseru	Skenovací rychlost	Tloušťka vrstvy	Vzdálenost šrafování	Celková absorbovaná energie
	[W]	[mm/s]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[J/mm <sup>3</sup> ]
1	45	120	40	0,11	85,23
2	50	130	40	0,14	68,68
3	60	120	40	0,14	89,29
4	60	180	40	0,11	75,76
5	60	170	40	0,11	80,21
6	60	160	40	0,11	85,23
7	60	140	40	0,14	76,53
8	55	140	40	0,11	89,29
9	55	120	40	0,14	81,85
10	55	150	40	0,11	83,33

11	60	130	40	0,14	82,42
12	60	140	40	0,11	97,40
13	65	160	40	0,11	92,33
14	65	160	40	0,14	72,54
15	65	170	40	0,11	86,90
16	65	180	40	0,11	82,07
17	65	190	40	0,11	77,75
18	55	110	40	0,14	89,29
19	60	110	40	0,17	80,21
20	60	150	40	0,11	90,91

Kvůli technickým problémům se vzorky bylo nutno jejich počet zredukovat na 18. V tabulce 10 je možné vidět výsledky třetího experimentu. Tabulka je rozdělena do dvou částí, kde v té první jsou vzorky, které se nepodařilo natisknout a jsou seřazeny podle toho, jak musel být postupně zastavován jejich tisk. Ve druhé části tabulky jsou vzorky, u nichž došlo k vytisknutí části, ale bohužel nedošlo ke spojení se substrátem ze SK. Při experimentu byla na rozdíl od toho předchozího vynechána pauza mezi osmi vrstvami tisknutými navrženými parametry a zbylými vrstvami tisknutými standardními parametry pro MS1. Naopak byl nastaven pevný čas pro tisk každé jednotlivé vrstvy, a to na 120 sekund, což je doba tisku jedné vrstvy z předchozího experimentu. Tím bylo možné při všech vrstvách zajistit stejné podmínky. Díky tomu bylo dosaženo toho, že i pokud v průběhu tisku dojde ke snížení počtu tisknutých vzorků, čas tisku jedné vrstvy zůstane konstantní. Bohužel hned po třinácti vrstvách došlo k tomu, že recoater narazil do vzorku číslo 13 a tisk musel být zastaven. Tím byla přerušena požadovaná kontinuita procesu. Pro obnovení tisku bylo potřeba otevřít pracovní prostor tiskárny a následně znovu vytvořit ochranu atmosféru, což způsobilo zhruba 40minutovou prodlevu, při níž došlo k nežádoucímu ochlazení všech tištěných vzorků.

Tab. 10: Výsledky 3. experimentu

n	Výkon laseru	Skenovací rychlost	Tloušťka vrstvy	Vzdálenost šrafování	Celková absorbovaná energie
	[W]	[mm/s]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[J/mm <sup>3</sup> ]
13	60	140	40	0,11	97,40
7	65	190	40	0,11	77,75
8	65	160	40	0,11	92,33
5	60	140	40	0,14	76,53
15	65	180	40	0,11	82,07
14	65	160	40	0,14	72,54

3	65	170	40	0,11	86,90
2	60	110	40	0,17	80,21
0	55	170	40	0,11	73,53
22	45	120	40	0,11	85,23
21	50	130	40	0,14	68,68
17	55	150	40	0,11	83,33
18	55	140	40	0,11	89,29
19	60	160	40	0,11	85,23
20	60	180	40	0,11	75,76
4	60	130	40	0,14	82,42
9	55	120	40	0,14	81,85
10	60	170	40	0,11	80,21

Na obrázku 28 jsou vidět všechny vzorky tisknuté v tomto experimentu. Na dalším pak detail uštipnutých vzorků.



Obr. 28: Vzorky po 3. experimentu



**Obr. 29: Uštipnuté vzorky**

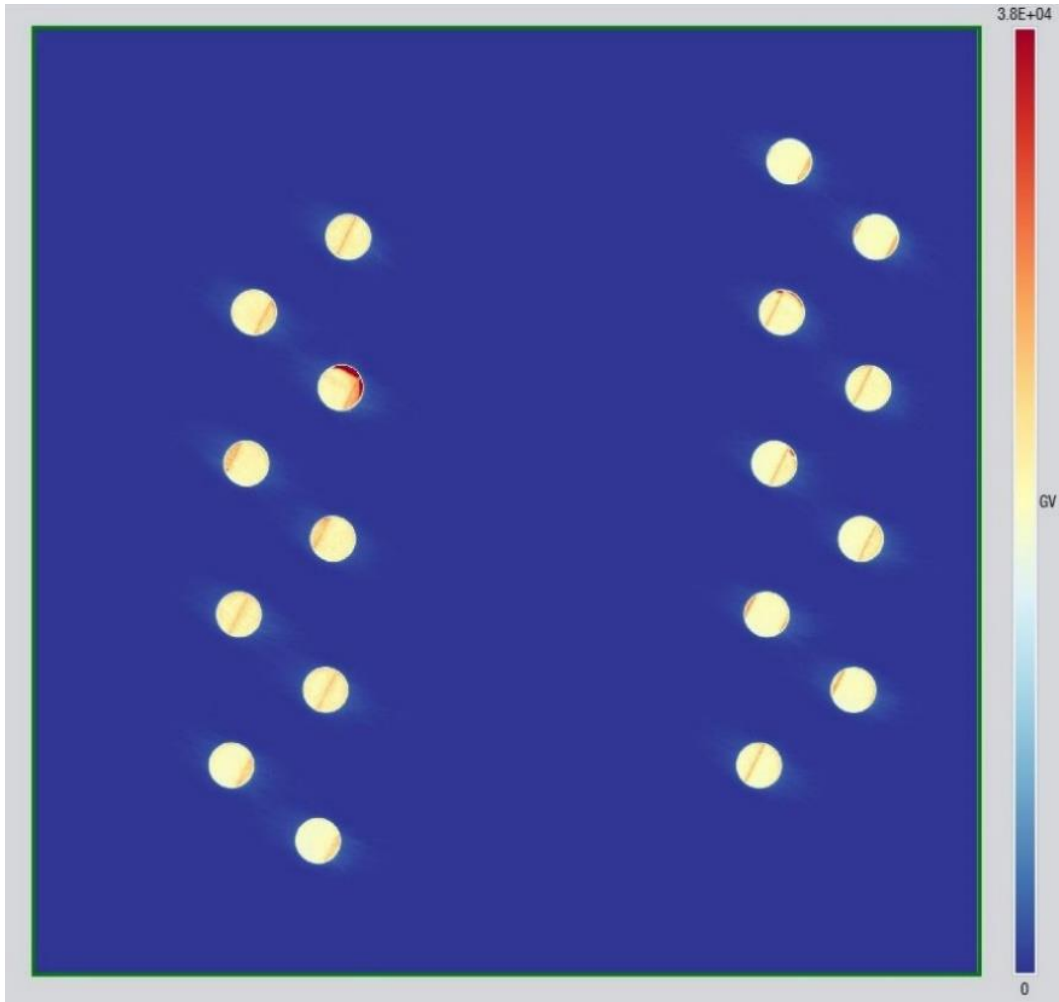
Na obrázku 30 je vidět všech sedm natisknutých částí, které se ale nespojily se substrátem slinutého karbidu. Tyto části byly přiřazeny k jednotlivým vzorkům tak, aby k nim mohly být přiřazeny procesní parametry tisku.



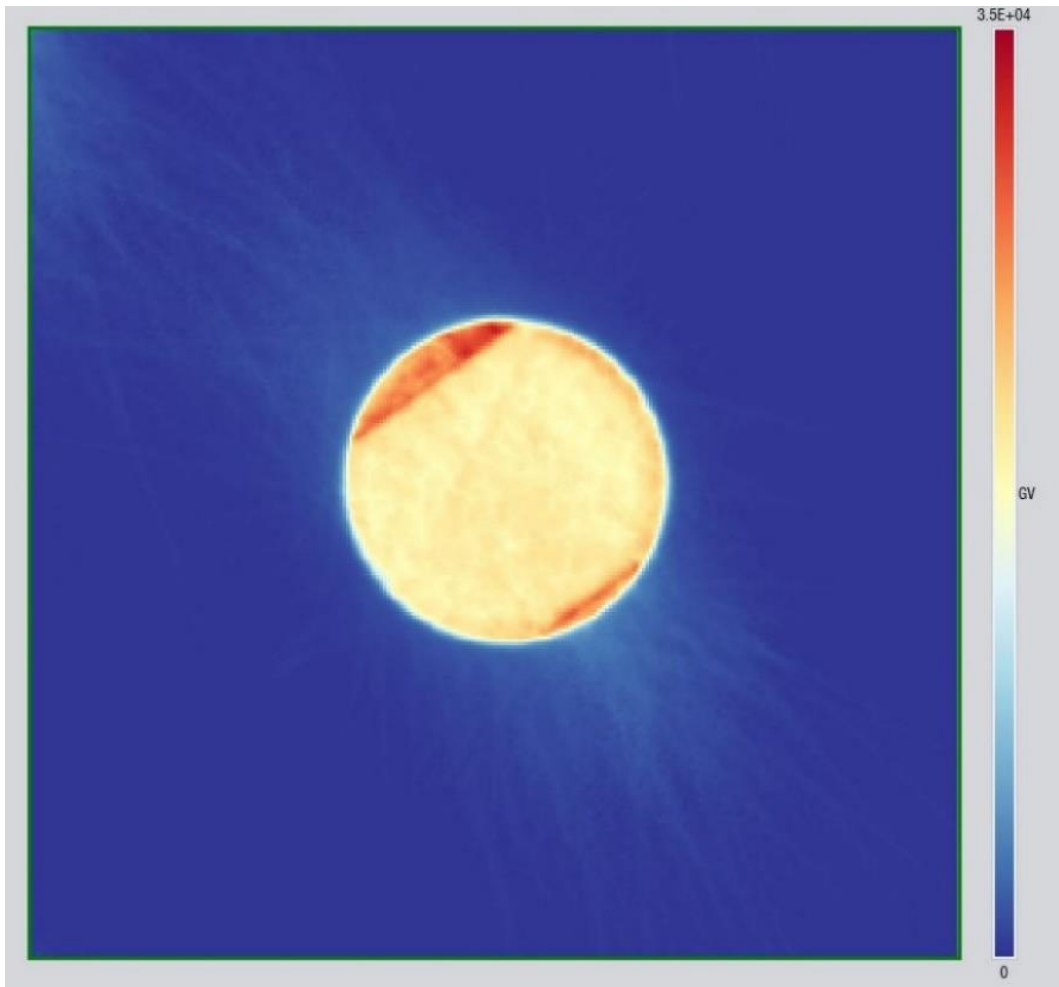
**Obr. 30: Jednotlivé části které byly dotisknuty**



Z monitorovacího systému a programu EOSTATE OT bylo po třetím experimentu patrné, že dochází k přehřívání okrajů některých válečků z důvodu nastavení strategie tisku s pruhy. Tato strategie měla nastavenou šířku jednotlivých pruhů na 10 mm. Jak je možné vidět na obrázku 31, každý váleček měl jinak rozmístěné pruhy, což znamenalo, že na některých válečcích vznikl pouze jeden pruh, zatímco u jiných i tři pruhy. V takových případech se v okrajových částech na velmi malém místě kumulovala tepelná energie z laserového paprsku, jejímž bylo přehřívání a následné vyštipování těchto částí.

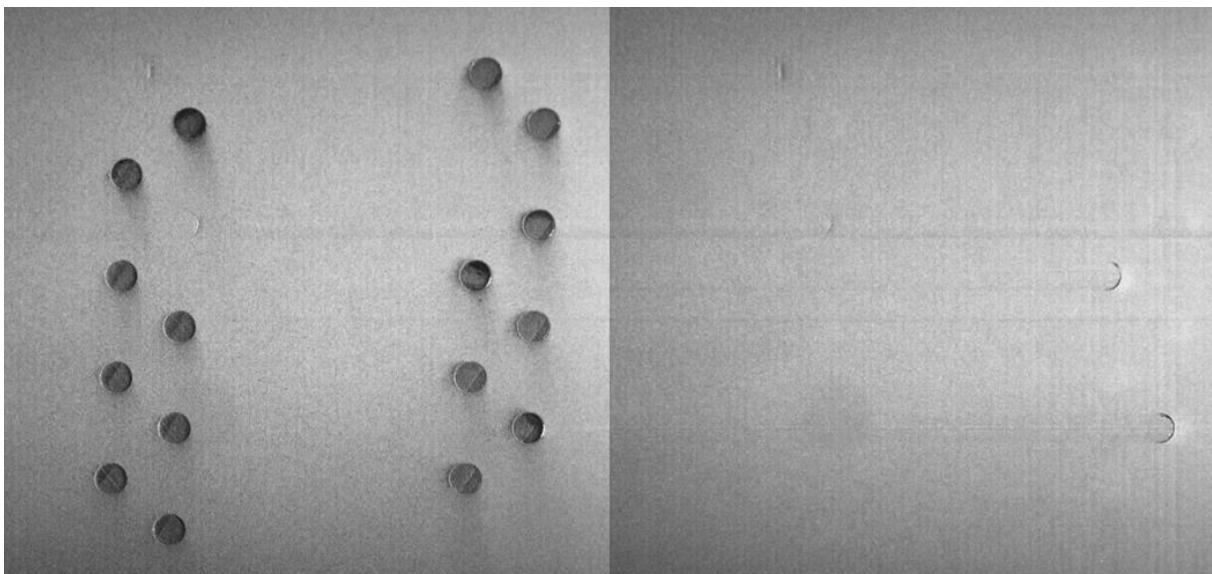


Obr. 31: Problém strategie tisku v pružích



**Obr. 32: Detail přehřátých okrajů válečku**

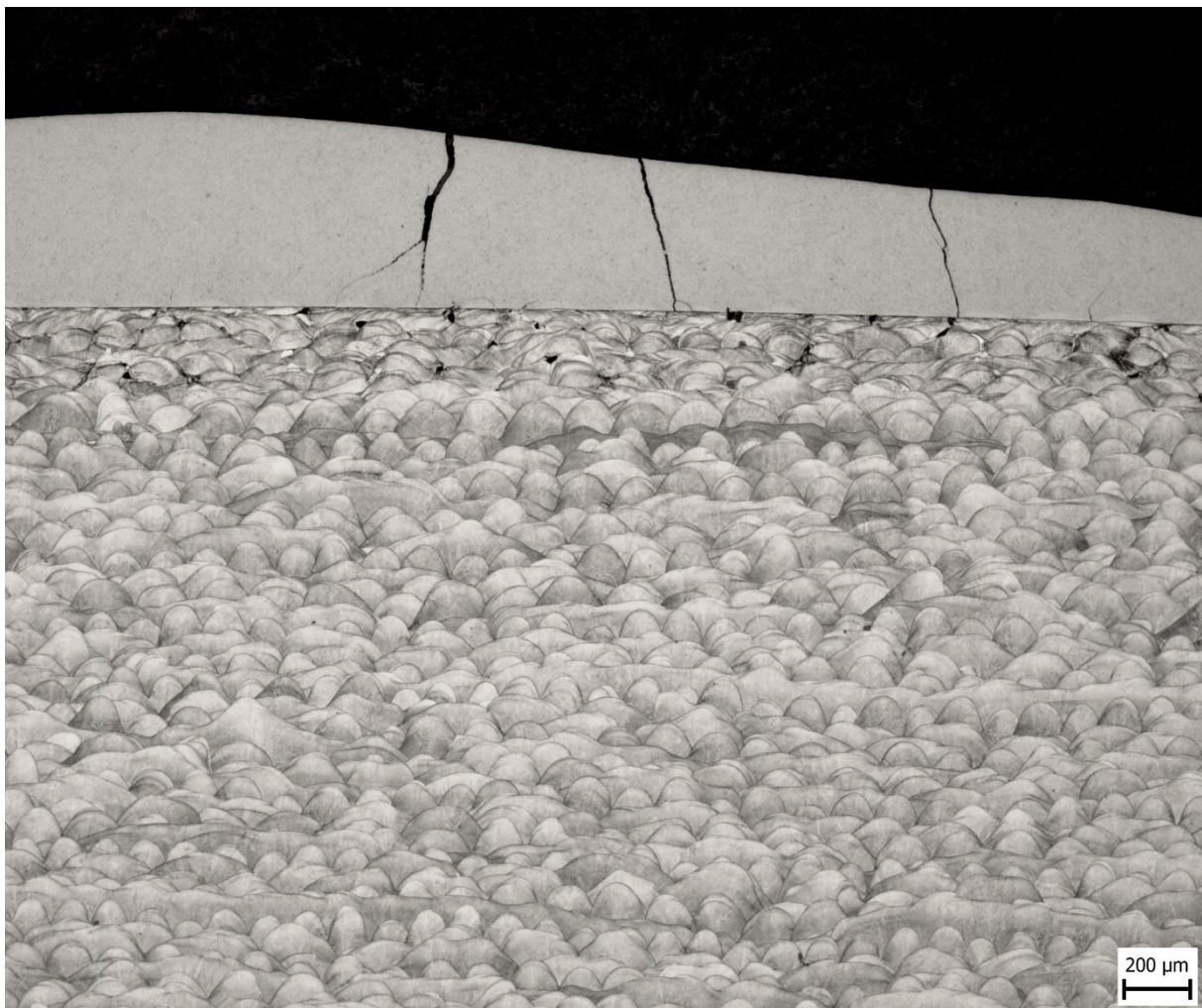
Vlivem vysoké energie laseru od deváté vrstvy docházelo k přehřívání vzorků. Následně došlo k delaminaci vrstev a tisk takovýchto vzorků musel být zastaven.



**Obr. 33: Průběh tisku 3. experimentu z programu EOSTATE Powderbed**

To je vidět na obrázku 33, kdy v levé části je snímek po sinteraci vrstvy laserovým paprskem. Tam lze pozorovat na některých vzorcích přehřívání a také výše zmíněný problém strategie tisku v pruzích. V pravé části je pak snímek po nanesení vrstvy prášku, kdy je vidět že u přehřátých kusů došlo k problému a následně ke kontaktu s přejíždějícím recoaterem.

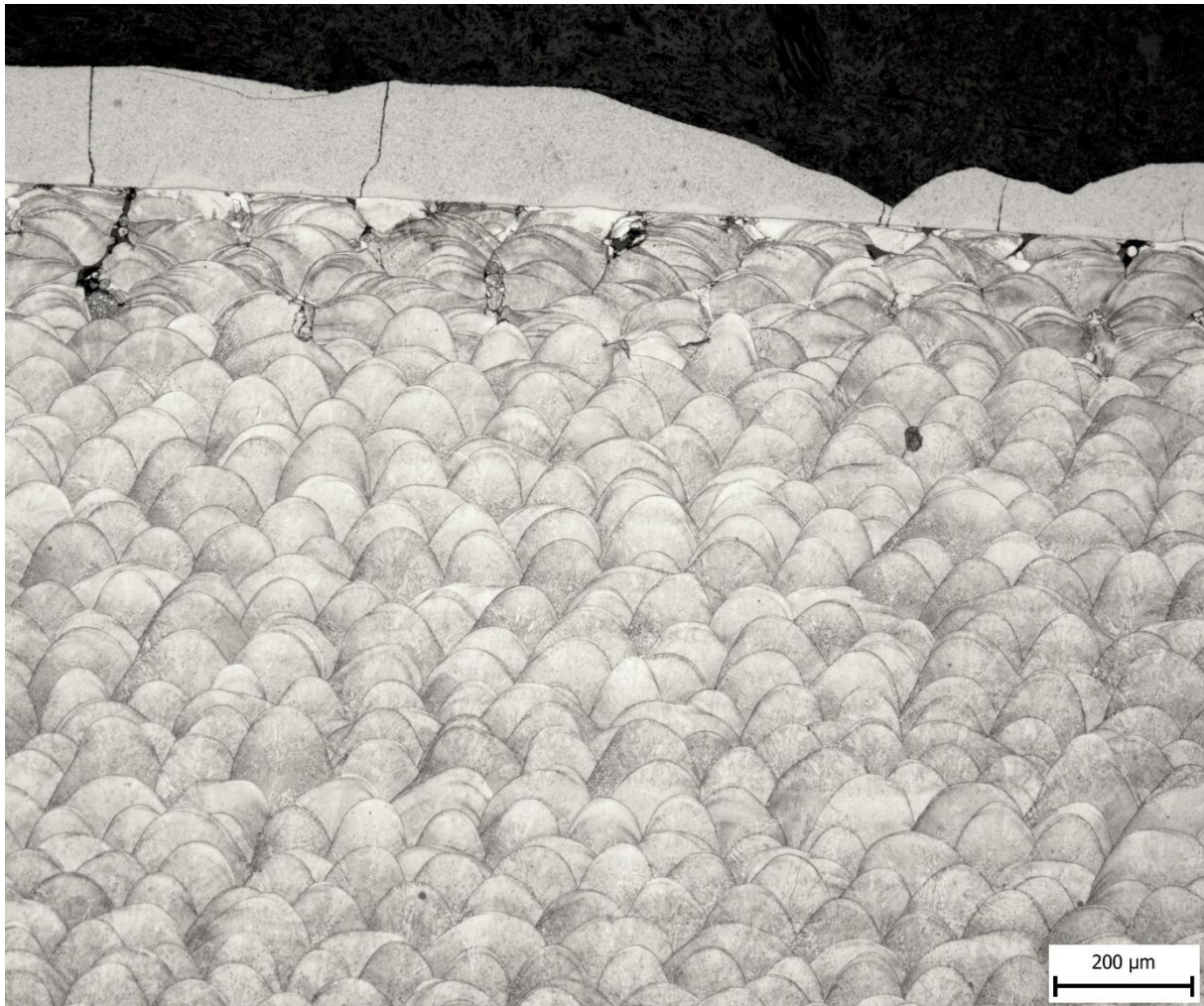
Vybrané odtržené části vzorků ze třetího experimentu (Obr. 30) byly podrobeny metalografické analýze. Ta ukázala příčinu, proč docházelo k praskání vzorků v předchozích experimentech. To lze vidět na obrázku 34, na kterém je naleptaný, vybroušený a 50× zvětšený vzorek číslo 4. V horní části obrázku je část slinutého karbidu, který se odlomil spolu s vytisknutým materiálem. Ve spodní části pak tisknutý práškový materiál.



**Obr. 34: Vznik trhlin ve slinutém karbidu**

Vznik trhlin a následné praskání materiálu byl iniciovaný vlivem teplotních šoků. Při tisku práškového materiálu dochází k velkému pnutí spékaného materiálu, který způsobuje vznik povrchových pnutí a tím vznik trhlin. Ty se tvoří zpravidla kolmo od rozhraní základního a tisknutého materiálu.

Podobné trhliny můžeme pozorovat i na vzorku 10, taktéž ze třetího experimentu. Ten je v tomto případě zvětšený 100×.



**Obr. 35: Vznik pórů v tisknutém materiálu**

Na obou snímcích lze vidět i vznik poměrně velkého množství velkých pórů. Ty dosahují velikosti až 50  $\mu\text{m}$  a mají špatný vliv na mechanické vlastnosti. Vznik pórů je patrný zejména u prvních vrstev, které se tisknuly navrženými optimalizovanými parametry. Při tisku standardními procesními parametry nejsou vidět v materiálu prakticky žádné póry.

V předchozím experimentu se ukázalo, jak negativně působí teplotní šoky na proces tisku na slinuté karbidy. Proto při návrhu dalšího, tedy v pořadí čtvrtého, byly využity ty parametry z předchozích experimentů, které se v těch předchozích ukázaly být vhodné pro další tisk. Tiskový proces byl nastaven tak, aby byly minimalizovány teplotní gradienty. Navržené parametry pro čtvrtý tisk jsou zaznamenány v tabulce 11.

Tab. 11: Návrh procesních parametrů pro 4. experiment

n	Výkon laseru	Skenovací rychlost	Tloušťka vrstvy	Vzdálenost šrafování	Celková absorbovaná energie
	[W]	[mm/s]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[J/mm <sup>3</sup> ]
15	60	190	40	0,11	71,77
16	45	120	40	0,14	66,96
3	60	150	40	0,11	90,91
17	55	150	40	0,11	83,33
18	55	140	40	0,11	89,29
19	60	160	40	0,11	85,23
20	60	180	40	0,11	75,76
4	60	130	40	0,14	82,42
9	55	120	40	0,14	81,85
10	60	170	40	0,11	80,21

Nebyly tak upraveny přímo parametry výkonu laseru, ale byla pozměněna strategie tisku v pruzích, a místo ní byl zvolen tisk bez vzorů. Tedy že se jednotlivé vrstvy válečků tisknou najednou. K tomuto kroku bylo přistoupeno z důvodu, že při předchozí strategii docházelo k přehříváním okrajů vzorků, které mohlo způsobit následné odtrhávání okrajů a tiskové kolize. Druhou významnou změnou oproti předchozímu tisku bylo předehtání celé platformy na 150 °C. Díky tomu mělo dojít k eliminování teplotních šoků při tisku, jež slinitý karbid špatně snášel. Další změnou bylo nastavení dvojitého tisku každé z prvních tří vrstev. Tato změna by měla přinést lepší spojení jednotlivých vrstev. Poslední změnou bylo zrušení pevného času tisku vrstev, což mělo také snížit teplotní výkyvy při tisku. Tj. celý proces (tisk a nanášení vrstev) na rozdíl od předchozího experimentu probíhal kontinuálně.

Výsledkem čtvrtého experimentu byl fakt, že ani jeden ze vzorků se nepodařilo dotisknout. První vrstvy se tiskly bez známek jakéhokoliv problému, ale při změně parametrů (od osmé vrstvy) začalo docházet k delaminaci natisknutého materiálu a celý proces tisku musel být postupně zastaven.

Z této zkušenosti bylo vycházeno při přípravě dalšího tisku. Parametry pro pátý experiment zůstaly stejné, přičemž celý tento tisk byl rozdělen do čtyř částí. Pro každou část byly vybrány vzorky s parametry z tabulky 11.

První část zahrnovala čtyři vzorky, které se tiskly jednotlivě a postupně. Bylo ustoupeno od dvojitého tisku prvních tří vrstev, přičemž dvojitý tisk byl ponechán pouze u první vrstvy. Na výsledku se nicméně moc nezměnilo. U vzorků docházelo k velkému teplotnímu přehřátí a následné delaminaci vrstev. Proto bylo přistoupeno ke zpomalení tisku, kdy vždy po každé vrstvě laser vytvořil deset vteřin trvající pauzu. Ani to však nepřineslo výraznější zlepšení. Nedocházelo sice tak k velkému teplotnímu přehřívání jednotlivých vzorků, ale delaminaci vrstev to nezabránilo. Pro ověření vlivu byla dvojitá expozice první vrstvy vypnuta. Když se

ani tento krok neukázal jako vhodný pro úspěšný experiment, byly všechny dosud zjištěné poznatky vyhodnoceny a navržen podle nich tisk zbývajících čtyř kusů.

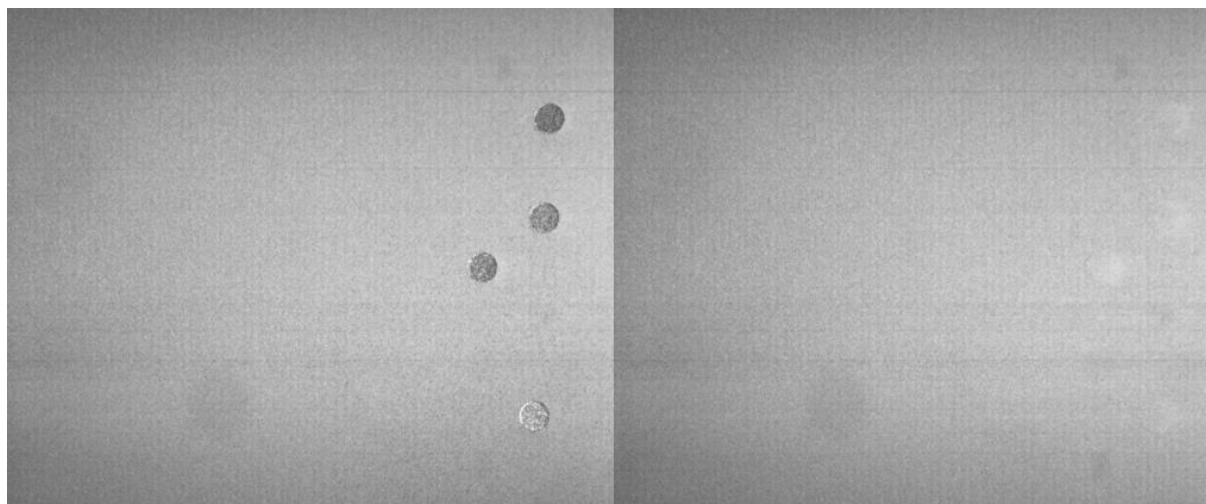
Kvůli tomu, že vypnutá dvojitá expozice u první vrstvy neprokázala žádný pozitivní účinek, byla znovu zapnuta. Dále bylo pokračováno s desetivteřinovou pauzou mezi tiskem jednotlivých vrstev. Poslední, a zároveň stěžejní, změnou byl tisk navrženými parametry nikoliv pouze prvních osm vrstev, ale po celou dobu tisku.

V tabulce 12 jsou parametry čtyř válečků, které byly dotisknuty do výšky 53 mm.

**Tab. 12: Procesní parametry natisknutých válečků v 5. experimentu**

n	Výkon laseru	Skenovací rychlost	Tloušťka vrstvy	Vzdálenost šrafování	Celková absorbovaná energie
	[W]	[mm/s]	[ $\mu\text{m}$ ]	[mm]	[J/mm <sup>3</sup> ]
16	45	120	40	0,14	66,96
9	55	120	40	0,14	81,85
3	60	150	40	0,11	90,91
20	60	180	40	0,11	75,76

Po vypnutí strategie pruhů můžeme vidět na snímcích ze čtvrtého experimentu, že se na válečcích nevytvářejí pruhy. Tím je zajištěn hladký průběh tisku s tím, že už nedochází k vyštipování okrajových částí vzorků.



**Obr. 36: Tisk se strategií bez vzorů**

Na obrázcích níže můžeme vidět všechny dotisknuté kusy, respektive detail jednoho válečku. Z těchto vzorků byl vybrán jeden vzorek, který byl poslán na zkoušku tahem.



**Obr. 37: Vytisknuté válečky**



**Obr. 38: Detail jednoho natisknutého válečku**



Graf 1: Tahový diagram pro vzorek 3

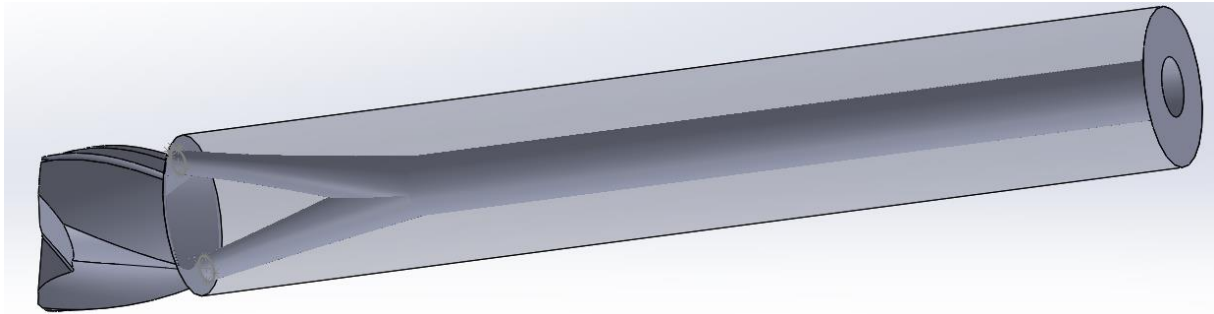
Z grafu 1 můžeme vidět výsledek tahové zkoušky pro vzorek 3. Z něj je patrné, že k lomu došlo při síle 24,2 kN, což vzhledem k průměru zkušební vzorku odpovídá napětí 214 MPa. Tento výsledek vzhledem k udávané pevnosti v tahu martenzitické oceli, který činí 1100 MPa, nevypadá příliš příznivě. Na druhou stranu při obrábění k takovému to zatížení nedochází, nicméně je nutné to dále ověřit. Uspokojivý je i fakt, že pro daný experiment bylo nutné vzorek obrobít a díky nesouososti SK a MS1 docházelo k velkým rázům při obrábění a ani u jednoho vzorku nedošlo k poškození.

### 3.8 Návrh vnitřního chlazení

Při návrhu vnitřního chlazení frézy bylo úkolem navrhnout vnitřní chlazení tak, aby se chladicí kapalina dostala do místa řezu a mohla tím pádem účinně chladit břit a odvázet třísky z místa řezu. Při obrábění s frézou s vnitřním chlazením mohou chladicí kanálky, které vedou uvnitř frézy, přivádět odpovídající množství řezné kapaliny až přímo do místa řezu. Toho je často využíváno při vysokorychlostním frézování nebo při obrábění těžko obrobitelných materiálů. Cílem návrhu vnitřního chlazení bylo optimalizovat chlazení s co nejmenším zásahem do řezné části nástroje.

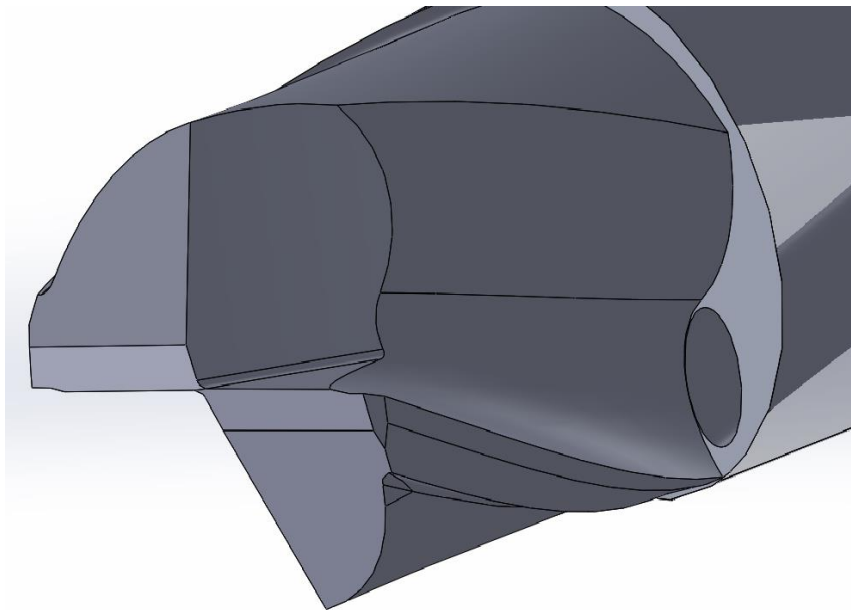
Při návrhu vnitřního chlazení frézy byly jako základ použity poznatky z rešeršní části této diplomové práce. Jak je možné vidět na obrázku 40 (viz str. 58), vnitřní chlazení frézy vychází z jednoho hlavního chladicího kanálku od stopky frézy, který má průměr 3 mm a který se následně rozděluje do dvou menších kanálků.





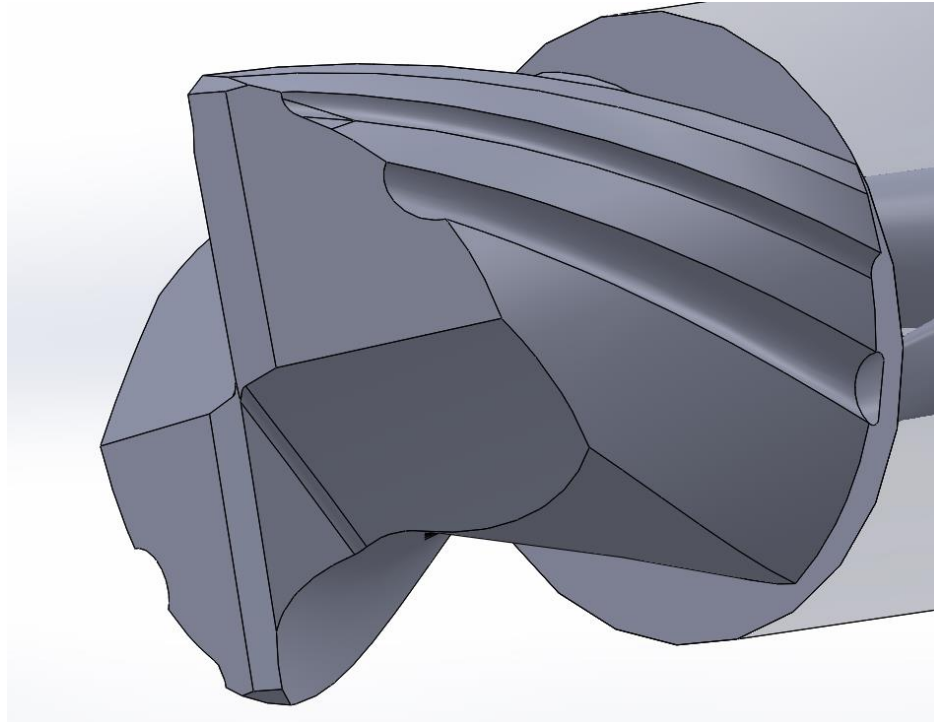
**Obr. 39: Návrh vnitřního chlazení frézy**

Díky využití aditivní technologie bylo možné chladicí kanálky navrhnut přesně podle potřeb dvoubřité monolitní frézy ze slinutého karbidu o průměru 12 mm. Pro tento typ a velikost frézy byly zvoleny dva výstupy chladicích kanálků. Při větším počtu by docházelo k ubírání materiálu frézy, což by mohlo mít špatný vliv na stabilitu řezného procesu. Z tohoto důvodu je také navržen průměr hlavního chladicího kanálku začínajícího u stopky nástroje na 3 mm. Jak je vidět na obrázku 41, chladicí kanálky jsou oválného tvaru. Tento tvar pomůže zlepšit přísun chladicí kapaliny do místa řezu. Chladicí kanálky jsou vyvedeny ke šroubovici, odkud se pak chladicí kapalina volně dostává do místa řezu.



**Obr. 40: Návrh chladicích kanálků varianta 1**

U druhé varianty návrhu chlazení je znovu chladicí kapalina dopravována nejprve jedním hlavním kanálkem, který se následně znovu dělí na dva menší kanálky. Ty mají upravený tvar, aby co nejlépe navazovaly na vybroušenou drážku ve fréze, která slouží k vedení kapaliny do místa řezu.



**Obr. 41: Návrh chladících kanálků varianta 2**

Očekává se, že tímto řešením bude dosaženo velmi vysoké efektivity chlazení a výplachu při obrábění těžkoobrobitelných materiálů sk. S především v oblasti frézování úzkých dutin a drážek s využitím moderních programovacích principů jako např. iMachining.

## **4 Zhodnocení výsledků a doporučení**

V průběhu diplomové práce bylo provedeno několik experimentů, které měly za cíl zjistit vhodné procesní parametry pro tisk martenzitické oceli s označením MS1 na slinutý karbid od firmy Ceratizit s označením CTS20D.

V průběhu všech experimentů byly zkoušeny různé variace procesních parametrů. Experimenty byly koncipovány tak, že prvních 8 vrstev bylo tisknuto s navrženými parametry, zbytek tisknutých válečků byl tisknut standardními parametry pro materiál MS1. Prvních 8 vrstev mělo zajistit dobrou adhezi ke slinutému karbidu. Další vrstvy pak již využívaly výrobcem doporučené standardní parametry pro martenzitickou ocel od společnosti EOS s označením MS1.

V průběhu prvního, a následně druhého experimentu bylo prokázáno, že při nastavení příliš vysokého výkonu laseru dojde k přehřátí a následné delaminaci, zdeformování a odtržení okrajových vrstev. Tomu nezabránil ani uměle prodloužený čas tisku jednotlivých vrstev. Bylo také prokázáno, že opískování válečků nevede k lepší adhezi tisknutého prášku ke slinutému karbidu. Výsledky takových válečků byly velice podobné těm neopískovaným, které byly tištěné se stejnými procesními parametry.

Kvůli odtrhávání okrajových částí vzorků (viz obr. 27, str. 46) byla přenastavena strategie tisku. Standardní strategie tisku v pruzích způsobovala velké přehřívání v okrajových oblastech. Laserový paprsek totiž sinteroval kruhovou plochu válečků v několika pruzích, z nichž ty okrajové byly v některých případech příliš tenké, takže laserová energie byla do nich dodávána pouze zlomek sekundy a na velmi malé ploše. Kvůli tomu, že nebylo možné ani zvětšením šířky pruhů zajistit to, že se váleček bude tisknout v jednom pruhu, byla tato strategie změněna na

strategii bez pruhů. To zajistilo lepší rozložení tepla od laserového paprsku, a tím eliminaci tohoto problému.

Z provedených experimentů vyplývá, že lze vyloučit i vliv vzdálenosti šrafování na výsledky tisku. Ty byly měněny u vybraných parametrů tisku, ale žádný výrazný efekt směrem ke zlepšení nepřinesly. Při jednom z experimentů byla vypnuta standardně používaná dvojitá expozice první vrstvy. Ta obecně slouží k lepší adhezi první vrstvy k tiskové platformě, ale při experimentu bylo při ní zaznamenáno určité přehřívání. Jedna expozice ale nepřinesla žádné průkazné zlepšení tiskového procesu, a proto byla standardní dvojitá expozice první vrstvy znovu obnovena.

Při jednotlivých tiskových úlohách při nižších výkonech laseru docházelo většinou k bezproblémovému natisknutí všech osmi vrstev navrženými procesními parametry. Problém nastal až při tisku dalších vrstev, které byly tisknuty běžnými parametry pro materiál MS1. Z důvodu eliminování teplotního šoku na rozhraní při změně parametrů, byla platforma předehřáta na 150°C. To ale prokazatelný efekt nemělo a znovu při začátku tisknutí vrstev běžnými parametry pro MS1 docházelo k přehřívání a následnému odtržení vrstev. Z tohoto důvodu byly zvoleny perspektivní parametry z předchozího experimentu a proveden tisk všech vrstev navrženými parametry. To se ukázalo jako dobré řešení, protože takto tisknuté vzorky vydržely tisk všech vrstev. (viz. obr. 29, str. 49)

Na jednom ze vzorků, na obrázku označeném číslem 3, provedena zkouška tahem, při níž bylo zjištěno, že maximální napětí, které je váleček schopný snést, je 24,2 kN, tedy 214 MPa.

V další části bylo navrženo vnitřní chlazení frézy. Pro návrh chlazení byla využita řešerše v teoretické části. Základ vnitřního chlazení frézy je jeden hlavní kanálek, který vede od upínací části a následně se rozděluje na dva menší kanálky. Ty v prvním případě ústí u šroubovice, pomocí níž je následně kapalina dopravována do místa řezu. Kanálky mají optimalizovaný tvar z důvodu lepšího a efektivnějšího přívodu kapaliny do místa řezu.

Ve druhé variantě je do řezné části frézy vybroušena drážka, pomocí které se chladicí kapalina bude dostávat do místa řezu. I v tomto případě je tvar kanálku optimalizován pro co nejefektivnější chlazení při obrábění.

Nástroj nebylo možno z časových důvodů vyrobit, protože problematika optimalizace procesních parametrů trvala déle, než bylo předpokládáno. Nástroj bude vytisknut, bohužel do vytisknutí diplomové práce se tento krok již nepodařilo realizovat.

## **Doporučení**

Z výše popsaných zhodnocení výsledků všech experimentů je možné určit další směr. V dalších experimentech by bylo dobré navázat na zjištění, která se ukázala pro úspěšný tisk jako vhodná nebo dokonce nezbytná.

Jednoznačně kladně lze hodnotit strategii tisku, kdy při tisku bez pruhů již nedocházelo k částečnému přehřívání okrajů válečků, respektive k jejich vylamování. Dalším zjištěním bylo, že při vysokém výkonu laseru dochází k velkému přehřívání a následné delaminaci vrstev.

Pro další tisk je žádoucí co nejvíce eliminovat teplotní šoky. Jak bylo v praktické části práce dokázáno, ty vedou k pnutí a následnému vzniku trhlin na rozhraní slinutého karbidu s kovovým materiálem. Proto by bylo vhodné zjistit, do jaké míry má pozitivní vliv předehřev platformy na eliminaci vzniku trhlin z důvodu teplotních šoků.

Pro správný tisk je také žádoucí, zajistit rovinnost nanesených vrstev tak, aby docházelo ke správné sinteraci jednotlivých vrstev a vznikl tak homogenní materiál.

Ve vytisknutých strukturách tisknutých modifikovanými parametry, bylo možné pozorovat vzniklé velké póry. Ty mají špatný vliv na mechanické vlastnosti a bylo by dobré zlepšit proces tisku tak, aby se tento jev minimalizoval. Dalším doporučením je detailně prozkoumat, do jaké vrstvy (resp. tloušťky) je účelné používat modifikované procesní parametry a od jaké vrstvy je vhodné začít tisknout standardními parametry vhodnými pro materiál MS1, aby bylo možné vyrobit funkční a dostatečně kvalitní nástroj.

Posledním doporučením je ověřit účelnost použití druhé přechodové vrstvy, která by byla vytvořena pomocí konzervativnějších, ale přesto efektivních parametrů (tj. parametrů použitelných pro tisk oceli MS1, ale s nižším výkonem a rychlostí, než jaké jsou standardně používány při objemovém tisku), které zaručují vytvoření kvalitního kovového materiálu bez pórů. Taková vrstva by pak buď mohla tvořit přechod mezi vrstvou vytvořenou pomocí v této práci nalezených modifikovaných parametrů a mezi vrstvami vytvořenými se standardními parametry nebo by tyto standardní parametry mohla ve zbylých tištěných vrstvách nahradit zcela.

## 5 Závěr

Předmětem této diplomové práce bylo pomocí experimentů optimalizovat nastavení procesních parametrů 3D tisku tak, aby se na řeznou část frézy ze slinutého karbidu mohla natisknout upínací část z oceli MS1. Dalším cílem bylo optimalizovat vnitřní chlazení dvoubřité frézy. Toto spojení těchto dvou materiálů pomocí aditivní technologie je zcela unikátní a představuje nové možnosti a nová řešení. Umožňuje například tisk fréz s lepšími užitnými vlastnostmi nebo právě větší možnosti v optimalizaci vnitřních chlazení.

V první kapitole diplomové práce je obecně popsán 3D tisk kovů a představeny jeho jednotlivé metody. Součástí je i shrnutí s přehledem hlavních výhod a nevýhod 3D tisku kovů. Na tuto část navazuje kapitola s materiály, se kterými se při experimentech pracuje, a jejich vlastnostmi. V další části je popsáno nastavování procesu 3D tisku. To je velmi důležité, neboť bez pochopení jednotlivých principů nelze správně procesní parametry pro úspěšný tisk nastavit. Na tuto problematiku navazuje představení současných trendů přívodu procesní kapaliny u rotačních nástrojů.

Po teoretickém rozboru následuje praktická část diplomové práce. Ta je rozdělena na tři hlavní kapitoly. V té první jsou popsána zařízení, které byla při experimentech použita. Na to navazuje detailní popsání používaných materiálů. Dále byl představen proces přípravy 3D tisku a zároveň softwaru pro monitorování celého průběhu 3D tisku. V závěru první kapitoly byly představeny jednotlivé strategie tisku.

Druhá kapitola praktické části byla zaměřena na optimalizaci procesních parametrů 3D tisku martenzitické oceli a s označením MS1 a slinutého karbidu CTS20D. Cílem bylo nastavení procesních parametrů a celého tisku tak, aby se na řeznou část frézy ze slinutého karbidu mohla natisknout upínací část z prášku martenzitické vytvrditelné oceli s označením MS1. K tomu bylo využito pěti experimentů, u kterých byly postupně na základě získávaných informací upravovány procesní parametry. Díky tomu bylo zjištěno mnoho cenných poznatků, které mohou pomoci v dalších výzkumech tohoto směru.

V poslední kapitole byly představeny dva návrhy vnitřního chlazení fréz. Chladicí kanálky byly v upínací části optimalizovány tak, aby přívod chladicí kapaliny do místa řezu byl co nejefektivnější. K tomu by měl sloužit upravený tvar chladících kanálku, který by měl zajistit účinné chlazení břitu a dobrý odvod třísek z místa řezu.

V závěrečné kapitole došlo ke zhodnocení výsledků praktické části. Tato diplomová práce ukázala možnosti a úskalí tisku již zmíněných materiálů. Došlo k úspěšnému natisknutí práškového materiálu MS1 na slinutý karbid. Vybrané vzorky byly ověřeny pomocí tahové zkoušky a metalografické analýzy. Jednotlivé zkoušky již vytisknutých materiálů ukázaly dobré vlastnosti výsledné frézy, avšak ještě bude nezbytná další optimalizace procesních parametrů tisku. Na vytisknutých válečcích bylo možné pozorovat větší množství pórů zejména na rozhraní mezi slinutým karbidem a tisknutým materiálem. V závěru této kapitoly byla představena doporučení, která mohou posloužit jako vodítko při dalším výzkumu v tomto směru.

Nástroj bohužel nebylo možno z důvodu velkého vytížení tiskárny vyrobit do vytisknutí diplomové práce, a to z důvodu, že pro nalezení vhodných parametrů bylo potřeba více experimentů, než se předpokládalo.

Výsledky ukázaly že lze tuto práci považovat za úspěšnou, neboť došlo k naplnění zadaných cílů v úvodu. Získané výsledky mají přínos nejen pro akademickou sféru, ale i pro praktické

použití v podobě již zmíněné výroby fréz. V práci jsou představeny poznatky, které zatím nebyly nikde publikovány. Ty se opírají o experimenty, které byly v práci představeny.

Takovéto spojení dvou materiálů pomocí aditivní technologie přináší velké možnosti a uplatnění v různých aplikacích.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] DEBROY, T, T MUKHERJEE a KOL. Scientific, technological and economic issues in metal printing and their solutions. *Nature materials* [online]. 2019 [cit. 2021-2-25]. Dostupné z: [www.nature.com/articles/s41563-019-0408-2](http://www.nature.com/articles/s41563-019-0408-2)
- [2] Sandvik creates first 3D printed diamond composite. *Additive.sandvik* [online]. 2019 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://www.additive.sandvik/en/news-trends/archive/2019/05/sandvik-creates-first-3d-printed-diamond-composite/>
- [3] CERATIZIT Wins Innovation Award. *Fabricating and metal working* [online]. [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://www.fabricatingandmetalworking.com/2020/12/ceratizit-wins-innovation-award/>
- [4] PADMAKUMAR, M. Additive Manufacturing of Tungsten Carbide Hardmetal Parts by Selective Laser Melting (SLM), Selective Laser Sintering (SLS) and Binder Jet 3D Printing (BJ3DP) Techniques. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing* [online]. 2020, 7(1), 338-371 [cit. 2021-3-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40516-020-00124-0>
- [5] Mutua, J.M., 2018. 3D Additive Manufacturing, Microstructure, and Mechanical Properties of High Performance Materials (Doctoral dissertation)
- [6] SHAKERIN, Sajad, Amir HADADZADEH a KOL. Additive manufacturing of maraging steel-H13 bimetal using laser powder bed fusion technique. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100797>
- [7] EBRAHIMI, Elireza a Mohsen MOHAMMADI. Numerical tools to investigate mechanical and fatigue properties of additively manufactured MS1-H13 hybrid steels. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, 381-393 [cit. 2021-2-8]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.07.009>
- [8] MUTUA, James, Shinya NAKATA a KOL. Optimization of selective laser melting parameters and influence of post heat treatment on microstructure and mechanical properties of maraging steel. *Materials & Design* [online]. 2018, , 486-497 [cit. 2021-3-30]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.042>
- [9] CHEN, Jian, Miaojun HUANG a KOL. Microstructure analysis of high density WC-Co composite prepared by one step selective laser melting. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. 2019 [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.104980>
- [10] HERZOG, Dirk, Vanessa SEYDA a KOL. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* [online]. 2016, 371-392 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>
- [11] Laserové práškové navařování (LMD). *Trumpf* [online]. [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/reseni/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-deposition-lmd/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-deposition-lmd/)

- [12] SELCUK, C. Laser metal deposition for powder metallurgy parts. *Powder Metallurgy* [online]. 2011, 94-99 [cit. 2021-3-5]. Dostupné z: [https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/174329011X12977874589924?casa\\_token=NzUKkbrmQ3EAAAAA%3AKXQIvUP\\_XTmOAIjPVECdTnsKsAs-rCNQgADLY5K0z6S3GyTlvanRt\\_6cNMWVkdQ0p6vloVb2NU4VjgM](https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/174329011X12977874589924?casa_token=NzUKkbrmQ3EAAAAA%3AKXQIvUP_XTmOAIjPVECdTnsKsAs-rCNQgADLY5K0z6S3GyTlvanRt_6cNMWVkdQ0p6vloVb2NU4VjgM)
- [13] 10 Advantages of 3D Printing. *Makerbot* [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/stories/engineering/advantages-of-3d-printing/>
- [14] PEARSON, Amada. 10 Disadvantages of 3D Printing Technology. *3D insider* [online]. 2018 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printing-disadvantages/>
- [15] HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje [online]. Studijní opory. VUT-FSI v Brně, ÚST, Odbor technologie obrábění. 2006 [cit. 2021-02-16]. Dostupný z WWW: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat\\_pro\\_rez\\_nastroje/materialy\\_pro\\_rezne\\_nastroje\\_v2.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf)
- [16] BAK, Tomáš. *Degradace slinutých karbidů* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/20314/1/VACA\\_Tomas\\_Bak.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/20314/1/VACA_Tomas_Bak.pdf). Bakalářská práce. ZČU Plzeň.
- [17] Výroba a ostření speciálních VHM a HSS nástrojů. *Carbide* [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.carbide.cz>
- [18] How process parameters drive successful metal AM part production. *Metal AM* [online]. 2018 [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/articles/70927-2/>
- [19] WEBER, S, J MONTERO a KOL. PARAMETERS ON SUPPORT STRUCTURE DESIGN FOR METAL ADDITIVE MANUFACTURING. *Cambridge University Press* [online]. 2020 [cit. 2021-4-18]. Dostupné z: 10.1017/dsd.2020.14
- [20] NOZAR, Martin a Ivana ZETKOVÁ. *SEARCHING FOR FAVOURABLE POWDER BED FUSION SETTINGS IN SINTERING OF MARAGING STEEL MS1* [online]. In: . 2018 [cit. 2021-4-10]. ISBN 978-3-902734-20-4. ISSN 1726-9679. Dostupné z: 10.2507/29th.daaam.proceedings.113
- [21] FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-2374-9.
- [22] Vysokotlaké chlazení pro obráběcí stroje. *Fokus Industry* [online]. [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: <https://fokusindustry.cz/i/?CNC+obr%C3%A1b%C4%9Bc%C3%AD+stroje/vysokotlak%C3%A9+chlazen%C3%AD+pro+obr%C3%A1b%C4%9Bc%C3%AD+stroje>
- [23] Moderní trendy ve vývoji obráběcích kapalin. *Mm spektrum* [online]. 2005 [cit. 2021-2-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-trendy-ve-vyvoji-obrabecich-kapalin>
- [24] MONKOVA, Katarina, Ivana ZETKOVA a KOL. Study of 3D printing direction and effects of heat treatment on mechanical properties of MS1 maraging steel. *Archive of Applied Mechanics* [online]. 2019, , 791-804 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00419-018-1389-3>
- [25] Úspora času a nákladů s technologií MQL. *Mm spektrum* [online]. 2013 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/uspora-casu-a-nakladu-s-technologie-mql.html>



- [26] Additive manufacturing by Industry Sectors. *Research gate* [online]. [cit. 2021-1-30]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Additive-manufacturing-by-Industry-Sectors\\_fig1\\_333997792](https://www.researchgate.net/figure/Additive-manufacturing-by-Industry-Sectors_fig1_333997792)
- [27] Functional scheme of Direct Metal Laser Sintering process. *Research gate* [online]. [cit. 2021-2-30]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Functional-scheme-of-Direct-Metal-Laser-Sintering-process\\_fig1\\_313582358](https://www.researchgate.net/figure/Functional-scheme-of-Direct-Metal-Laser-Sintering-process_fig1_313582358)
- [28] Navařování. *Wikipedia* [online]. [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/Laserov%C3%A9\\_nava%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/Laserov%C3%A9_nava%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD.png)
- [29] Návod na obrábění polotovarů technických plastů. *Plastum* [online]. [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: <https://plastum.cz/navod-na-obrazeni/>
- [30] TK vrták s vnitřním chlazením 3xD AlTiN. *Carbide* [online]. [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: <https://www.carbide.cz/produkty/vrtaky/tk-vrtak-s-vnitr-chlaz-3xd-aitin/tk-vrtak-s-vnitrnim-chlazenim-3xd-altin-s592242583>
- [31] CoroMill 690. *Sandvik* [online]. [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: [https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill\\_690/pages/default.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/coromill_690/pages/default.aspx)
- [32] EOS M290. *3r systems* [online]. [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <http://www.3rsystems.cz/3d-tisk-kovu/eos-m290>
- [33] Anca - MX7 Linear. *Alba precision* [online]. [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: <http://albaprecision.cz/cz/portal/produkty/anca/mx7-linear/>
- [34] CERATIZIT \Cutting materials.CERATIZIT[online]. Mamer: Ceratizit, 2018, 2018 [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://www.ceratizit.com/en/products/metal-cutting/cutting-materials/>
- [35] *EOS Releases EOSTATE Exposure OT* [online]. 19.června 2017 [cit. 2021--15]. Dostupné z: <https://additivemanufacturing.com/2017/06/19/eos-releases-eostate-exposure-ot-optical-tomography-ot-for-real-time-monitoring-of-metal-based-additive-manufacturing-am/>
- [36] EOS Introduces EOSTATE Exposure OT. *3D print* [online]. 17.června 2017 [cit. 2021-4-7]. Dostupné z: <https://3dprint.com/178624/eos-eostate-exposure-ot/>
- [37] Additive Manufacturing Process Monitoring Flexible Quality Assurance for 3D Printer. *EOS* [online]. [cit. 2021-4-9]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/software-3d-printing/monitoring-software>
- [38] HAJNYS, Jiří, Marek PAGÁČ a KOL. Influence of Scanning Strategy Parameters on Residual Stress in the SLM Process According to the Bridge Curvature Method for AISI 316L Stainless Steel. *Materials* [online]. 2020, 13(7) [cit. 2021-4-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma13071659>

## Seznam příloh

Příloha č. 1 – Materiálový list MS1 - EOS

## **PŘÍLOHA č. 1**

**Materiálový list MS1 – EOS**



## Material data sheet

---

### EOS MaragingSteel MS1

EOS MaragingSteel MS1 is a tool steel powder intended for processing on EOS DMLS™ systems.

This document provides information and data for parts built using EOS MaragingSteel MS1 powder (EOS art.-no. 9011-0016) on the following system specifications:

- EOS DMLS™ EOS M290 system
  - Ceramic blade (2200-3013)
  - Grid nozzle (2200-5501)
  - Nitrogen atmosphere
  - IPCM extra sieving module with 63 µm mesh recommended
- EOSYSTEM:
  - EOSPRINT v 1.5 (Build9) or higher
  - HCS v 2.5.22 or higher
- EOS Parameter set: MS1\_040\_FlexM290\_200

### Description

Parts built in EOS MaragingSteel MS1 have a chemical composition following US classification 18% Ni Maraging 300, European 1.2709 and German X3NiCoMoTi 18-9-5. This kind of steel is characterized by having very good mechanical properties, and being easily heat-treatable using a simple thermal age-hardening process to obtain excellent hardness and strength.

Parts built from EOS MaragingSteel MS1 are easily machinable after the building process and can be easily post-hardened to more than 50 HRC by age-hardening at 490 °C (914 °F) for 6 hours. In both as-built and age-hardened states the parts can be machined, spark-eroded, welded, micro shot-peened, polished and coated if required. Due to the layerwise building method, the parts have a certain anisotropy, which can be reduced or removed by appropriate heat treatment - e.g. solution treatment at 940 °C (1724 °F) for 2 hours - see Technical Data for examples.



## Material data sheet

---

### Technical Data

#### Powder properties

The chemical composition of the powder (wt-%):

---

#### Material composition

---

Element	Min	Max
Fe	Balance	
Ni	17.00	19.00
Co	8.50	9.50
Mo	4.50	5.20
Ti	0.60	0.80
Al	0.05	0.15
Cr	-	0.50
Cu	-	0.50
C		0.03
Mn		0.10
Si		0.10
P		0.01
S		0.01

---

#### Max. particle size

---

> 63µm [1]

max 0.5 wt.-%

---

[1] Sieve analysis according to ASTM B214.



## Material data sheet

### General process data

Layer thickness	40 $\mu\text{m}$
Volume rate [2]	4.2mm <sup>3</sup> /s (15.2cm <sup>3</sup> /h)

- [2] The volume rate is a measure of build speed during laser exposure of the skin area. The total build speed depends on this volume rate and many other factors such as exposure parameters of contours, supports, up and downskin, recoating time, Home-In or LPM settings.

### Physical and chemical properties of parts

Part density [3]	8.0-8.1 g/cm <sup>3</sup>
Part accuracy [4]	
Small parts	Approx. $\pm 50 \mu\text{m}$
Large parts	Approx $\pm 0.1 \%$
Min. wall thickness [5]	Approx. 0.3 - 0.4 mm
Surface roughness after shot peening [6]	
	Ra 4-6.5 $\mu\text{m}$ ; Rz 20-50 $\mu\text{m}$

- [3] Weighing in air and water according to ISO 3369.
- [4] Based on users' experience of dimensional accuracy for typical geometries, e.g.  $\pm 50 \mu\text{m}$  when parameters can be optimized for a certain class of parts or  $\pm 0.1\%$  when building a new kind of geometry for the first time or building larger parts. Part accuracy is subject to appropriate data preparation and postprocessing.
- [5] Mechanical stability is dependent on geometry (wall height etc.) and application.
- [6] Measurement according to ISO 4287. Due to the layerwise building the roughness strongly depends on the orientation of the surface, for example sloping and curved surfaces exhibit a stair-step effect.

### Hardness in heat treated status [7]

Hardness Rockwell C [8]	50-57 HRC
-------------------------	-----------

- [7] Heat treatment procedure: solution treatment at 940 °C (1724 °F) for 2 hours, air cooling + ageing at 490 °C for 6 hours, air cooling.
- [8] Rockwell C (HRC) hardness measurement according to EN ISO 6508-1 on polished surface.



## Material data sheet

### Tensile properties at room temperature [9, 10, 11]

	Heat treated [7]	
	Horizontal	Vertical
Ultimate tensile strength, Rm	2080 MPa	2080 MPa
Yield strength, Rp0.2	2010 MPa	2000 MPa
Elongation at break, A	4 %	4 %

[9] Tensile testing according to. ISO 6892-1 B10, proportional test pieces, diameter of the neck area 5 mm (0.2 inch) , original gauge length 25 mm (1 inch). Results are derived from the validation data made with EOS M290 system and two powder LOTs.

[10] Solution and ageing treatments are needed in order to achieve corresponding mechanical properties. The numbers are average values determined from samples with horizontal and vertical orientation respectively.

[11] Mechanical properties depend on the thermal load of particular job layout as well as the positioning on the platform.



## Material data sheet

---

### Abbreviations

Min.	Minimum
Max.	Maximum
Approx.	Approximately
Wt.	Weight

The quoted values refer to the use of this material with above specified type of EOS DMLS system, EOSYSTEM software version, parameter set and operation in compliance with parameter sheet and operating instructions. Part properties are measured with specified measurement methods using defined test geometries and procedures.

Further details of the test procedures used by EOS are available on request. Any deviation from these standard settings may affect the measured properties.

The data correspond to EOS knowledge and experience at the time of publication and they are subject to change without notice as part of EOS' continuous development and improvement processes. EOS does not warrant any properties or fitness for a specific purpose, unless explicitly agreed upon. This also applies regarding any rights of protection as well as laws and regulations.

EOS<sup>®</sup>, EOSINT<sup>®</sup>, DMLS<sup>®</sup>, DirectTool<sup>®</sup> and DirectPart<sup>®</sup> are registered trademarks of EOS GmbH.

© 2017 EOS GmbH - Electro Optical Systems. All rights reserved