

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270014 – Materiálové inženýrství a výrobní technologie

Studijní specializace: N0715A270014S00 – Materiálové inženýrství a výrobní technologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Post-processing 3D tištěných dílů

Autor: Bc. Jakub Mocek

Vedoucí práce: Ing. David Bricín, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub MOCEK**
Osobní číslo: **S21N0018K**
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**
Téma práce: **Post-processing 3D tištěných dílů**
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Technologie 3d tisku a jejich aplikace
2. Materiály pro 3d tisk a jejich rozdělení
3. Vlastnosti tištěných dílů, vliv způsobu tisku na dosahované vlastnosti výrobku
4. Technologie a možnosti dodatečných úprav vlastností výrobků získaných 3d tiskem
5. Experimentální program
6. Hodnocení vlivu tepelného zpracování na vlastnosti výrobku získaného různými technologiemi 3d tisku z různých typů technicky významných materiálů
7. Diskuse výsledků
8. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

VENUVINOD, Patri K. a Weiyin MA. Rapid Prototyping. (2004). Boston, MA: Springer US. ISBN 978-1-4419-5388-9.

SAMES, W. J., LIST, F. A., PANNALA, S., DEHOFF, R. R., BABU, S. S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, International Materials Reviews. (2016).

GU, D. Laser Additive Manufacturing (AM): Classification, Processing Philosophy, and Metallurgical Mechanisms. (2015). DOI: 10.1007/978-3-662-46089-4_2. ISBN 978-3-662-46088-7.

Kumbhar, N.N., Mulay, A.V. Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review. J. Inst. Eng. India Ser. C 99, 481-487 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40032-016-0340-z>.

LEACH, Richard a Simone CARMIGNATO, LEACH, Richard a Simone CARMIGNATO, ed. Precision Metal Additive Manufacturing [online]. First edition. | Boca Raton, FL: CRC Press: CRC Press, 2020 [cit. 2021-04-14]. ISBN 9780429436543. Dostupné z: doi:10.1201/9780429436543.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. David Bricín, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Antonín Rudolf**
ŠKODA JS a.s.

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

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Ing. Josef Odehnal, Ph.D.
vedoucí katedry

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

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu této práce Ing. Davidu Bricínovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Antonínu Rudolfovi za odborné vedení, poskytnutý čas a rady při tvorbě této diplomové práce. Mé poděkování patří i rodině a blízkým za podporu během studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Mocek	Jméno Jakub	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Bricín, Ph.D.	Jméno David	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Post-processing 3D tištěných dílů		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	96	TEXTOVÁ ČÁST	88	GRAFICKÁ ČÁST	8
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Diplomová práce je zaměřena na metody post-processingu pro 3D výtisky z kovových materiálů a plastů. Cílem této práce byl také návrh a výroba zkušebních vzorků z těchto materiálů. Na zkušební vzorky byly dále aplikovány navržené metody post-processingu a byly ověřeny požadované vlastnosti.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>jaderné strojírenství, post-processing, 3D tisk, kovy, plasty, AISI 316L, ASA, tepelné zpracování</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Mocek	Name Jakub	
STUDY PROGRAMME	N0715A270014 Materials Science and Manufacturing Technology		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Bricín, Ph.D.	Name David	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Post-processing of 3D printed parts		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	96	TEXT PART	88	GRAPHICAL PART	8
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis is focused on post-processing methods for 3D prints from metallic materials and plastics. The aim of this work was also the design and production of test samples from these materials. Furthermore, the proposed post-processing methods were applied to the test samples and the required properties were verified.
KEY WORDS	nuclear engineering, post-processing, 3D printing, metals, plastics, AISI 316L, ASA, heat treatment

Obsah

Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	13
1 Úvod.....	15
2 Úvod do oblasti 3D tisku.....	16
2.1 Historie a současný stav 3D tisku.....	16
2.1.1 Tisk kovových materiálů.....	16
2.2 Definice základních pojmů tisku	17
3 Metody výroby 3D tištěných dílů.....	17
3.1 Extruze materiálu.....	17
3.1.1 FDM (Fused Deposition Modeling) a FFF (Fused Filament Fabrication).....	19
3.2 Spékání práškové vrstvy	19
3.2.1 SLS (Selective Laser Sintering)	21
3.2.2 SLM (Selective Laser Melting) a DMLS (Direct Metal Laser Sintering)	21
3.3 Přímé energetické nanášení	22
4 Materiály pro 3D tisk	23
4.1 Tiskové filamenty	23
4.1.1 PLA	24
4.1.2 PET/PETG.....	24
4.1.3 ABS	25
4.1.4 ASA.....	26
4.1.5 PEEK.....	27
4.2 Kovové prášky	27
4.2.1 MS1	28
4.2.2 AISI 316L.....	29
5 Vady u tištěných dílů.....	31
5.1 Tloušťka vrstvy.....	31
5.2 Anizotropní vlastnosti dílů	32

5.3	Hustota.....	32
5.4	Zbytkové napětí	33
5.5	Pórovitost.....	33
6	Metody post-processingu tištěných dílů.....	34
6.1	Omílání (vyhlazení a leštění).....	35
6.2	HIP.....	36
6.3	Tepelné zpracování.....	39
6.3.1	Tepelné zpracování plastů.....	39
6.4	Žihání kovů.....	41
6.4.1	Žihání oceli AISI 316L	42
7	Mechanické zkoušky	44
7.1	Tahová zkouška (předepsána normou ČSN EN ISO 6892-1) [43]	44
7.2	Zkouška tvrdosti podle Vickerse [49]	46
8	Úvod do experimentální části.....	47
9	Tepelné zpracování výtisků.....	49
9.1	Tepelné zpracování kovových výtisků	50
9.2	Tepelné zpracování plastových výtisků.....	51
9.2.1	Přímočará výplň	52
9.2.2	Včelí plástve.....	52
10	Měření mechanických vlastností.....	53
10.1	Tahová zkouška	53
10.1.1	Výsledky tahové zkoušky pro ocel AISI 316L	54
10.1.2	Výsledky tahové zkoušky pro plastové vzorky.....	58
10.2	Tvrdost	62
10.3	Pórovitost	64
10.4	Textura povrchu	70
10.4.1	Drsnost povrchu	70
10.4.2	Výškové parametry [49].....	73

10.4.3	Objem výstupků a prohlubní [49]	74
10.4.4	Obecné shrnutí výsledků	76
11	Metalografická analýza	77
11.1	Pozorování mikrostruktury	78
11.1.1	Mikrostruktura oceli AISI 316L bez tepelného zpracování	78
11.1.2	Mikrostruktura po tepelném zpracování	79
11.1.3	Mikrostruktura po HIP a HIP s tepelným zpracováním.....	80
12	Fraktografická analýza	81
13	Závěr.....	83
14	Seznam použitých zdrojů	84
15	Seznam příloh.....	88

Přehled použitých zkratk a symbolů

a.s.	akciová společnost
s.r.o.	společnost s ručením omezeným
3D	trojrozměrný
např.	například
TZ	tepelné zpracování
DP	diplomová práce
obr.	obrázek
tab.	tabulka
atd.	a tak dále
Kč	koruna česká
mil.	milion
UV	ultrafialové záření
tzv.	takzvaný
VŠB	Vysoká škola báňská
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
FST	Fakulta strojní
KMM	Katedra materiálů a strojírenské metalurgie
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni

Seznam obrázků

Obr. 1: Nanášení jednotlivých vrstev materiálu pomocí extruze materiálu [9]	18
Obr. 2: Vznik jednotlivých vrstev technologií spékání práškových vrstev [9].....	20
Obr. 3: Vytváření jednotlivých vrstev pomocí technologie DED [9]	22
Obr. 4: Schodovitý efekt [5].....	31
Obr. 5: Působení napětí na jednotlivé vrstvy dílů [30]	32
Obr. 6: Typy pórovitostí [33]	34
Obr. 7: Zařízení pro omílání obrobků [32].....	36
Obr. 8: Brusiva z plastových materiálů [32]	36
Obr. 9: Schéma zařízení a procesu HIP [35].....	37
Obr. 10: Únavové chování Ti-6Al-4V tisknutý metodou SLM [35].....	39
Obr. 11: Pevnost vybraných materiálů po tepelném zpracování [37]	41
Obr. 12: Pracovní diagram zkoušky tahem [44]	45
Obr. 13: Vzorky od společnosti Škoda JS.....	47
Obr. 14: Návrh zkušební vzorku s kruhovým průřezem	48
Obr. 15: Návrh plochého zkušební vzorku.....	48
Obr. 16: Tepelně nezpracovaný vzorek.....	50
Obr. 17: Průběh teploty a tlaku při HIP	51
Obr. 18: Přímočará výplň [42]	52
Obr. 19: Výplň se svislými šestibokými hranoly [42]	53
Obr. 20: Zkušební vzorek z oceli AISI 316L po tahové zkoušce	54
Obr. 21: Grafické záznamy tahových zkoušek vzorků bez tepelného zpracování.....	57
Obr. 22: Grafické záznamy tahových zkoušek tepelně zpracovaných vzorků při teplotě TZ 1 a TZ 2.....	58
Obr. 23: Grafické záznamy tahových zkoušek vzorků s HIP či s HIP a tepelným zpracováním	58
Obr. 24: Grafické záznamy tahových zkoušek tepelně nezpracovaných plastových vzorků... 61	61

Obr. 25: Grafické záznamy tahových zkoušek tepelně zpracovaných plastových vzorků	61
Obr. 26: Plastové zkušební vzorky po tahové zkoušce	62
Obr. 27: Ukázka pórovitost vzorku bez tepelného zpracování	68
Obr. 28: Ukázka pórovitost vzorku po tepelném zpracování při teplotě TZ 1.....	69
Obr. 29: Ukázka pórovitost vzorku po tepelném zpracování při teplotě TZ 2.....	69
Obr. 30: Schématické znázornění parametrů drsnosti povrchu [48].....	72
Obr. 31: Mikrostruktura vzorku oceli AISI 316L bez tepelného zpracování.....	78
Obr. 32: Mikrostruktura po tepelném zpracování při teplotě TZ 1	79
Obr. 33: Mikrostruktura po tepelném zpracování při teplotě TZ 2.....	79
Obr. 34: Mikrostruktura po HIP	80
Obr. 35: Mikrostruktura po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 1	80
Obr. 36: Vyhodnocení lomové plochy vzorku bez tepelného zpracování	81
Obr. 37: Mikrostruktura lomové plochy vzorku bez tepelného zpracování.....	82
Obr. 38: Mikrostruktura lomové plochy vzorku po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 2	83

Seznam tabulek

Tab. 1: Shrnutí informací o technologii tisku pomocí extruze materiálu [9], [11], [12].....	18
Tab. 2: Shrnutí informací o metodě tisku s využitím spékání práškové vrstvy [9], [11], [14]	20
Tab. 3: Shrnutí informací o technologii tisku s využitím DED [9].....	23
Tab. 4: Základní parametry pro tisk PLA [15], [16]	24
Tab. 5: Základní parametry pro tisk PETG [17], [18].....	25
Tab. 6: Základní parametry pro tisk ABS [19], [20].....	26
Tab. 7: Základní parametry pro tisk ASA [21], [22].....	26
Tab. 8: Základní parametry pro tisk PEEK [23]	27
Tab. 9: Vlastnosti oceli MS1 [26]	29
Tab. 10: Chemické složení oceli MS1 [hmotnostní %] [27].....	29

Tab. 11: Vlastnosti oceli AISI 316L [28], [29]	30
Tab. 12: Chemické složení oceli AISI 316L [hmotnostní %] [29]	31
Tab. 13: Teplota skelného přechodu u vybraných materiál [37].....	40
Tab. 14: Mechanické vlastnosti oceli AISI 316L po tepelním zpracování	43
Tab. 15: Tabulka mechanických vlastností po HIP či HIP s následným tepelným zpracováním [36]	43
Tab. 16: Základní veličiny pro zkoušku tahem	44
Tab. 17: Návrhy tepelných zpracování	49
Tab. 18: Specifikace pece VMK 22 Dental [41].....	50
Tab. 19: Shrnutí výsledků tahových zkoušek zkušebních vzorků z oceli AISI 316L.....	57
Tab. 20: Shrnutí výsledků tahových zkoušek plastových zkušebních vzorků	60
Tab. 21: Shrnutí výsledků zkoušek tvrdosti zkušebních vzorků z oceli AISI 316L	64
Tab. 22: Souhrn analýzy pórovitosti	66
Tab. 23: Souhrn analýzy tvaru pórů	68
Tab. 24: Základní veličiny pro měření drsnosti povrchu [47], [48].....	71
Tab. 25: Výsledné parametry drsnosti.....	73
Tab. 26: Základní veličiny pro měření výškových parametrů [49].....	73
Tab. 27: Výsledné parametry prostorového hodnocení	74
Tab. 28: Základní veličiny pro měření objemu výstupků a prohlubní	75
Tab. 29: Výsledné parametry objemového hodnocení výstupků a prohlubní.....	76
Tab. 30: Shrnutí nastavených parametrů při elektrolytickém leptání	78

1 Úvod

Tato práce vznikla ve spolupráci se společností Škoda JS a.s., která se v současné době zabývá myšlenkou využití 3D tisku pro vybrané strojní součásti používané v energetickém sektoru. Aplikace aditivních technologií, by v těchto případech umožnila uzpůsobit tvar součástí tak, aby lépe vyhovovaly svému použití. Použití aditivních technologií s sebou však přináší i určitá úskalí, mezi která patří například pórovitost, tepelná a strukturní zbytková napětí, nebo heterogenní struktura a různé mechanické vlastnosti v různých směrech vůči směru tisku (výstavby) výtisku.

Jednou z metod, jak lze ovlivňovat vlastnosti vznikajících výtisků je optimalizace parametrů tisku a kvalita použitého vstupního materiálu. Druhou možností, jak lze zvýšit kvalitu výtisků je jejich dodatečným zpracováním vhodnou technikou (post-processing). Mezi tyto techniky patří např. technologie tepelného či chemicko-tepelného zpracování a aplikace izostatického lisování za tepla (HIP). Využitím technologií tepelného zpracování a izostatického lisování za tepla, pro vybrané materiály, se zabývá tato diplomová práce. Cílem předložené diplomové práce tak je optimalizace procesů TZ pro vybraný typ polymerního materiálu a optimalizace parametrů TZ a HIP procesu, pro vybraný typ oceli.

Předložená DP je rozdělena do několika sekcí. V první sekci je čtenář seznámen s technologiemi 3D tisku, jejich principem a historií. V druhé sekci jsou čtenáři představeny materiály používané pro 3D tisk, jejich způsoby výroby a specifikace jejich vlastností. Třetí sekce je pak věnována nedokonalostem (vadám), které souvisejí s výrobou součástí při použití aditivních technologií. Hlavní sekcí této části DP je pak kapitola, která se zabývá metodami tepelného zpracování a technologií HIP. V rámci této kapitoly byla provedena rešerše, na základě, které byly zvoleny parametry tepelného zpracování, pro vzorky použité v rámci experimentální části této DP. V té je pomocí vybraných metod, metalografických analýz a mechanických zkoušek, studován vývoj jejich mikrostruktury a mechanických vlastností v důsledku jejich různého dodatečného zpracování výše uvedenými technikami.

K experimentu byly ve spolupráci se Škodou JS a.s. vybrány dva typy konstrukčních materiálů. Konkrétně se jednalo o polymerní materiál s označením ASA, který byl zpracován pomocí technologie FFF a austenitickou ocel AISI 316L, která byla zpracována technologií SLS. Důvodem je skutečnost, že tyto technologie budou v rámci její experimentální části použity pro výrobu experimentálních vzorků.

2 Úvod do oblasti 3D tisku

Samotný 3D tisk je odvětvím aditivní výroby. Při tomto procesu vzniká postupným řízeným přidáváním jednotlivých vrstev výsledný trojrozměrný výrobek. Ten může být vytvořen z plastu či kovu. Vytvoření výrobku po jednotlivých vrstvách umožňuje vyrábět geometricky složité tvary. Takové, jaké by nebylo možné vyrobit, při aplikování jiných technologií například obrábění, nebo u nich by výroba nebyla ekonomicky rentabilní [1].

2.1 Historie a současný stav 3D tisku

Počátky 3D tisku sahají do 70. let minulého století. V této době se teprve tvořily první koncepty 3D tiskáren. První patenty na ně se objevily v průběhu 80. let. Zpočátku byly velmi drahé (cena tiskáren se mohla pohybovat až okolo 300 000 dolarů za kus). V roce 1992 začala společnost Stratasys jako jedna z prvních s prodejem komerčních 3D tiskáren. Tato společnost se dodnes řadí mezi nejvýznamnější prodejce na trhu [2].

Mezi jedny z prvních technologií 3D tisku patřilo SLA, dále také SLS či SLM a další. V současné době však patří mezi nejpoužívanější technologie 3D tisku FDM a dále také již zmíněné technologie tisku SLA či SLS. Díky snadné dostupnosti se 3D tiskárny těší stále větší popularitě. S tím roste i světová komunita příznivců 3D tisku. To zároveň představuje největší změnu v tomto odvětví. Stolní 3D tiskárny se tak rychle staly prostředkem pro seznámení s tímto tiskem i pro běžné lidi. Na druhém konci cenového spektra stojí špičkové 3D tiskárny určené pro průmyslové podniky. Vytisknuté výrobky se typicky objevují u dílů a komponent v letadlech, automobilech, lékařských implantátech, a dokonce i v módě [1], [2], [3].

Obory, u nichž je možné aplikovat aditivní výrobu jsou popsány v následujících podkapitolách:

2.1.1 Tisk kovových materiálů

Při 3D tisku převládají v současné době plastové materiály. Na trhu existuje již celá řada termoplastů a pryskyřic, které jsou kompatibilní s těmito technologiemi. Velmi dobře to slouží amatérským tiskařům a hobby trhu. Využití pro průmyslové a komerční aplikace však zůstává omezeno. Na trhu ovšem existuje prostor i pro tisk kovů [2], [4].

Jedná se o technologii, která rovněž zaznamenala dílčí úspěchy, ale k jejímu širšímu využití je však třeba překonat některé problémy. Významnějšímu využití stále brání poměrně vysoká cena. Vývoj cenově dostupnějších tiskáren pro tisk kovů zůstává úkolem a jedním z hlavních cílů pro celé odvětví do budoucna. Pokud se tisk s využitím kovového prášku stane běžnějším a dostupnějším, začne tím nová éra v oblasti tvorby prototypů [2], [4].

2.2 Definice základních pojmů tisku

Před vysvětlením různých způsobů 3D tisku je nutné vysvětlit základní pojmy v oblasti 3D tisku, aby bylo možné je bez problémů používat v následujících kapitolách.

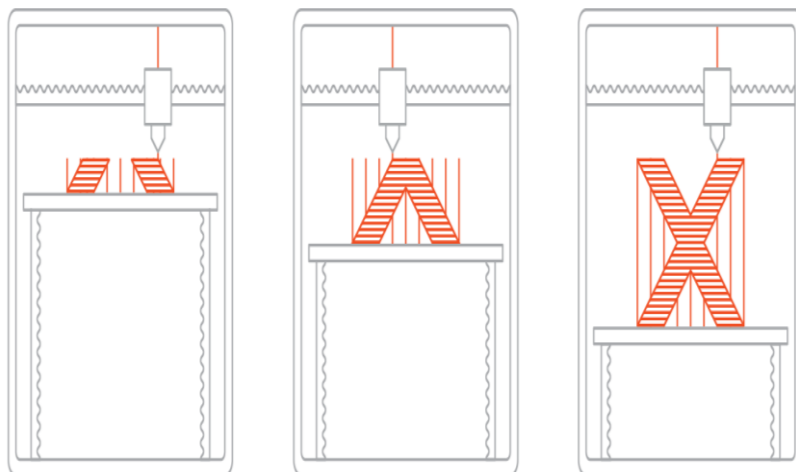
- a) Platforma: podložka na kterou je vrstvu po vrstvě nanášen trojrozměrný model [6]
- b) Tisková hlava (extruder): pohybuje se nad tiskovou platformou tak, aby vytiskla fyzický model, který je jí dodán v digitální podobě [6]
- c) Tryska: je umístěna v tiskové hlavě a skrze ni se protlačuje roztavený materiál na výtisk [6]
- d) Post-processing: zahrnuje úpravy povrchu, tepelné zpracování a odstranění nadbytečného materiálu či podpor, více o tomto tématu v kapitole 6
- e) Laser: používá se jako tepelný zdroj, například pro SLS či SLM [5]
- f) Plazma: používá se jako tepelný zdroj, obvykle je generována netavící se wolframovou elektrodou v zařízení pro obloukové svařování [5]
- g) Elektronový paprsek: používá se rovněž jako tepelný zdroj [5]
- h) Galvanometr: přístroj měřící malé elektrické napětí a proud [7]
- i) Sféroidizace: získání kulovitého čili globulárního tvaru částic
- j) Solidus: křivka popisující konec proces tuhnutí
- k) Semikrystalická mikrostruktura: částečně krystalická mikrostruktura plastů

3 Metody výroby 3D tištěných dílů

V této kapitole byly představeny vybrané technologie 3D tisku. Tyto technologie byly tedy zároveň uvažovány jako vhodné ke zpracování vybraných materiálů a rozděleny do několika hlavních kategorií.

3.1 Extruze materiálu

Jedná se o proces, při kterém se vlákno pevného termoplastického materiálu protlačuje zahřátou tryskou, v které dochází k jeho tavení. Poté je roztavený materiál nanesen na tiskovou platformu, přičemž tryska se pohybuje podle předem stanovené dráhy, viz obr. 1, kde je možné postupně pozorovat proces vzniku objektu od začátku až po jeho dotvoření, přičemž poloha tiskové hlavy se nemění, klesá jen tisková platforma, na níž objekt vzniká [8], [9].



Obr. 1: Nanášení jednotlivých vrstev materiálu pomocí extruze materiálu [9]

Tab. 1 shrnuje informace o tisku pomocí extruze materiálu, které charakterizují tuto metodu tisku. Jedná se například o metody tisku, které využívají extruzi materiálu. Dále také materiály, které je možné tisknout. Zároveň jsou v tabulce shrnuty hlavní výhody a nevýhody tohoto postupu.

Metody technologie 3D tisku:	FDM, FFF
Materiály:	Termoplastická vlákna PLA, ABS, PET, PETG, Nylon, PC atd.
Velikost vrstvy:	Běžně 0,1 mm
Běžné použití:	Upevňovací zařízení, přípravky, modely pro přesné odlévání kovů
Výhody:	Dostupná široká škála barev a materiálových provedení, nejlepší kvalita povrchu, vzniká minimální odpad
Nevýhody:	Křehké díly, nevhodné pro mechanicky namáhané součástky, velká tloušťka vrstvy, nerovný povrch vodorovné vrstvy
Pořizovací cena tiskárny	Začíná cca od 20 000 Kč

Tab. 1: Shrnutí informací o technologii tisku pomocí extruze materiálu [9], [11], [12]

3.1.1 FDM (Fused Deposition Modeling) a FFF (Fused Filament Fabrication)

Zařízení pro tisk pracující na principu extruze materiálu jsou těmi nejběžnějšími a zároveň nejlevnějšími na trhu. Tato zařízení jsou známá také pod označením FDM, nebo také FFF (Fused Filament Fabrication). Hlavní rozdíl mezi FDM a FFF spočívá v tom, že FDM je postup, na který má společnost Stratasys ochrannou značku, takže jiní výrobci tiskáren jej nemohou používat. S přístroji pracujícími na principu FDM a FFF se můžeme setkat v mnoha oborech. Typicky se jedná o obory, které vyžadují rychlou tvorbu prototypů. Patří k nim například architektura, nebo robotika [9], [10], [12].

Základ použitých zařízení tvoří cívka s filamentem z plastového materiálu, která se zavede do trysky ve vytlačovací hlavě tiskárny (extruder). Poté se tryska tiskárny zahřeje na požadovanou teplotu. Motor tiskárny následně protlačuje filament zahřátou tryskou. Přitom dochází k roztavení filamentu. Přístroj poté pohybuje hlavou tiskárny podle zadaných souřadnic přesně tak, aby položil tenkou vrstvu (přibližně o tloušťce 0,25 mm) roztaveného materiálu na platformu, přesně na stanovené místo. Zde se materiál nechá zchladnout a ztuhnout. Tím vznikne samostatná nanesená vrstva. Vytlačovací hlava se pohybuje po předem určených souřadnicích, a tak vznikají další a další vrstvy. Souřadnice pro tisk jsou definovány pomocí programu Slicer [9], [10], [12].

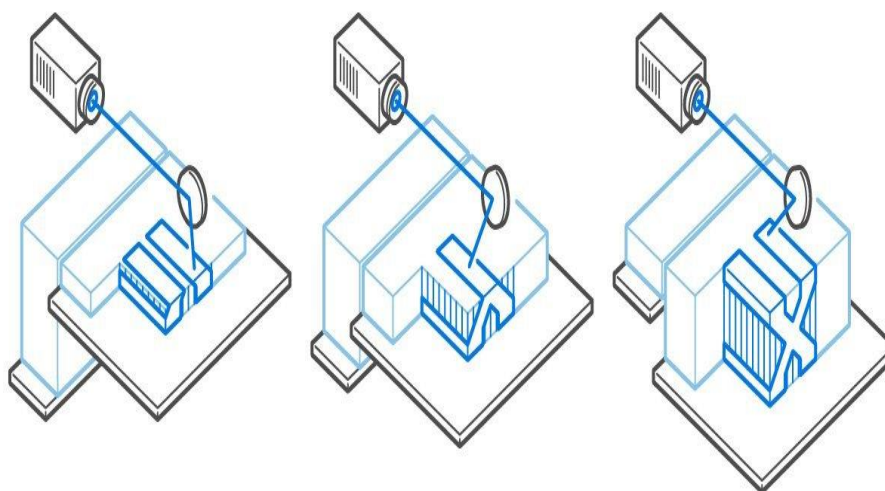
3.2 Spékání práškové vrstvy

Spékání práškové vrstvy je velmi jednoduchý proces, při kterém jsou částice prášku nanесeny na platformu. Zdroj tepelné energie umožňuje selektivní spékání a vytvrzení materiálu přímo na platformě. Po dokončení jedné vrstvy se tisková deska posune o úroveň níž a je nanесena další vrstva prášku, která je připravena k vytvrzení. Postupně tak dojde k vytvoření hmotného objektu, který ale zůstává zapouzdřen v nepoužitém prášku. V tab. 2 jsou shrnuty bližší informace o technologii tisku s využitím spékání práškové vrstvy a použitým materiálům [9], [13], [14].

Metody technologie 3D tisku:	SLS, SLM, DMLS
Materiály:	Prášky termoplastů (Nylon 6, Nylon 11, Nylon 12) a kovové prášky (ocel, titan, hliník, kobalt a další)
Velikost vrstvy:	SLS 0,06 mm, DMLS 0,02 mm
Běžné použití:	Funkční díly, díly vyráběné v malých sériích
Výhody:	Složité geometrie, vynikající mechanické vlastnosti, možnost využití různých materiálů (kov, keramika, plasty)
Nevýhody:	Delší doby přípravy, vyšší náklady, nutnost bezpečnostních opatření
Pořizovací cena tiskáren:	SLS 5 mil. Kč, DMLS 10 mil. Kč

Tab. 2: Shrnutí informací o metodě tisku s využitím spékání práškové vrstvy [9], [11], [14]

Obr. 2 shrnuje postup technologie spékání vrstev prášků. Tato technologie vyžaduje poměrně vysokou spotřebu energie. Další nevýhodou je možná nebezpečnost, protože se pracuje s velmi jemnými prášky. Zároveň bývají pořizovací náklady tiskáren vysoké [14].



Obr. 2: Vznik jednotlivých vrstev technologií spékání práškových vrstev [9]

3.2.1 SLS (Selective Laser Sintering)

Zkratka SLS označuje ve světě 3D tisku technologii tisku zvanou selektivní laserové spékání, jejímž základem je prášek, obvykle z plastu, nebo keramiky. Technologie byla patentována v 80. letech 20. století na univerzitě v texaském Austinu v rámci DTM, komerčního programu Texaské univerzity. První komerční tiskárna byla vyvinuta a uvedena na trh v roce 1992. Jelikož bylo toto odvětví aditivní výroby úplně nové, neprodávaly se tiskárny dobře. V roce 2001 odkoupila DTM společnost 3D Systems. Díky této transakci se tak mohla společnost stát dominantní na trhu aditivní výroby [9], [10].

Tiskárny využívající metodu tisku SLS vytvářejí díly a jednotlivé vrstvy selektivním spékáním naneseného prášku. Proces tisku s využitím plastů začíná tím, že se zahřeje zásobník s polymerním práškem na teplotu těsně pod bodem tání polymeru. Následně je pomocí stěrky nanasena velmi tenká vrstva práškového materiálu (obvykle 0,1 mm) na platformu. Poté začne působit CO_2 , nebo vláknový laser. Laser selektivně spéká prášek na platformě a zpevňuje nanesenou vrstvu [9], [10].

Po naskenování celého průřezu se platforma posune o jednu tloušťku vrstvy níže, načez stěrka nanese čerstvou vrstvu prášku. Celý proces se opakuje, dokud nedojde k vytvoření výsledného objektu. Prášek, který nebyl spečený, zůstává na místě a vytváří podporu pro vytvářený objekt. Tento fakt omezuje anebo dokonce odstraňuje potřebu vytvoření podpůrných konstrukcí [9], [10].

Tiskárny využívající pro tisk metodu SLS, mohou tisknout díly s extrémní přesností a zároveň ze široké škály materiálů, což je ideální pro celou řadu průmyslových odvětví. Obzvláště oblíbené jsou v leteckém, automobilovém, a dokonce zbrojním průmyslu. Jedná se tedy o odvětví, která vyžadují přesné a pevné díly [9], [10].

3.2.2 SLM (Selective Laser Melting) a DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

Tato metoda tisku byla patentována v roce 1987. Přímé laserové spékání kovu (DMLS) a selektivní laserové spékání (SLM) se liší pouze v několika technických detailech. Obě metody pracují obdobným způsobem jako SLS. Práškový materiál je opět nanášen v tenkých vrstvách a roztaven pomocí laseru [9], [11].

Hlavním rozdílem je, že technologie SLM a DMLS se používají k výrobě kovových dílů. Aby byl laser schopen roztavit kovový prášek, musí generovat podstatně vyšší teplotu než u SLS. Zásadní rozdíl tedy spočívá ve výkonu laseru [9], [11].

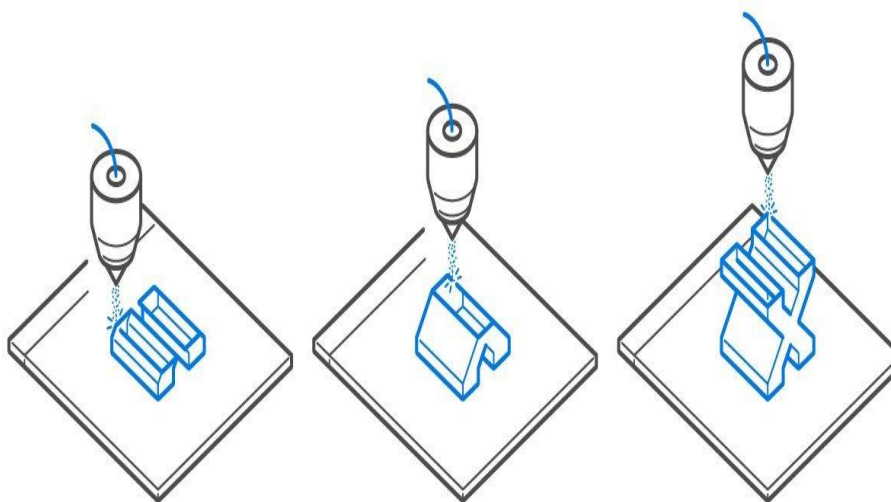
Materiálem pro 3D tisk je tu kov. Nejčastěji se používá nerezová ocel, titan, bronz a inconel. Ten se používá v letectví, kvůli své žáruvzdornosti. Pro vytvoření ochranné atmosféry se používají inertní plyny, zejména Argon, případně dusík. Po tisku samotném lze vyrobené kovové díly obrábět či tepelně zpracovávat [9], [11].

Rozdíl mezi technologií SLM a DMLS je v tom, že při DMLS se kovový prášek neroztaví, ale pouze zahřeje na teplotu, při které lze materiál spojit na molekulární úrovni. SLM používá laser k úplnému roztavení kovového prášku. To vede k dalšímu rozdílu mezi oběma metodami. Zatímco u SLM dojde k vytvoření homogenního dílu, u DMLS nedojde ke slítí jednotlivých částic prášků použitých kovů [9], [11].

Kvůli zbytkovému napětí generovanému během 3D tisku při vysokých teplotách hrozí u dílů tisknutých metodou SLM, nebo DMLS riziko deformace. Po 3D tisku jsou proto součásti obvykle tepelně zpracovány, aby se u nich uvolnilo napětí. U DMLS se prášek neroztaví, proto může být vzniklé napětí menší než u SLM [9].

3.3 Přímé energetické nanášení

Přímé energetické nanášení neboli DED (Direct Energy Deposition) je proces 3D tisku, při kterém je podáván materiál ve formě drátu, nebo prášku taven už při výstupu z trysky. Tímto způsobem lze vytvářet i velmi složité tvary. Zdrojem energie bývá obvykle elektronový paprsek, laser, nebo plazma. Obr. 3 ukazuje průběh tisku technologií DED s využitím prášku [9].



Obr. 3: Vytváření jednotlivých vrstev pomocí technologie DED [9]

DED je zajímavé i tím, že pohybem okolo objektu umožňuje doplňovat materiál na již opotřebenou součástku. Díky tomu se DED často používá pro opravy špičkových kovových součástí. Pro tento účel se možná využívá více než k vytváření zcela nových objektů [9].

Pokud se materiál pro tisk používá ve formě prášku, je běžné, že se spolu s práškem vstříkuje i inertní plyn. Důvodem k tomu je snížení, nebo úplné odstranění rizika oxidace [9].

U vstupních surovin ve formě prášku je také možné použít více druhů prášků a materiálů za účelem dosažení různých vlastností výsledného produktu [9].

Nevýhodou DED je nutnost post-processingu vytvořených dílů, kvůli špatné kvalitě povrchu. Tab. 3 shrnuje bližší informace o technologii tisku DED a používaným materiálům [9].

Materiály:	Kovy ve formě prášku, nebo drátu
Běžné použití:	Opravy špičkových automobilových a leteckých součástí, funkční prototypy
Výhody:	Zřídka je potřeba podpůrná konstrukce pro tisk, míchání kovů,
Nevýhody:	Špatná kvalita povrchu vyžaduje post-processing, drahé

Tab. 3: Shrnutí informací o technologii tisku s využitím DED [9]

4 Materiály pro 3D tisk

Tato kapitola představí materiály, které byly uvažovány pro zpracování společností Škoda JS a některé další, které byly například zmíněny v kapitole o tepelném zpracování plastů.

4.1 Tiskové filamenty

Filament je základem pro technologii výroby pomocí extruze materiálu. S rozvojem této technologie se rozšiřuje také nabídka dostupných filamentů.

4.1.1 PLA

Polyaktid, neboli kyselina polymléčná (PLA) je biologicky odbouratelný materiál. Vyrábí se z kukuřičného či bramborového škrobu, nebo cukrové třtiny. Spolu s ABS se jedná se o nejčastěji používaný materiál pro 3D tisk metodou extruze materiálu. Výtisky z PLA jsou velmi tvrdé a jednotlivé vrstvy kvalitně spojené. Při tavení materiálu dochází jen k minimálnímu rozpínání. PLA má nízkou teplotu tání 175 °C [15], [16].

Přestože se PLA opakovaně zahřívá nad svou teplotu tání, zřídka dochází k jeho degradaci. Pro materiál je potřeba zajistit suché prostředí při skladování, protože je náchylný k pohlcování vzdušné vlhkosti. Tato vlastnost se projevuje póry na povrchu vytisknutého dílu. Další nevýhodou materiálu je jeho křehkost. K oblastem, v nichž se hojně využívá, patří tvorba konceptů a prototypů [15], [16].

Kvůli nízkému bodu tavení je obtížné PLA strojně brousit. Brusný papír totiž rychle zahřeje materiál, který je kvůli růstu teploty podstatně měkčí. Z tohoto důvodu je vhodnější použít například ruční broušení či strojní broušení se souběžným chlazením materiálu. Polyaktid je možné také bez problému vrtat a lakovat. Nejdůležitější kritéria pro tisk PLA jsou shrnuta v tab. 4 [15], [16].

Hustota:	1250 kg/m ³
Teplota tisku:	185 – 235 °C
Teplota trysky:	210– 215 °C
Teplota podložky	50 – 60 °C

Tab. 4: Základní parametry pro tisk PLA [15], [16]

4.1.2 PET/PETG

Polyethylentereftalát (PET) je jedním z nejpoužívanějších plastů na světě. Pokud se do materiálové kompozice PET během polymerace přidá modifikovaný glykol, dochází ke vzniku PETG. Pomocí glykolu jsou modifikovány vlastnosti PET, aby bylo PETG méně křehké a snáze se tisklo [17], [18].

PETG je tedy velmi houževnatý materiál s dobrou tepelnou vodivostí. Adheze mezi jednotlivými spojenými vrstvami je vynikající a materiál se snadno recykluje. Je možné ho používat ve vnitřním i venkovním prostředí [17], [18].

PETG má malou tepelnou roztažnost, to je důvod proč se při tisku na platformě nekroučí. Mnoho výrobců a uživatelů tiskáren se shoduje, že při správném nastavení tiskárny se jedná o nejjednodušší materiál pro samotný tisk [17], [18].

PETG je odolný vůči kyselinám a rozpouštědlům. Je možné ho používat pro mechanicky namáhané díly, proto patří mezi velmi oblíbené materiály. Parametry pro 3D tisk s využitím PETG jsou shrnuty v tab. 5 [17], [18].

Hustota:	1350 kg/m ³
Teplota tisku:	220 - 260 °C
Teplota trysky:	240 °C
Teplota podložky	80 - 100 °C

Tab. 5: Základní parametry pro tisk PETG [17], [18]

4.1.3 ABS

Akrylonitrilbutadienstyren je možné podobně jako PLA opakovaně tavit a krystalizovat, aniž by došlo k jeho degradaci, jelikož se také jedná o termoplast. ABS se však taví při vyšší teplotě než PLA. Tato vlastnost dává materiálu dobrou tepelnou odolnost a výtisky nebudou až do teploty 98 °C jevit známky deformace. Mimo to je odolný i vůči nízkým teplotám [19], [20].

ABS je málo nasákavý a zdravotně nezávadný. Obsahuje směs syntetického kaučuku, která mu propůjčuje vyšší odolnost proti otěru a nárazu. Zároveň je materiál odolný vůči kyselinám, olejům, tukům, nebo hydroxidům. Důležitou vlastností materiálu je snadná opracovatelnost či snadná rozpustnost v acetonu. Aceton se využívá pro spojení více výtisků dohromady prostřednictvím nanesení acetonu na kontaktní plochy výtisků. Výpary acetonu se využívají pro získání hladšího povrchu výtisku [19], [20].

Mezi podstatné nevýhody patří silná reakce na změnu teploty, která se projevuje smršťováním materiálu během 3D tisku. Proto je důležité tisknutý objekt pomalu ochlazovat.

Oproti tomu platforma musí být během 3D tisku vyhřívána. Výtisky navíc nejsou vhodné pro použití, při němž budou dlouhodobě vystaveny povětrnostním vlivům. ABS je potřeba skladovat v prostorech, kde není vystaveno nadměrné vlhkosti a slunečnímu záření. Tento materiál nachází uplatnění zejména u dílů, u kterých jsou požadovány dobré mechanické vlastnosti. Tab. 6 shrnuje důležité parametry pro tisk ABS [19], [20].

Hustota:	1050 kg/m ³
Teplota tisku:	220 - 275 °C
Teplota trysky:	240 -255 °C
Teplota podložky	100-110 °C

Tab. 6: Základní parametry pro tisk ABS [19], [20]

4.1.4 ASA

Akrylonitril-styren-akryl byl vytvořen jako alternativa k materiálu ABS. Tento materiál se vyznačuje dobrou mechanickou odolností a rozměrovou stabilitou. Mezi jeho hlavní výhody oproti ABS patří zvýšená odolnost proti povětrnostním vlivům a UV záření. Je tedy možné ho využívat pro venkovní použití. Dále má vyšší tuhost než ABS, díky tomu je vhodný pro náročné aplikace. Tento materiál se snáze tiskne, a to i při tisku malých objektů a detailů. Přesto je potřeba dát si během tisku pozor na kroucení 3D výtisků a na výpary, které se mohou tvořit (styren). ASA se nejčastěji tiskne na tiskárnách založených na technologii tisku FFF/FDM. Tab. 7 shrnuje důležité parametry pro tisk materiálu ASA [21], [22].

Hustota:	1070 kg/m ³
Teplota tisku:	250 - 255 °C
Teplota trysky:	240 - 260 °C
Teplota podložky	60 – 100 °C

Tab. 7: Základní parametry pro tisk ASA [21], [22]

4.1.5 PEEK

Polyetheretherketon je vysoce specializovaný polymer, který je ideální pro použití v náročných podmínkách. Hodnoty mechanických vlastností vytisknutých dílů závisí na tvaru, nebo struktuře výplně. Materiál si dokáže zachovat své mechanické vlastnosti při teplotách až do 250 °C. Dokáže odolávat různým chemikáliím (s výjimkou kyseliny sírové a silně oxidovaných médií). Dobře odolává působení UV záření [23].

PEEK má teplotu tání okolo 343 °C. Tento materiál je sice vhodný pro náročné aplikace, náročný je však také pro 3D tisk samotný. Doporučuje se tisknout v uzavřeném boxu, aby se předešlo průvanu a minimalizoval se tak vznik teplotních deformací. Teplota tisku se totiž pohybuje okolo 400 °C, zatímco teplota platformy činí asi 120 °C [23].

PEEK je také velmi citlivý na způsob skladování, protože velmi rychle absorbuje vlhkost ze vzduchu. To může ovlivnit kvalitu tisku. Pokud je vlhkost příliš vysoká, vznikají ve vytisknutém objektu vzduchové póry. Pro úspěšný tisk se doporučuje sušení vláken při teplotě 150 °C po dobu 3 – 4 hodin [23].

PEEK se využívá k výrobě trubek, ložisek, těsnění a konzol v leteckém i automobilovém průmyslu. Tyto komponenty je možné po tisku tepelně zpracovat pro zlepšení vlastností v důsledku těsnějšího uspořádání makromolekul v krystalických strukturách. Parametry pro tisk PEEK jsou shrnuty v tab. 8 [23].

Teplota tisku:	400 °C
Teplota podložky	120 °C

Tab. 8: Základní parametry pro tisk PEEK [23]

4.2 Kovové prášky

Způsob výroby tištěného dílu a vlastnosti kovového prášku jsou faktory, které určují vlastnosti konečného produktu. Pro zajištění reprodukovatelnosti při výrobě kovových dílů, musí výrobci strojů spolupracovat s výrobcí prášků, aby zajistili, že kovový prášek bude mít stabilní vlastnosti [24], [25].

Kovový prášek používaný pro aditivní výrobu, by měl mít kulovitý tvar (aby byla zajištěna dobrá tekutost roztaveného prášku), stanovenou velikost částic (obvykle v rozmezí 50 – 150 μm) a kontrolované chemické složení [24], [25].

K požadovaným technologickým či fyzikálně-chemickým vlastnostem prášku patří i hustota, stlačitelnost, schopnost spékání, chemické složení, pevnost při zpracování, povrchová plocha, tekutost a tepelné vlastnosti. Významným problémem prášku bývá jeho postupná degradace v důsledku působení kyslíku a různých nečistot během výrobního procesu [24], [25].

Kovový prášek lze vyrábět různými způsoby. K používaným technologiím patří redukce v pevném stavu, mletí, elektrolyza, chemické procesy a atomizace. Atomizace je považována za nejlepší metodu výroby, protože produkuje kovové prášky s nevhodnější geometrií. Samotná atomizace může být provedena třemi různými způsoby. Jedná se o atomizaci vody, plynovou atomizaci, nebo plazmovou atomizaci [24].

Kovový prášek může být vyroben z nástrojové, maragingové a nerezové oceli. Dále ze slitin hliníku, mědi, titanu i na bázi niklu. Lze také použít ušlechtilé kovy jako je zlato, platina, stříbro a palladium [24], [25].

4.2.1 MS1

Tato ocel byla původně uvažována, jako jedna z ocelí pro 3D tisk kovů. Prášek z maragingové oceli MS1 se vyznačuje vynikající pevností v kombinaci s vysokou houževnatostí. Díly vytisknuté z tohoto materiálu se snadno obrábějí, svařují, brousí i leští. Díky struktuře jednotlivých vrstev vykazují díly mírnou anizotropii, kterou je možné redukovat pomocí vhodného tepelného zpracování [26], [27].

Tento materiál je ideální pro mnoho aplikací, jako jsou například nástroje pro vstřikování, tlakové lití, děrování a protlačování. Kromě toho se také používá pro výrobu dílů v leteckém a automobilovém průmyslu. Tab. 9 shrnuje vlastnosti oceli MS1, v určených směrech [26], [27].

	Směr	Hodnota
Pevnost v tahu	Horizontální směr (XY)	1100 ± 100 MPa
	Vertikální směr (Z)	1100 ± 100 MPa
Mez kluzu	Horizontální směr (XY)	1050 ± 100 MPa
	Vertikální směr (Z)	1000 ± 100 MPa
Prodloužení	Horizontální směr (XY)	10 ± 4 %
	Vertikální směr (Z)	10 ± 4 %
Modul pružnosti	Horizontální směr (XY)	160 ± 25 GPa
	Vertikální směr (Z)	150 ± 20 GPa
Tvrдость	-	35 HRC

Tab. 9: Vlastnosti oceli MS1 [26]

V tab. 10 bylo uvedeno chemické složení oceli MS1:

Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	Cu	C	Mn	Si	P	S	Fe
17	8,5	4,5	0,6	0,05								
-	-	-	-	-	≤0,5	≤0,5	≤0,03	≤0,1	≤0,1	≤0,01	≤0,01	zbytek
19	9,5	5,2	0,8	0,15								

Tab. 10: Chemické složení oceli MS1 [hmotnostní %] [27]

4.2.2 AISI 316L

Tato ocel byla vybrána jako materiál pro 3D tisk kovů. Nerezová ocel AISI 316L ve formě jemného prášku se používá k výrobě součástek v potravinářství, zdravotnictví, letectví

(montážní díly, držáky, výměníky tepla) a v dalších technických oborech, které vyžadují vysokou pevnost, odolnost proti tečení a houževnatost. Díky nízkému obsahu uhlíku je i velmi dobře svařitelná. Molybden jí poskytuje vyšší odolnost vůči korozi [28], [29].

Výtisky z oceli AISI 316L lze je snadno obrábět, tryskat ocelovými kuličkami a leštit. Tloušťka vrstvy u tohoto materiálu se pohybuje okolo 20 μm . Tab. 11 shrnuje vlastnosti oceli AISI 316L, v určených směrech [28], [29].

	Směr	Hodnota
Pevnost v tahu	Horizontální směr (XY)	640±50 MPa
	Vertikální směr (Z)	540±55 MPa
Mez kluzu	Horizontální směr (XY)	530±60 MPa
	Vertikální směr (Z)	470±90 MPa
Prodloužení	Horizontální směr (XY)	40±15 %
	Vertikální směr (Z)	50±20 %
Modul pružnosti	Horizontální směr (XY)	185 GPa
	Vertikální směr (Z)	180 GPa
Drsnost povrchu po tisku (R_a)	-	13 ± 5 μm

Tab. 11: Vlastnosti oceli AISI 316L [28], [29]

V tab. 12 je uvedené chemické složení oceli AISI 316L:

	Cr	Ni	Mo	C	Mn	Cu	P	S	Ni	N	Fe
MIN	17	13	2,25								zbytek
MAX	19	15	3	0,03	2	0,5	0,025	0,01	0,75	0,1	

Tab. 12: Chemické složení oceli AISI 316L [hmotnostní %] [29]

5 Vady u tištěných dílů

Při aditivní výrobě se taví jen malé množství materiálu najednou. Následné rychlé tuhnutí má za následek rovnoměrnější chemické složení, mikrostrukturu celého dílu může být ovšem tvořena nerovnoměrně rozloženými nerovnovážnými strukturními fázemi [25].

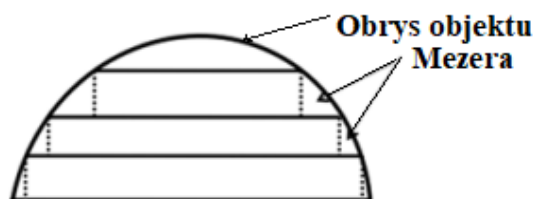
U aditivně vyráběných dílů je obtížné dosáhnout 100% referenční hustoty [25].

Z mechanických vlastností ovlivňuje pórovitost (zejména "otevřená" pórovitost) především lomovou houževnatost a únavové vlastnosti tištěných dílů. Za podmínek cyklického namáhání mohou póry vést ke vzniku trhlin a k selhání dílu [25].

V následující kapitole byly v úvodu shrnuty vybrané parametry, které omezují 3D tisk. Dále byly představeny některé vady, které by mohly u vytištěných dílů vzniknout.

5.1 Tloušťka vrstvy

Správná volba tloušťky vrstvy je velmi důležitým parametrem. Na správné volbě totiž závisí geometrie vytvářeného dílu. Když je díl se zakřivenou geometrií vytvářen po vrstvách, dochází k tomu, že vrstva, která má nejčastěji obdélníkový tvar, neodpovídá obrysu zakřiveného objektu, což vede ke vzniku mezery. Tento jev se nazývá schodovitý efekt a je zachycen na obr. 4. Velikost mezery závisí na tloušťce vrstvy, takže jejím snížením lze efektu zabránit [5].



Obr. 4: Schodovitý efekt [5]

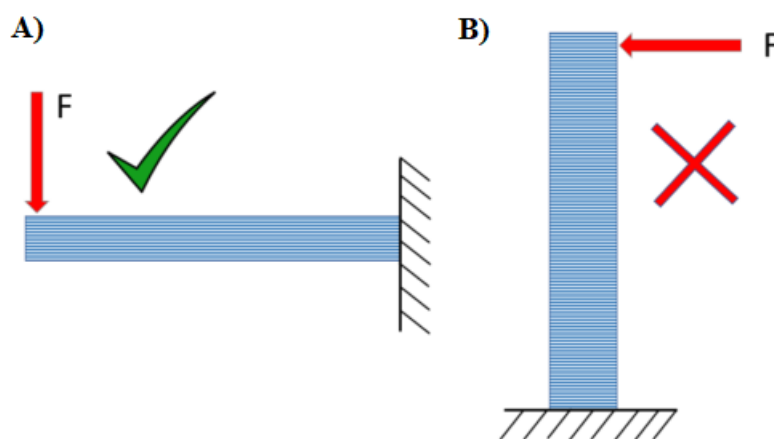
Čím větší je tloušťka vrstvy, tím vyšší je i rychlost výroby dílu. Naopak čím tenčí je tloušťka vrstvy, tím vyšší je přesnost dílu. Tenčí vrstva vyžaduje nižší hustotu energie, ale je možné vyrobit díly s vyšší hustotou. Použití tenké vrstvy zvyšuje výrobní čas a s tím související náklady. Nižší tloušťka vrstvy snižuje smrštění po roztavení laserovým paprskem, čímž se zvyšuje přesnost a snižuje se drsnost na povrchu dílu [5].

5.2 Anizotropní vlastnosti dílů

Správná orientace dílu pro tisk na konstrukční platformě je velmi důležitá. Při volbě orientace dílu je třeba přemýšlet nejen o převislých plochách, ale i o mechanických vlastnostech a zatížení, které působící na vytisknutý díl v daném směru [30].

Mechanické vlastnosti dílu jsou totiž závislé na směru tisku, a tedy i na směru jednotlivých vrstev. Například díly vytisknuté metodou FDM mají silně anizotropní mechanické vlastnosti. To však není problém pouze metody FDM, ale obecně celého 3D tisku [30].

Vytisknuté objekty, u nichž se zatížení přenáší po jednotlivých vrstvách mají relativně dobrou pevnost a houževnatost (varianta A na obr. 5). V opačném směru jsou tyto atributy minimální (varianta B na obr. 5). Anizotropii lze částečně omezit volbou vhodného materiálu, parametrů tisku, tloušťky vrstvy (čím menší tloušťka, tím vyšší je soudržnost jednotlivých vrstev) [30].



Obr. 5: Působení napětí na jednotlivé vrstvy dílů [30]

5.3 Hustota

U vytištěných dílů jsou obvykle kladeny vysoké požadavky na jejich mechanické vlastnosti. Mnoho z nich totiž funguje v podmínkách cyklického namáhání, kde jejich hustota určuje, zda při zatížení selžou či nikoliv. Proto lze předpokládat, že díly s nižší hustotou při

zatížení pravděpodobněji prasknou. Technologie tisku SLM je schopna vytvářet díly s hustotou 98 % a vyšší, což je zásadní pro aplikace, v nichž budou cyklicky zatěžovány [31].

Obecně lze říct, že pro zvýšení hustoty dílů je nutné upravit parametry tisku a kontrolovat kvalitu kovového prášku použitého pro tisk. Konkrétně u kovového prášku se jedná o distribuci velikosti částic, jejich tvar a například povrchové defekty. Například kulovitý tvar částic prokazatelně pomáhá dosáhnout vyšší hustoty dílu [31].

5.4 Zbytkové napětí

Díl se během procesu tisku zahřívá a následně ochlazuje. Je tedy vystaven mimořádným teplotním změnám. To může vést ke vzniku zbytkového napětí v dílu. K problémům obvykle dochází v momentu, kdy díl po tisku vychladne [31].

Ochlazení totiž způsobuje smršťování, což zapříčiní zkroucení a deformaci okrajů dílu. Obvykle se zbytkové napětí nejvíce koncentruje v oblasti mezi spodní částí tištěného dílu a konstrukční platformou. V extrémních případech může dojít i k překročení pevnosti dílu a k jeho prasknutí [31].

Problematikou zbytkového napětí je důležité zabývat se proto, že často způsobuje praskliny a deformace. Jednou z možností, jak tomuto problému předejít, je zvolit vhodné parametry tisku, jako je tepelný příkon zařízení a vhodná tloušťka vrstvy [31].

Mezi další parametry tisku, které mohou zbytkové napětí redukovat, patří zavedení podpůrných struktur, které dokážou odvádět přebytečné teplo, a správná orientace dílu na platformě. Další možností je predehřátí platformy a konstrukčního materiálu, čímž je možné snížit teplotní gradient a s tím související zbytkové napětí. Pomoci může i tepelné zpracování. Touto cestou lze opravit drobné trhliny [31].

5.5 Pórovitost

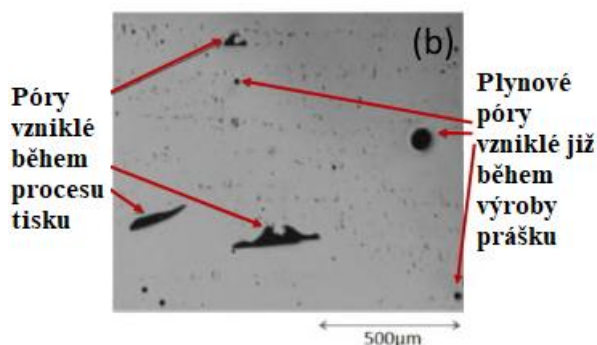
Vytištěné díly často trpí vysokou pórovitostí v důsledku tvorby malých otvorů a dutin. Tyto malé, obvykle jen mikroskopické póry mohou být způsobeny nízkou hustotou dílu. Póry mohou přímo nepříznivě ovlivňovat mechanické vlastnosti dílu, takže se snadno poškodí či praskne [31], [33], [34].

Existují dva hlavní způsoby, jak mohou póry v dílech vzniknout. Jedním z nich je kvalita použitého prášku, druhým samotná metoda tisku (ukázka na obr. 6) [31], [33], [34].

Například při použití plynové atomizace může někdy dojít ke vzniku mikroskopických pórů v prášku. Inertní plyny jako je argon, nebo helium jsou v roztaveném kovu nerozpustné a pokud z něj nemohou uniknout, vytvoří v něm póry [31], [33], [34].

Nicméně častějším způsobem vzniku pórů je proces tisku, kdy je energie laseru nedostatečná a prášek se nedokáže řádně roztavit. Může dojít i k opačnému efektu, kdy nadměrná energie laseru způsobí jak tavení, tak i vypařování, což vyvolá zpětný tlak a rozstříknutí kapiček roztaveného kovu do neroztaveného prášku, nebo na již ztuhlou vrstvu kovu. Roztavené kapičky se takto znovu usazují a na ně se přetavuje a ukládá další vrstva což v závislosti na velikosti, nebo složení kondenzátu může vést ke vzniku pórů, či defektů. Povrch naneseného materiálu je často členitý a obsahuje dutinky, či záhyby, které obsahují množství plynů [31], [33], [34].

Pokud je na tento povrch nanesena další vrstva materiálu, může dojít k překrytí a uvěznění pórů uvnitř materiálu. Jedná se o tzv. uzavřené póry. Uzavřené póry je možné odstranit pomocí post-processingu. Když nedojde k překrytí dutin naneseným materiálem, jsou póry schopné se postupně zvětšovat a dosáhnout až na povrch. Tyto póry se nazývají otevřené a není možné je pomocí post-processingu odstranit [31], [33], [34].



Obr. 6: Typy pórovitostí [33]

Existují způsoby, jak pórovitost u dílů snížit. Mezi základní způsoby patří kontrola kvality dodaných kovových prášků, nebo vyladění nastavených parametrů tisku. Dalším způsobem je post-processing, například s využitím metody izostatického lisování za tepla (HIP). Pomocí této metody je možné odstranit póry a zlepšit tím mechanické vlastnosti vytisknutého dílu [31].

6 Metody post-processingu tištěných dílů

Kovové díly musí obvykle ihned po tisku projít určitou formou post-processingu. Jedná se například o odstranění prášku, podpor, povrchové úpravy, nebo tepelné zpracování. Post-processing ovšem velmi často naráží na problémy. Může se jednat o problém s odstraněním

podpůrných struktur, zejména pokud se nacházejí v malých otvorech a trubkách kovového dílu. Tyto podpory se obtížně odstraňují bez poškození dílu a musí být obrobena [31].

Další problém, který je velmi častý, souvisí s drsností povrchu. Aditivně vyráběné díly pro špičkové aplikace vyžadují nižší drsnost povrchu. Problém je, že vytištěné díly mají často drsný povrch a pro zlepšení jeho kvality vyžadují post-processing, například v podobě obrábění, broušení, nebo leštění [31].

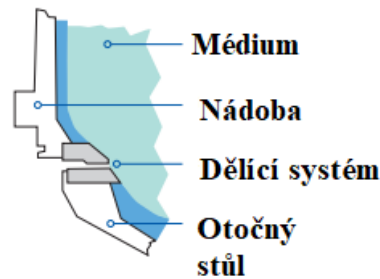
Drsnost povrchu závisí na tloušťce tištěné vrstvy. Tento parametr lze vylepšit tiskem tenčích vrstev. Vzhledem k době tisku se však takto vytištěné díly mohou prodražit. Drsný povrch může být také důsledkem nesprávného roztavení prášku. To se může stát, pokud laser nemá při tavení dostatečnou energii. V tomto případě lze drsnost snížit zvýšením výkonu laseru [31].

V následujících kapitolách byly představeny vybrané metody post-processingu. Jedná se například o omílání, HIP, nebo tepelné zpracování.

6.1 Omílání (vyhlazení a leštění)

Jedná se o jedinou zmíněnou metodu dokončování vytištěných dílů, která je spjata s obráběním. Tato metoda je zde zmíněna, protože byla vybrána jako jedna s možných metod post – processingu kovových výtisků. S její pomocí je možné výrazně zlepšit kvalitu povrchu tištěných dílů. Tato metoda je významná také z důvodu, že celý proces post-processingu lze automatizovat a snížit tím potřebu ručního opracování na minimum. Výtisky je možné hromadně homogenizovat pomocí jednoho kroku, například v omílacích zařízeních [32].

Omílací zařízení se používají všude tam, kde je potřeba docílit rychlého a kvalitního obrobení povrchů. Tyto zařízení se používají například pro funkční konektory vyrobené pomocí 3D tisku. Dále také například pro obrábění části krytů a pro konektory. Tato zařízení mají 1-4 procesní nádoby a jsou schopny odjehlování, vyhlazení, leštění, nebo broušení. Obrobky jsou umístěny v nádobě s brusným, nebo leštícím granulátem, který se otáčí pomocí otočného stolu ve spodní části. Otočný stůl je oddělen od stěny nastavitelnou mezerou. Principem přístroje je, že intenzivní obrábění povrchu vzniká působením různých odstředivých sil mezi obrobkem a médiem (viz obr. 7). Tato metoda je velmi efektivní [32].



Obr. 7: Zařízení pro omílání obrobků [32]

Kvalita každého povrchu je určena použitím správného procesního média ve spojení s použitým strojem. Procesní médium se volí individuálně pro každý obrobek. Mokrý obrábění obvykle pracuje se směsí vody a směsí (kompaundu), která oplachuje a tím i odstraňuje odebraný materiál z obrobku. Tím se zachovává abrazivní účinek. Suché obrábění se používá především k leštění. Vlivem vibračního pohybu brusných těles se leštící těleso tře o obrobek a tím dochází k úběru materiálu. Výsledkem je vysoce kvalitní leštěný povrch [32].

Plastová brusiva (k vidění na obr. 8) se používají k mletí a jemnému broušení neželezných kovů. Aby se zabránilo korozi při mokré obrábění, používají se směsi (kompaundy), které zajistí, že obrobek bude čistý a lesklý. Materiály z nerezové oceli se používají pro leštění s vysokým leskem a pro odjehlování neželezných kovů. Při zpracování tímto materiálem nedochází k žádnému úběru, ale pouze k leštění [32].



Obr. 8: Brusiva z plastových materiálů [32]

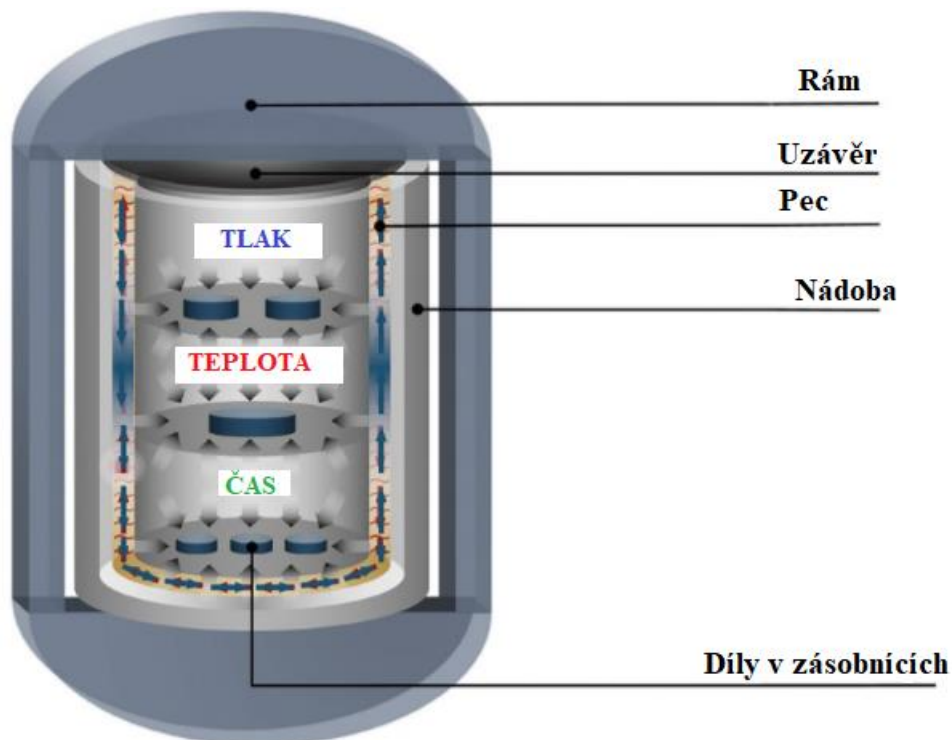
6.2 HIP

Izostatické lisování za tepla (HIP) hraje důležitou roli při zlepšování kvality dílů vyrobených aditivní výrobou na bázi kovového prášku. Tento proces je stabilizuje, nebo pomocí zhutnění materiálu na 100 % teoretické hustoty odstraňuje vady v pevných tělesech, jako jsou např. póry, dutiny a vnitřní trhliny. Během konsolidace sypkého kovového prášku, nebo v případě dalšího zhutnění již dříve zhutněných dílů s povrchovou pórovitostí, musí být proces HIP proveden ve vzduchotěsné kapsli vyrobené nejčastěji z plechu, nebo skla (schéma

tohoto zařízení na obr. 9). Pokud nevystupují póry v dílu k povrchu, není třeba provádět zapouzdření v kapsli [35].

Základním předpokladem je, že tlakové médium nepronikne do materiálu. Celý proces HIP je prováděn při vysoké teplotě a vysokém izostatickém tlaku plynu. Díky němu působí tlak rovnoměrně na všechny části povrchu ve všech směrech, což vede ke zvýšení hustoty [35].

K mechanismům, které ovlivňují zvýšení hustoty při HIP patří plastická deformace, creep a difúze. Na začátku procesu je dominantním mechanismem plastická deformace, protože aplikovaný tlak je vyšší než mez kluzu materiálu při teplotě HIP, což způsobí zhroucení dutin v materiálu. Po počáteční plastické deformaci přispívá ke zvýšení hustoty i creep a difúze. Tyto mechanismy vedou nejenom ke zhroucení a uzavření pórů, ale také je zcela eliminují a produkují materiál bez defektů. Tento proces je již řadu let úspěšně používán k výrobě či zhutňování kritických součástí v letectví, nebo u lékařských implantátů [35].



Obr. 9: Schéma zařízení a procesu HIP [35]

V celém procesu HIP jsou pro zvýšení hustoty klíčové tři hlavní parametry. Jedná se o teplotu, tlak a dobu výdrže. Teplota se nejčastěji volí v rozmezí 70 – 90 % teploty solidu zpracovávaného materiálu. Tlak je volen v rozmezí 100 – 200 MPa, většinou ve spojení s argonem jako tlakovým médiem. Doba udržování těchto parametrů většinou záleží na tloušťce zpracovávané součásti, protože v jádru velkých dílů dochází k většímu teplotnímu zpoždění v závislosti na tepelné vodivosti materiálu [35].

Pro každý materiál tedy může existovat několik různých cyklů či způsobů nastavení hlavních parametrů HIP, aby se docílilo 100% relativní hustoty. Například cyklus s relativně nízkou teplotou i tlakem, ale dlouhou dobou výdrže může z hlediska zvýšení hustoty docílit stejných výsledků jako cyklus s relativně vysokou teplotou i tlakem, ale krátkou dobou výdrže [35].

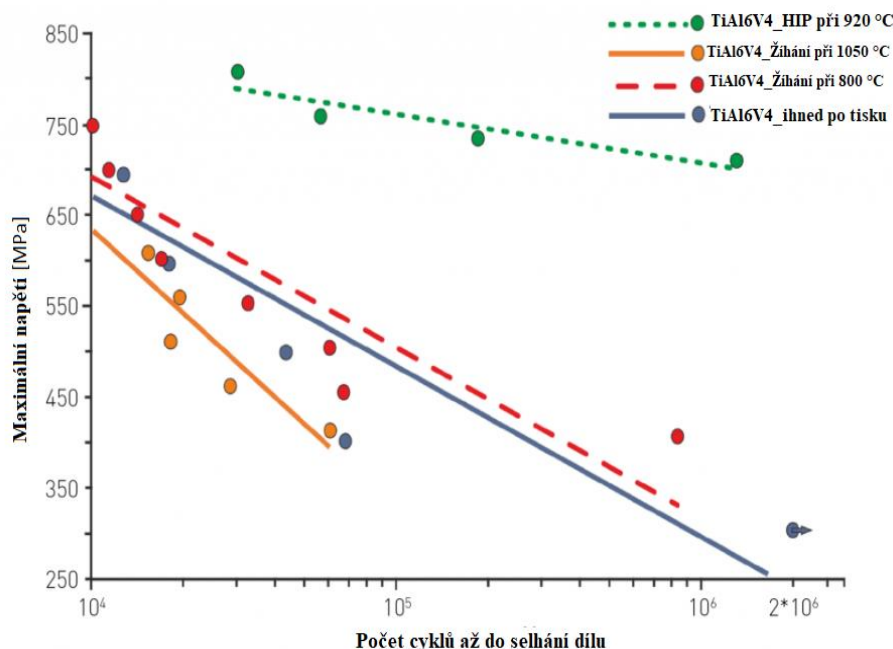
Rychlost ohřevu a ochlazování jsou další parametry, které je třeba definovat pro proces HIP. Ty neovlivní zvýšení hustoty dílu, ale ovlivní jeho mikrostrukturu, a tedy i mechanické vlastnosti [35].

Relativní hustota dílu vyrobeného aditivní výrobou na bázi kovového prášku je velmi vysoká, nelze ale zaručit, že nedojde ke vzniku defektů, jako jsou póry a vnitřní trhliny. Typy defektů a jejich velikost závisí na parametrech tisku. Tyto vady ovšem negativně ovlivňují mechanické vlastnosti, zejména tažnost a únavové vlastnosti. Použitím metody HIP a zvýšením relativní hustoty na 100% lze tyto vady eliminovat. Nejvýraznějším přínosem HIP je tedy zlepšení únavových vlastností a odstranění koncentrátorů napětí [35].

HIP odstraní všechny vady nezávisle na jejich počtu. Nezáleží tedy na tom, zda byl předtím obsah pórů 0,2 % nebo 2%. To umožňuje zlepšit vlastnosti i u méně kvalitního materiálu či u rychlejšího tisku. Póry v materiálu jsou po tisku rozloženy rovnoměrně v celém objemu. Smrštění vzniklé během HIP bude tedy rovnoměrné ve všech směrech, v celém objemu a bude odpovídat úrovni pórovitosti po tisku. Během HIP nedojde k žádné deformaci tištěného dílu, ale bude docházet k uvolnění zbytkového pnutí v materiálu, které v něm vzniklo při tisku. Během tisku jednotlivých vrstev se objevují různé vlastnosti ve směru výstavby (Z) a ve směru kolmém na směr výstavby (XY). Děje se tak v závislosti na směru sestavování a rychlosti tuhnutí. Dochází tedy ke vzniku tzv. sloupcové mikrostruktury, což vede k anizotropním vlastnostem v různých směrech dílu. Metoda HIP pomáhá odstranit nežádoucí mikrostrukturu po tisku a anizotropii [35].

Jak ukazuje obr. 10 bylo u materiálu Ti-6Al-4V, který byl ve stavu po HIP s následným tepelným zpracováním (v tomto případě žíhání při teplotě 920 °C) dosaženo velkého zlepšení únavových vlastností a prodloužení životnosti dílů. V porovnání se stejným materiálem ve stavu po vytisknutí či pouze po žíhání. Jedná se tedy o velmi důležitou vlastnost pro součásti s vysoce náročnými aplikacemi (například v leteckém průmyslu a medicíně). K obr.10 se ještě musí doplnit informace, že u výtisků, které byly pouze tepelně zpracovány (žíhány při teplotě 1050 °C) došlo ve skutečnosti k poklesu meze kluzu a růstu tažnosti v porovnání s 3D výtisky ve stavu po vytisknutí. Tato změna vlastností byla vysvětlena tím, že po vytisknutí bylo vlivem velmi vysoké rychlosti ochlazování dosaženo velmi jemné mikrostruktury s vyšším obsahem

karbidů. Tato mikrostruktura se vyznačuje vyšší mezí kluzu. Pokud bylo naopak po tisku aplikováno tepelné zpracování, jakým je například žihání, nebo HIP, bylo dosaženo mnohem hrubší mikrostruktury, ale podstatně nižšího obsahu karbidů. Bylo tedy docíleno nižší meze kluzu, ale vyšší tažnosti, a hlavně nižší pórovitosti [35], [36].



Obr. 10: Únavové chování Ti-6Al-4V tisknutý metodou SLM [35]

6.3 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování je metoda post-processingu, která pomáhá zvýšit pevnost, tažnost a teplotní odolnost. Tuto metodu je možné aplikovat na plastové a kovové výtisky [37].

6.3.1 Tepelné zpracování plastů

Během tepelného zpracování plastů dojde k zahřátí na teplotu, která umožňuje molekulám uvnitř uspořádat se, aby celá struktura byla stabilnější, pevnější a měla menší vnitřní pnutí. Teplota, kterou musí díl dosáhnout se nazývá teplota skelného přechodu. Při této teplotě si vytisknutý díl zachovává svůj tvar i když zároveň měkne, ale na molekulární úrovni se zlepšuje jeho strukturální stabilita. Proto je výběr správné teploty pro celý proces zásadní [37].

Opakující se řetězce molekul jsou základem polymeru a mohou se skládat z jedné, nebo dvou různých molekulárních struktur. Konkrétně amorfni (chaotické), nebo semikrystalické (částečně uspořádané). Rozdělení však nemusí být jednoznačné, protože molekuly mohou mít různé stupně uspořádání. Krystalické uspořádání je obvykle pevnější. Oproti tomu amorfni polymery jsou flexibilnější a elastičtější [37].

Pokud se semikrystalický filament během tisku uvnitř trysky roztaví, přijdou jeho vnitřní řetězce úplně o své uspořádání. Díky rychlému ochlazení na pokojovou teplotu zůstanou řetězce v této formě i nadále, protože se nestihnou poskládat zpět do semikrystalické struktury. Tištěné díly jsou tedy většinou amorfni a jejich teplotní odolnost, pevnost a tažnost jsou oproti krystalickým materiálům s pravidelným uspořádáním nízké [37].

Aby bylo možné zlepšit vlastnosti plastových výtisků, je nutné se přiblížit struktuře krystalických polymerů a uspořádat řetězce molekul. Toho lze docílit při zvýšené teplotě po dosažení teploty skelného přechodu (teploty skelného přechodu některých materiálů jsou uvedeny v tab. 13). Pokud krystalickou strukturu zahřejeme, roztaví se. Naproti tomu amorfni polymery nemají přesnou teplotu tání a místo toho postupně měknou [37].

Materiál	Teplota skelného přechodu [°C]
PLA	65 °C
PETG	75 °C
ABS	105 °C

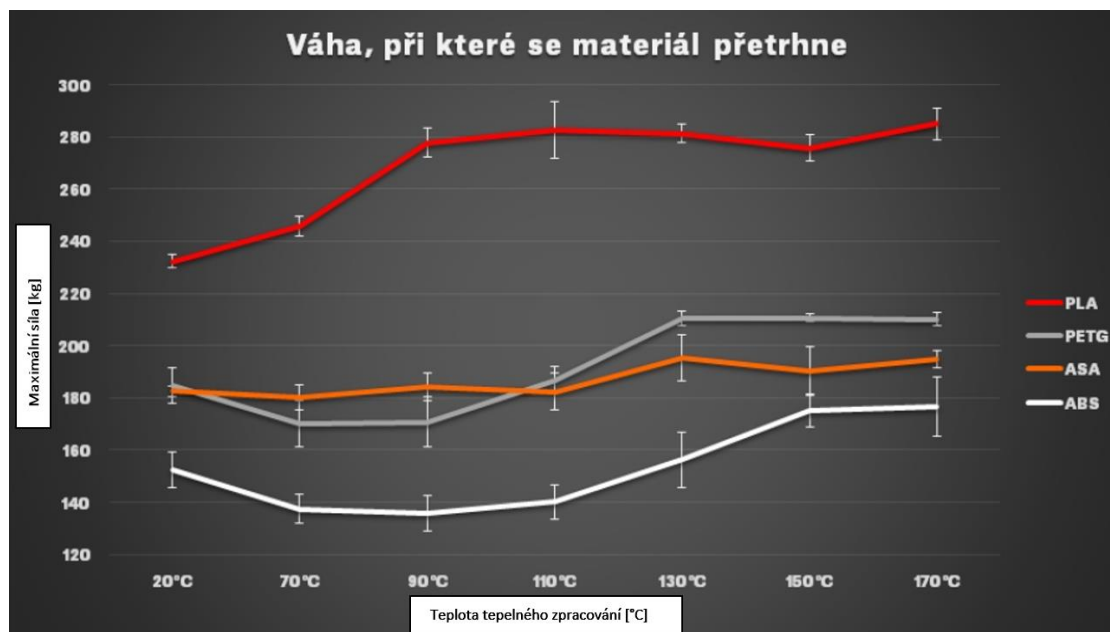
Tab. 13: Teplota skelného přechodu u vybraných materiál [37]

Teprve když teplota dosáhne teploty skelného přechodu a je zároveň nižší než bod tání, dojde k růstu krystalů a uspořádání molekul v polymeru. V případě amorfni materiálů je bodem tání konečná teplota skelného přechodu. Pokud zvýšíme teplotu na bod tání, seskupení molekul zanikne a ty se mohou volně pohybovat. Při nižších teplotách je pohyb omezený. U PLA se například jedná o rozmezí teplot 65 – 170 °C [37].

To je velmi důležité pro volbu teploty. Čím vyšší teplota, tím lépe se slíjí jednotlivé vrstvy a díl bude pevnější. Oproti tomu s rostoucí teplotou se budou měnit rozměry výtisků. U některých materiálů dochází i ke kroucení. V určité fázi mohou změkknout natolik, že ztratí původní tvar. Z tohoto důvodu je třeba najít kompromis mezi oběma stavy. Doba tepelného zpracování se liší podle velikosti a tvaru výtisku [37].

Například při zkoušce pevnosti v tahu byly měřeny síly, potřebné k přetržení vzorků (výsledky viz obr. 11). V tomto testu si nejlépe vedl vzorek z PLA tepelně zpracovaný při teplotě 110 °C. Na druhém místě se umístilo PETG, jehož hodnoty pevnosti v tahu začaly růst u vzorků tepelně zpracovaných při teplotách 110 ° či vyšších. Naopak teploty 70 – 90 °C na něj

mohou působit spíše negativně. Totéž platí také pro ABS. Celkové výsledky měření prokázaly pozitivní vliv na díly z PLA, PETG i ABS i když jeho pevnost v tahu dosáhla nejmenších hodnot. Vliv tepelného zpracování na zvýšení pevnosti v tahu byl nejnižší u materiálu ASA [37].



Obr. 11: Pevnost vybraných materiálů po tepelném zpracování [37]

6.4 Žihání kovů

Také pro žihání kovových 3D výtisků samozřejmě stejně jako u plastových výtisků obecně dochází k zahřátí a výdrži na teplotě, která umožňuje docílit stabilnější struktury vnitřního uspořádání s menším vnitřním pnutím. Konkrétní děje, které uvnitř kovu probíhají jsou již odlišné. Na žádost Škody JS se v této práci neuvádí konkrétní parametry navržených žihání. Z tohoto důvodu tedy byly navržené režimy tepelného zpracování pojmenovány obecně TZ 1 a TZ 2. Tyto režimy tepelného zpracování se liší v teplotě provedeného procesu a mají za cíl především odstranit typickou strukturu po tisku, která je velmi jemná a také je v ní obsaženo velké množství karbidů. Z odborné literatury se můžeme dozvědět, že karbidy jsou intersticiální sloučeniny uhlíku s jedním, nebo více karbidotvornými prvky. Ve slitinách představují karbidy významné fáze kovového charakteru s poměrně vysokou elektrickou vodivostí, tvrdostí a vysokým bodem tání [35], [38].

Aplikováním tepelného zpracování (žihání) je naopak docíleno mnohem hrubší struktury (u oceli AISI 316L tedy hrubšího austenitu). Hrubší struktura se obecně oproti jemnozrnné struktuře vyznačuje nižší mezí pevnosti v tahu a tvrdostí. S tímto mechanismem je spojený i fakt, že se během navrženého tepelného zpracování odstraní velké množství karbidů, které jsou

velmi tvrdé a křehké. Samotné odstranění karbidů probíhá tak, že dojde k ohřátí na teplotu žíhání a výdrži dostatečně dlouhou dobu, aby došlo k rozpuštění v tuhém roztoku. Následuje rychlé ochlazení, aby rozpuštěné fáze zůstali rozpuštěny v tuhém roztoku matrice a nedošlo tak k jejich opětovnému vyloučení. Výsledné mechanické vlastnosti po tepelném zpracování tedy budou mít nižší pevnost v tahu, tvrdost, pórovitost a vyšší tažnost. Žíhání kovů bylo zaměřeno výhradně na ocel AISI 316L, protože tato ocel byla vybrána pro tisk zkušebních vzorků [35], [38], [39], [40].

6.4.1 Žíhání oceli AISI 316L

Austenitické nerezové oceli mají stabilní a úplnou austenitickou strukturu. Vykazují vynikající korozní odolnost díky stabilnímu pasivnímu filmu, který je závislý na chemickém složení oceli, typu precipitace a na korozním prostředí. Pasivita je připisována tvorbě směsí oxidu železa a chromu. Důlková koroze vzniká při lokalizované ztrátě pasivity na povrchu dílu. U aditivně vyrobené nerezové oceli AISI 316L obvykle po vytisknutí následuje post-processing (žíhání, HIP či HIP s následným tepelným zpracováním) pro dosažení maximální tažnosti, meze únavy a nižší pórovitosti. Aplikování tepelného zpracování má za cíl upravit typickou strukturu po tisku, která se při pozorování mikrostruktury vyznačuje viditelnými hranicemi taveniny, karbidy a mikrosegregací [36].

Ocel AISI 316L se obvykle tepelně zpracovává žíháním při vyšší teplotě než je TZ 1 či TZ 2 s následnou výdrží na teplotě 4 hodiny a ochlazením do vody. Výsledkem je vysoká korozní odolnost, protože má plně austenitickou strukturu. Oproti oceli bez tepelného zpracování je tedy vlivem tepelného zpracování docíleno mnohem hrubších zrn austenitu. Ty mají oproti jemnějším zrnům austenitu menší plochu hranic zrn. Tato plocha obecně představuje oblast, která je především vystavena působení kyslíku, a tedy i náchylná ke vzniku koroze. Hlavním cílem této varianty je vytvořit ocel s nižší tvrdostí a vyšší odolností proti korozi. První varianta navrhovaného tepelného zpracování je TZ 1 s konstantní dobou výdrže na teplotě žíhání a s následovaným ochlazením do vody. Tento režim tepelného zpracování má za cíl dosáhnout nejvyšší možné pevnosti. Druhou navrženou variantou tepelného zpracování je TZ 2, která probíhá při vyšší teplotě než TZ 1, s konstantní dobou výdrže na teplotě žíhání a s následovaným ochlazením do vody. Tato metoda tepelného zpracování má za cíl dosáhnout lepšího kompromisu mezi pevností a houževnatostí. Ochlazení ve vodě je u oceli AISI 316L dovoleno, protože teplota začátku transformace martenzitu je totiž nižší, než je pokojová teplota, proto nelze kalit s následnou tvorbou martenzitu. V tab. 14 byly uvedeny hodnoty mechanických vlastností po tepelném zpracování.

Metoda tepelného zpracování	Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tažnost [%]
Bez TZ	533 ± 23	235 ± 6	48 ± 2
TZ 1	549 ± 18	255 ± 25	41 ± 0
TZ 2	498 ± 5	232 ± 2	56 ± 4

Tab. 14: Mechanické vlastnosti oceli AISI 316L po tepelním zpracování

Pro žíhání není naopak doporučeno používat nižší rozsah teplot, než byl použit při experimentu, jelikož struktura po žíhání v tomto rozsahu teplot stále obsahuje velké množství karbidů. Tato struktura je proto ještě tvrdá, křehká a má sníženou tažnost i odolnost proti důlkové korozi oceli. Tvorba karbidů bohatých na Cr způsobuje vyčerpání Cr na hranicích zrn, které jsou následně náchylné ke koroznímu napadení. Teplota a doba tepelného zpracování tedy musí být navržena tak, aby nedošlo k tvorbě nežádoucích struktur [38].

Žádná z variant tepelného zpracování není schopná 100 % odstranit pórovitost, ale je možné ji co nejvíce potlačit. Z tohoto hlediska by měla být i s ohledem na dosaženou tažnost co nejvíce účinná varianta post-processingu, kdy je na kovový 3D výtisk nejprve aplikováno HIP s následným tepelným zpracováním (žíhání). Metoda tepelného zpracování po HIP je však stále v oblasti výzkumu a není zatím pevně stanoveno, jaké parametry jsou pro použití této metody ideální. Tepelné zpracování v tab. 15 ukazuje mechanické vlastnosti po izostatickém lisování za tepla při teplotě 1163 °C a dobou výdrže 3 hodiny. Poté následovalo vakuové kalení při teplotě 900 °C s dobou výdrže 2 hodiny. Chlazení probíhalo vháněním plynného dusíku [36].

Metoda post-processingu	Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Prodloužení [%]
HIP (1150 °C, 150 MPa)	563 ± 6	231 ± 4	81 ± 7
HIP s následným tepelným zpracováním	611 ± 5	263 ± 5	48 ± 3

Tab. 15: Tabulka mechanických vlastností po HIP či HIP s následným tepelným zpracováním [36]

7 Mechanické zkoušky

Tato kapitola se věnuje popisu některých zkoušek, které byly v experimentální části na zkušebních vzorcích provedeny.

7.1 Tahová zkouška (předepsána normou ČSN EN ISO 6892-1) [43]

Při tahovém namáhání se zkušební tyč postupně deformuje a prodlužuje se až do úplného přetržení. Následně se určují napětové a deformační vlastnosti, jako jsou pevnost v tahu, mez kluzu, tažnost a kontrakce.

Zkouška se provádí na zkušebních tyčích, které jsou upnuty v čelistech zkušebního stroje tak, aby osa zkušební tyče ležela v ose čelistí stroje. Při zatěžování plynule rostoucí silou se zkušební tyč deformuje, dokud při určitém tahovém zatížení nedojde k destrukci. Při zkoušce se zaznamenává zatěžující síla a odpovídající deformace. V tab. 16 je obsažen souhrn základních veličin pro tahovou zkoušku.

Označení	Název	Jednotka
F	Zatěžující síla	[N]
L_0	Počáteční měřená délka zkušebního vzorku	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
L_u	Konečná měřená délka zkušebního vzorku po lomu	[mm]
S_0	Počáteční plocha příčného průřezu zkušebního vzorku	[mm ²]
S_u	Konečná plocha příčného průřezu zkušebního vzorku po lomu	[mm ²]

Tab. 16: Základní veličiny pro zkoušku tahem

Smluvní jmenovité napětí (R) je podíl zatěžující síly (F) a původního průřezu (S_0):

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

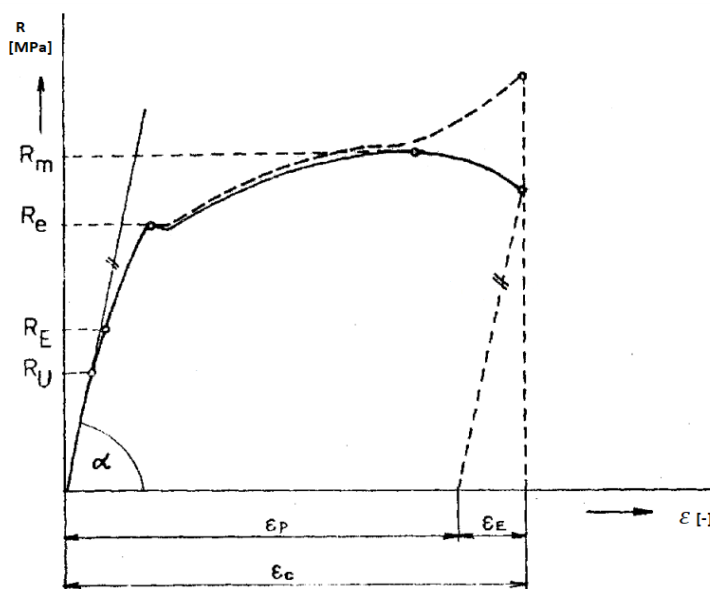
Absolutní prodloužení (ΔL) zkušební tyče po přetržení se definuje vztahem:

$$\Delta L = L_u - L_0 \text{ [mm]} \quad (2)$$

Lze též vyjádřit jako poměrné prodloužení (ε):

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (3)$$

Pomocí uvedených vztahů je možné usoudit, že zaznamenávaná závislost ($F-\Delta L$) odpovídá zároveň závislosti ($R-\varepsilon$). Nazývá se smluvním, nebo pracovním diagramem tahové zkoušky. Pracovní diagram tahové zkoušky je zobrazen na obr. 12. Zde je předvedeno, jaká část z celkové deformace (ε_c) je zaplněna oblastí plastické deformace (ε_p) a jaká část je naopak vyplněna pružnou deformací (ε_E).



Obr. 12: Pracovní diagram zkoušky tahem [44]

Počáteční přímkový úsek diagramu je spojen s pružnou deformací a projevuje se úměrností mezi napětím a deformací podle Hookeova zákona:

$$R = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

V této oblasti namáhání se zkušební tyč po odstranění vnější zatěžující síly znovu zkrátí na původní délku (pružná deformace). Mezní hodnota platnosti Hookova zákona se nazývá mez úměrnosti (R_u). Nad mezí úměrnosti se křivka odchyľuje od přímkového průběhu a deformace roste rychleji. U některých materiálů se na počátku plastické deformace objevuje úsek rychlejšího prodloužování. Tato část diagramu je charakterizována mezí kluzu (R_e). Mez kluzu je nejnižší napětí, při kterém je dosaženo výrazného prodloužení zkušebního tělesa, aniž by

došlo k současnému růstu napětí. Tento charakteristický úsek na diagramu zkoušky se u určitých materiálů nemusí vůbec objevit, neboť je vázán na určitý strukturní stav.

Při růstu napětí nad mez kluzu se zkušební tyč plasticky deformuje po celé své délce. V diagramu napětí je tento jev zobrazen vzestupem větve křivky, která končí v okamžiku, kdy je u tahové síly dosaženo nejvyšší hodnoty, než se zkušební tyče přetrhne. Z tohoto maximálního zatížení se určuje pevnost v tahu (R_m):

$$R_m = \frac{F_{MAX}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

Po překročení maximální hodnoty pevnosti v tahu (R_m) u tvárného materiálu se křivka tahového diagramu snižuje až do okamžiku destrukce. Deformace, která byla až do meze pevnosti rovnoměrná po celé délce zkušební tyče, se ke konci soustřeďuje do jednoho bodu. Zatěžující síla se začne zmenšovat i přesto, že se zvyšuje skutečné napětí v tyči vztažené na plochu skutečného průřezu. Tyč se následně přetrhne v bodě nejmenšího průřezu. Diagram, který byl získán z trhacího stroje se nazývá smluvní diagram. Po přetržení zkušební tyče je z poměrného prodloužení vypočtena tažnost materiálu (měřítko tvárnosti):

$$A = L_u - L_0 \text{ [%]} \quad (6)$$

Další charakteristika tvárnosti materiálu se nazývá kontrakce (Z). Tato hodnota se určuje ze změny průřezu zkušební tyče před zkouškou a po zkoušce:

$$Z = S_0 - S_u * 100 \text{ [%]} \quad (7)$$

7.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [43]

Během zkoušky tvrdosti podle Vickerse se do materiálu vtlačí pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem $136 \pm 0,5$ °. Tato metoda zkoušky tvrdosti je vyjádřena poměrem zkušebního zatížení F [N] k ploše povrchu vtisku s úhlopříčkami d_1 [mm] a d_2 [mm].

Tvrdot podle Vickerse se tedy vypočte pomocí následujícího vztahu:

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2} \quad (8)$$

Zkouškou mikrotvrdoměří podle Vickerse se rozumí tvrdost určená pomocí malého zatížení. Obvykle v rozsahu 10 – 1000 N. Aplikované zatížení je zaznamenáno do označení HV. Mikrotvrdoměr bývá obvykle součástí optického mikroskopu. Hodnoty mikrotvrdoměří nejsou kvůli výrazné závislosti měření na velikosti zatížení přímo porovnávány s naměřenými hodnotami makrotvrdoměří podle Vickerse.

8 Úvod do experimentální části

Společnost Škoda JS v současné době většinu svých dílů vyrábí metodami konvenčního obrábění. Mezi ně patří i výrobky, které byly od této společnosti získány v průběhu jejího řešení, viz obr. 13. Tyto výrobky obsahují kritická místa, jako jsou zápichy, nebo technologická vybrání. Při řešení tvaru zkušebních vzorků byl jejich návrh vytvořen tak, aby rozměry zkušebních vzorků odpovídaly rozměrům kritických oblastí výrobků. Tvary zkušebních vzorků odpovídaly zkušebním tělesům pro zkoušku tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Zkušební vzorky z materiálu AISI 316L měly kruhový průřez a byly vyrobeny pomocí technologie SLS (viz kapitola 3.2.1 SLS (Selective Laser Sintering)) na Fakultě strojní Západočeské univerzity.

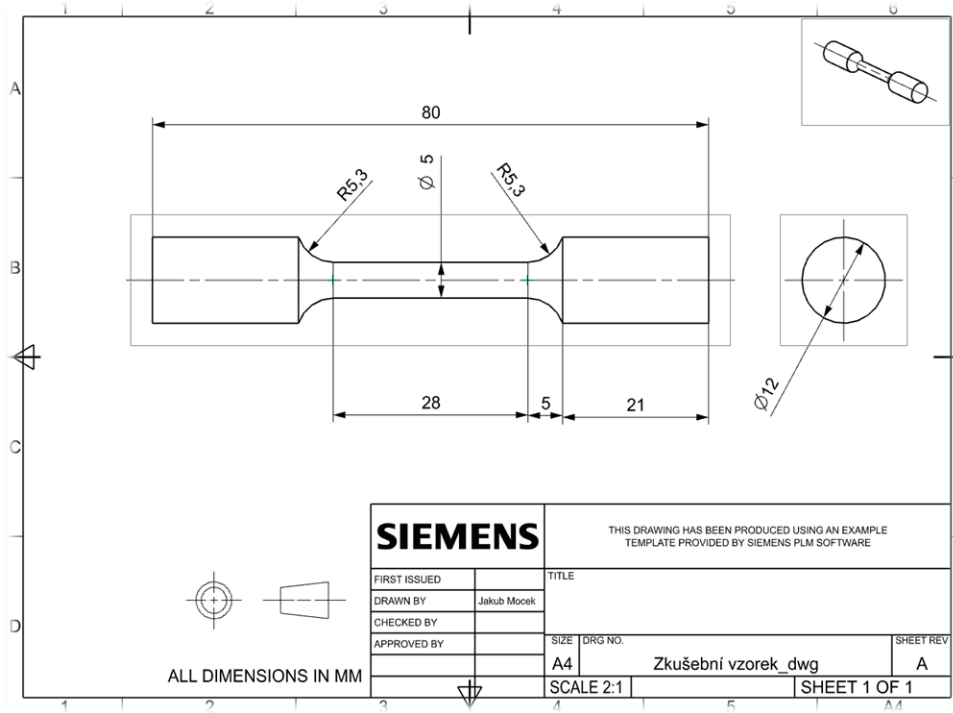


Obr. 13: Vzorky od společnosti Škoda JS

Kromě 3D tisku kovů, který byl vybrán jako náhrada běžných metod produkce dodaných výrobků, požádala společnost Škoda JS také o vyhodnocení vlivu tepelného zpracování na jimi zvolený plastový filament (konkrétně materiál ASA). Výrobní portfolio této společnosti samozřejmě obsahuje i 3D tisk plastů a firma tuto technologii běžně využívá. Tepelné zpracování by vlastnosti těchto výtisků mělo ještě výrazně zlepšit.

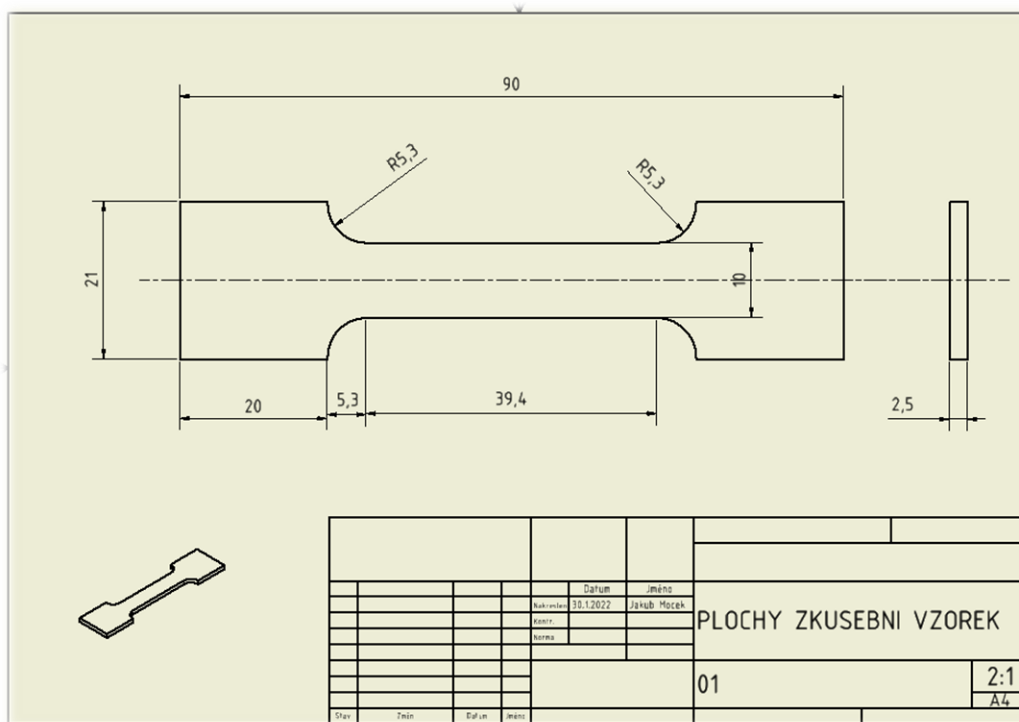
Plastové zkušební vzorky měly obdélníkový průřez a byly vytisknuty podélně technologií FDM (viz kapitola 3.1.1 FDM (Fused Deposition Modeling) a FFF (Fused Filament Fabrication) z materiálu ASA na servisní pobočce Škoda JS v jaderné elektrárně Temelín, s použitím tiskárny Original Prusa MK3S.

Dalším rozdílem mezi oběma typy zkušebních vzorků jsou navržené rozměry. Model a výkres zkušebních vzorků s kruhovým průřezem byl zhotoven pomocí programu Siemens NX (návrh na obr. 14).



Obr. 14: Návrh zkušební vzorku s kruhovým průřezem

Oproti tomu model a výkres zkušebních vzorků s obdélníkovým průřezem byl navržen pomocí programu Autodesk Inventor (návrh na obr. 15). Rozměry uvedené v návrzích jsou v milimetrech a měřítko u obou výkresů je 2:1.



Obr. 15: Návrh plochého zkušební vzorku

Společnosti Škoda JS požadovala dostatečné mechanické vlastnosti a odolnost proti únavě 3D výtisků. Ke splnění těchto požadavků by měla pomoci správně zvolená metoda post-processingu (například tepelné zpracování).

9 Tepelné zpracování výtisků

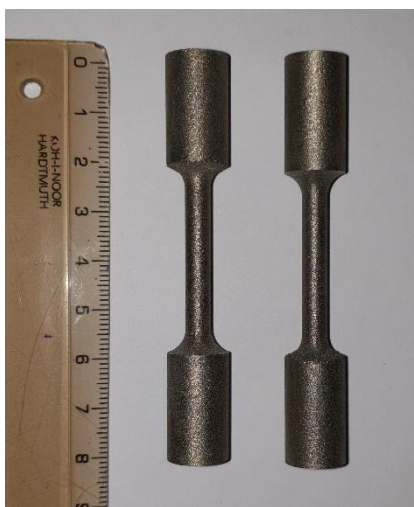
Postupy tepelných zpracování byly navrženy s ohledem na informace v předchozí teoretické části (viz kapitola 6.4 Žihání kovů). V tab. 17 byla shrnuta navržená tepelná zpracování všech výtisků na základě provedené rešerše. Cílem těchto doporučení bylo vybrat konkrétní teploty tepelného zpracování a náležité postupy pro dosažení požadovaných vlastností výtisků. Výdrže na teplotách žihání byly vybrány s ohledem na ekonomičnost celého procesu. Tepelná zpracování byla provedena v laboratoři pro tepelné zpracování na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Proces izostatického lisování za tepla (HIP) byl proveden ve spolupráci s VŠB Ostrava.

Druh tepelného zpracování	Teplota procesu [°C]	Doba výdrže [minuty]	Poznámky	
Tepelné zpracování kovových výtisků HIP	1150	180	Tlak 100 MPa	Tlakové médium Argon
Tepelné zpracování kovových výtisků TZ 1	-	-	Ochlazení ve vodě, dosažení nejvyšší možné pevnosti	
Tepelné zpracování kovových výtisků TZ 2	-	-	Ochlazení ve vodě, dosažení lepšího kompromisu mezi pevností a houževnatostí	
Tepelné zpracování polymerních výtisků	-	30	Obecně teplota 1,5 – 1,6 x vyšší než teplota skelného přechodu. Poté ochlazení na vzduchu	

Tab. 17: Návrhy tepelných zpracování

9.1 Tepelné zpracování kovových výtisků

Zkušebních vzorků byly rozděleny na tepelně nezpracované a tepelně zpracované. Tepelně zpracované vzorky byly dále rozděleny na vzorky tepelně zpracované při teplotách TZ 1, tepelně zpracované při teplotách TZ 2, nebo na vzorky zpracované s využitím HIP či HIP s následným tepelným zpracováním. Tepelné zpracování vzorků po izostatickém lisování za tepla je opět shodné jako u vzorků bez tohoto druhu tepelného zpracování (tedy při teplotě TZ 1, nebo TZ 2). Pro každou variantu tepelného zpracování budou vyrobeny 3 zkušební vzorky. Na obr. 16 je zachycen tepelně nezpracovaný zkušební vzorek.



Obr. 16: Tepelně nezpracovaný vzorek

K tepelnému zpracování byla použita pec VMK 22 Dental od společnosti Linn High Therm. Tato pec pro univerzální použití se vyznačuje rychlým předehřevem, 100 % vláknovou izolací, pouzdem z nerezové oceli a využitelným objemem komory až $2,2 \text{ dm}^3$. Podrobnější popis této pece se uvádí v tab. 18 [41].

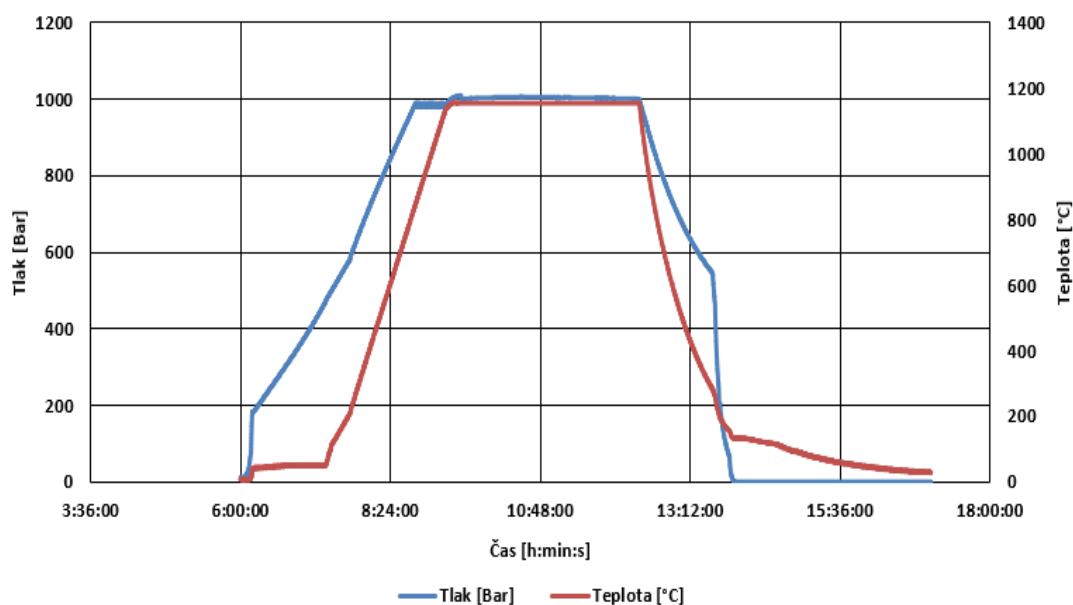
Typ pece	Maximální teplota T_{MAX} [°C]	Objem [dm ³]	Vnitřní rozměry Š x D x V [mm]	Topný výkon [W]
VMK 22	1200	2,2	130 x 170 x 100	0,9

Tab. 18: Specifikace pece VMK 22 Dental [41]

Pec se při prvním způsobu tepelného zpracování výtisků zahřála na teplotu TZ 1, a při druhém na TZ 2. Následně byly do pece umístěny 3 zkušební vzorky pro každou variantu teplot tepelného zpracování. U obou variant byly zkušební vzorky vystaveny působení tepla při

zvolené teplotě a době výdrže. Poté následovalo vyjmutí vzorků z pece pomocí kleští. Dále byly vzorky vloženy do vodní lázně a pro lepší odstranění parního polštáře vznikajícího na povrchu žhavého tělesa s nimi bylo vířeno.

Poslední část zkušebních vzorků byla odeslána k izostatickému lisování za tepla (HIP). Tuto metodu tepelného zpracování provedla Technická univerzita Ostrava (VŠB-TUO). Část zkušebních vzorků byla ponechána ve stavu po HIP. Zbytek byl následně tepelně zpracován. U těchto vzorků bylo provedeno stejné tepelné zpracování, jako u předešlých vzorků. Varianta izostatického lisování za tepla s následným tepelným zpracováním byla zvolena kvůli ověření hypotézy z odborné literatury (6.2 HIP), že by mohlo dojít k pozitivnímu ovlivnění vlastností zkušebních vzorků. Na obr. 17 byly shrnuty použité parametry pro izostatické lisování za tepla. Konkrétně se jedná o teplotu (1154 °C), tlak (1000 Barů) a dobu výdrže (3 hodiny).



Obr. 17: Průběh teploty a tlaku při HIP

9.2 Tepelné zpracování plastových výtisků

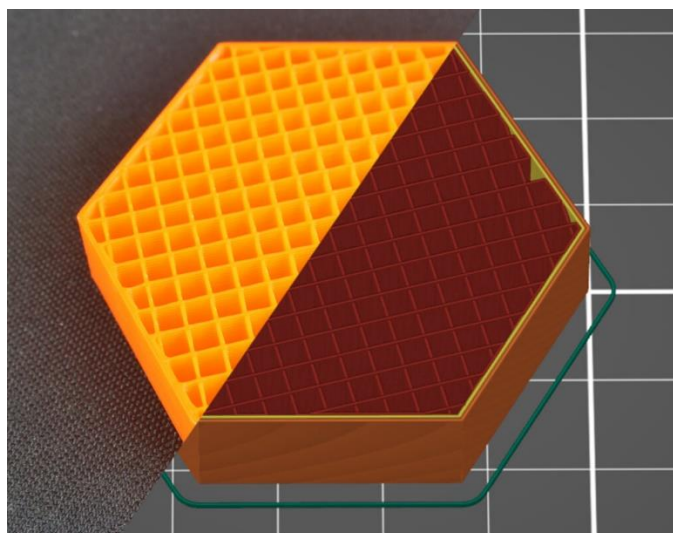
Plastové zkušební vzorky byly tištěny technologií FDM. Častým problémem této technologie, bývají anizotropní vlastnosti výtisků, proto musí být aplikováno tepelné zpracování. S jeho pomocí lze dosáhnout stabilnější vnitřní struktury (více o tepelném zpracování plastů v kapitole 6.3.1). Z důvodu příliš vysoké spotřeby filamentu či příliš dlouhé doby tisku se plastové výtisky jen zcela výjimečně tisknou s plnou výplní. Obvykle se netisknou ani zcela duté (často se totiž objevují nerovnosti na povrchu z důvodu chybějících podpor v horních vrstvách). Místo toho se volí kompromis mezi oběma možnostmi, jako výplň modelu se používají podpěrné struktury uvnitř výtisku. Ty napomáhají předcházet tvorbě děr a vzniku

dalších chyb ke kterým by mohlo během tisku dojít. Dobrou kombinací mezi vybranou výplní a typem podpěrné struktury je možné docílit rovnováhy mezi pevností, spolehlivostí výtisku, spotřebou filamentu a dobou tisku. Samotné podpěrné struktury mají různé varianty provedení, které mívají často lepší mechanické vlastnosti, zamezí se vzniku děr a tiskových chyb [42].

Pro plastové zkušební vzorky byly použity dva typy výplní. Jedná se přímočarou výplň a tzv. včelí plástve.

9.2.1 Přímočará výplň

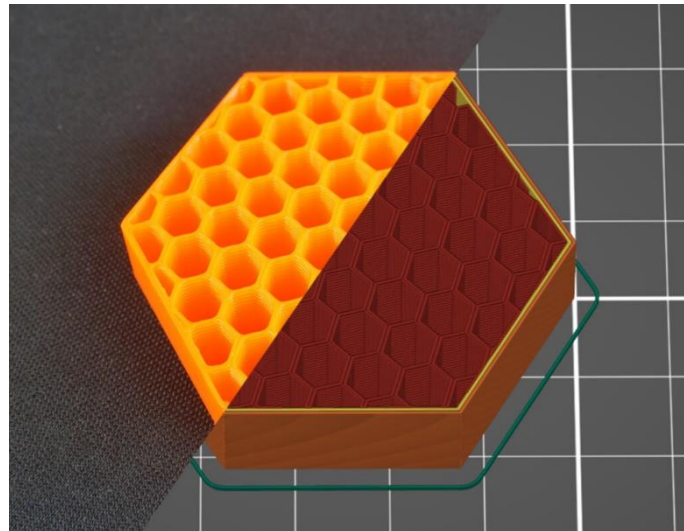
Je to jedna ze základních podpěrných struktur. Mřížka této struktury je tištěna tak, že se postupně střídá směr tisku. První vrstva se tedy tiskne jedním směrem a u další vrstvy dochází ke změně směru tisku o 90°. Při použití tohoto typu výplně se může tisknout velmi rychle a lze při tom ušetřit množství filamentu. Tento typ výplně je znázorněn na obr. 18 [42].



Obr. 18: Přímočará výplň [42]

9.2.2 Včelí plástve

Tento typ podpěrné struktury bývá tvořen svislými šestibokými hranoly. Vyznačuje se vysokou mechanickou odolností. Na druhou stranu se oproti ostatním typům výplní o cca čtvrtinu zvyšuje spotřeba filamentu a zdvojnásobuje se doba tisku. Na obr. 19 je vidět tento druh podpěrné struktury [42].



Obr. 19: Výplň se svislými šestibokými hranoly [42]

U plastových výtisků byly pro každou variantu provedení výtisku určeny 3 zkušební vzorky. Plastové výtisky z materiálu ASA byly tepelně zpracovány ve stejné peci jako kovové vzorky. Teplota tepelného zpracování byla obecně 1,5 – 1,6 násobkem teploty skelného přechodu, s dobou výdrže na teplotě 30 minut. Následovalo vyjmutí vzorků z pece a ochlazení na vzduchu. U každého druhu tepelného zpracování byly zároveň vytvořeny varianty výtisků se 100%, 70% a 30% výplní (u vzorků s výplní tvořenou plástvemi se netiskla varianta s plnou výplní). Celkově se tedy jedná 15 zkušebních vzorků.

10 Měření mechanických vlastností

Tato kapitola se zaměřuje na zhodnocení výsledků jednotlivých zkoušek zkušebních vzorků.

10.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla popsána již v předchozí kapitole, zaměřené na jednotlivé mechanické zkoušky. Zkušební vzorky z oceli AISI 316L byly odeslány do výzkumného a zkušebního ústavu Plzeň s.r.o., kde byly otestovány. Na těchto zkušebních vzorcích byly nejprve vytvořeny závity, kvůli správnému upnutí do zkušebního stroje Zwick/Roell. Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN ISO 6892-1 při teplotě 22 °C. Na obr. 20 je ukázán zkušební vzorek se zhotovenými závity po přetržení během tahové zkoušky.



Obr. 20: Zkušební vzorek z oceli AISI 316L po tahové zkoušce

Oproti tomu plastové zkušební vzorky byly otestovány v laboratoři KMM na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Konkrétně na zkušebním stroji Zwick/Roell Z005.

10.1.1 Výsledky tahové zkoušky pro ocel AISI 316L

Ve výsledcích této zkoušky byly zahrnuty tepelně zpracované i nezpracované vzorky. Jednotlivé vzorky byly rozlišeny barevně i číselně. Jednotlivá barevná i číselná označení se vztahují i na grafické shrnutí zkoušek. V tab. 19 byly shrnuty výsledky tahových zkoušek. Bylo zde jasně prokázáno, že tepelně nezpracované vzorky mají nejvyšší hodnoty meze kluzu a meze pevnosti v tahu. Ve srovnání s tepelně zpracovanými vzorky se ovšem vyznačují nejnižší tažností. Tento výsledek se shoduje s vlastnostmi, které by měl vzorek mít po tisku. Vlivem příliš rychlého ochlazení po tisku bylo totiž dosaženo jemné mikrostruktury.

U tepelně zpracovaných vzorků při teplotě TZ 1 byly naměřeny nižší hodnoty meze kluzu a meze pevnosti v tahu než u vzorků bez tepelného zpracování. Oproti nim ale byla dosaženo vyšší tažnosti. U tepelně zpracovaných vzorků při teplotě TZ 2 bylo dosaženo mírně nižší hodnoty meze kluzu a pevnosti v tahu než u vzorků tepelně zpracovaných při teplotě TZ 1. U těchto vzorků bylo rovněž vyhodnoceno, že mají vyšší hodnoty tažnosti (kromě vzorku 4). Proto je u nich také dosaženo dobrého kompromisu mezi pevností a houževnatostí.

Ve druhé části výsledků tahových zkoušek (tab. 19) byly dále uvedeny výsledky tahových zkoušek samotných vzorků po izostatickém lisování či s následným tepelným zpracováním. Výsledky vzorků po HIP byly podobné jako u vzorků s tepelným zpracováním. Mnohem zajímavějších výsledků bylo ovšem dosaženo u vzorků, na které bylo následně po HIP aplikováno tepelné zpracování. Obě varianty tepelného zpracování dokázaly ještě zesílit účinek izostatického lisování za tepla.

U vzorků, kde bylo po HIP provedeno tepelné zpracování při teplotě TZ 1 bylo oproti samotnému HIP dosaženo o 12 % nižší meze kluzu a 2 % nižší meze pevnosti v tahu. Bylo naopak dosaženo o 5 % vyšší tažnosti. U vzorků po HIP s následným tepelným zpracováním

při teplotě TZ 2 bylo dosaženo jedné z nejnižších mezí pevnosti v tahu a vůbec těch nejnižších hodnot meze kluzu ze všech zkušebních vzorků. Hodnoty tažnosti patřily ovšem mezi ty nejvyšší, které byly u všech zkušebních vzorků naměřeny.

Tyto vlastnosti jsou velmi důležité pro výrobky s vysoce náročnými aplikacemi, kde je kladem důraz na dobré únavové vlastnosti a delší životnosti výrobků. U těchto vzorků byl tedy ověřen předpoklad z teoretické části věnující se tomuto tepelnému zpracování.

V kapitole teoretické části o tepelném zpracování oceli AISI 316L byly uvedeny mechanické vlastnosti oceli AISI 316L po tepelném zpracování a bez tepelného zpracování (více v tab. 14). Je zde uvedeno, že u vzorků bez tepelného zpracování se naměřené hodnoty meze pevnosti v tahu a tažnosti shodují. Naopak velký rozdíl byl naměřen u hodnoty meze kluzu, která se průměrně pohybuje okolo 431,5 MPa. Oproti tomu očekávaná hodnota meze kluzu by měla být 235 ± 6 MPa.

U vzorků po tepelném zpracování při teplotě TZ 1 byly hodnoty meze kluzu a meze pevnosti v tahu, oproti předpokládaným hodnotám mírně vyšší. Značný rozdíl ovšem nastal u tažnosti s průměrnou hodnotou 58 % oproti předpokládané hodnotě 41 %. U vzorků tepelně zpracovaných při teplotě TZ 1 byla u hodnot mechanických vlastností naměřena mírně vyšší mez pevnosti v tahu, než se očekávalo. Hodnoty tažnosti byly shodné. Rozdíl nastal ve srovnání hodnot meze kluzu, které se pohybovaly průměrně okolo 313,3 MPa oproti očekávané hodnotě 232 ± 2 MPa.

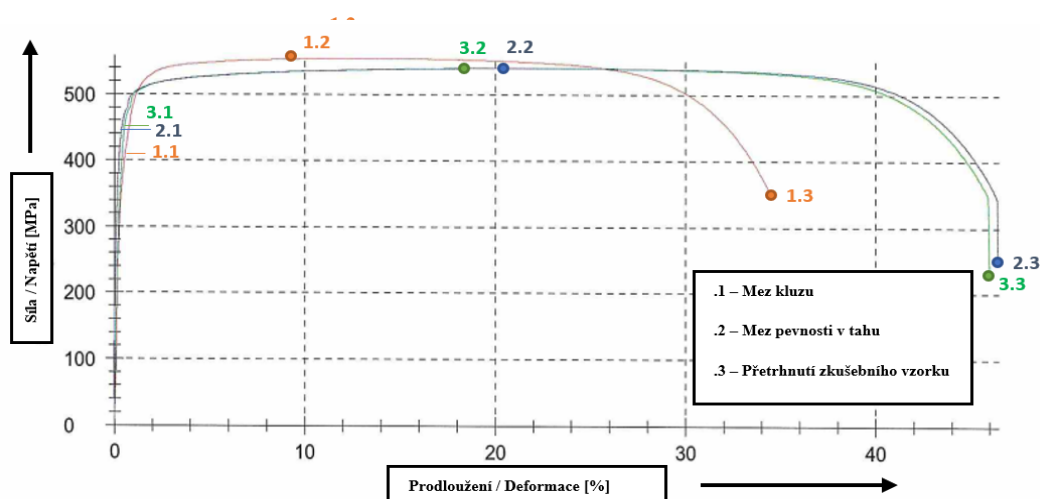
Při porovnání očekávaných hodnot mechanických vlastností po HIP z teoretické části (viz tab. 15) a naměřených výsledků si můžeme všimnout, že byly naměřeny o 14 % nižší hodnoty meze pevnosti v tahu. Oproti očekávaným hodnotám bylo dosaženo o 15 % vyšší hodnoty meze kluzu a o 8 % vyšší tažnosti. Je ovšem důležité zmínit, že nejsou shodné parametry pro HIP, při kterých byly zpracovány zkušební vzorky v teoretické části a parametry, které byly nakonec skutečně použity. Porovnat hodnoty mechanických vlastností z teoretické části s těmi, které byly dosaženy u vzorků po HIP s následným tepelným zpracováním nebylo možné. Nepodařilo se totiž najít výsledky mechanických vlastností pro metody tepelného zpracování po HIP, které by byly shodné s navrženými variantami tepelného zpracování.

Číslo vzorku	Označení	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
1	Bez tepelného zpracování I	410	554	36	72,8
2	Bez tepelného zpracování II	445	540	48,4	71,9
3	Bez tepelného zpracování III	449	540	48	66
4	Tepelné zpracování při teplotě TZ 1 I	338	522	67,6	75
5	Tepelné zpracování při teplotě TZ 1 II	334	520	52,9	73
6	Tepelné zpracování při teplotě TZ 1 III	335	518	53,4	70,8
7	Tepelné zpracování při teplotě TZ 2 I	313	508	55,6	73
8	Tepelné zpracování při teplotě TZ 2 II	316	508	56,1	70,8
9	Tepelné zpracování při teplotě TZ 2 III	311	508	55	70,8
10	HIP I	311	525	52	68,6
11	HIP II	313	523	52,8	70,8
12	HIP III	311	518	52,5	68,6
13	HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 1 I	271	512	55,5	70,8
14	HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 1 II	274	512	55,2	68,6
15	HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 1 III	274	512	55,9	70,8

16	HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 2 I	263	513	57,7	70,8
17	HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 2 II	253	513	55,6	68,6
18	HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 2 III	257	517	57,2	66,4

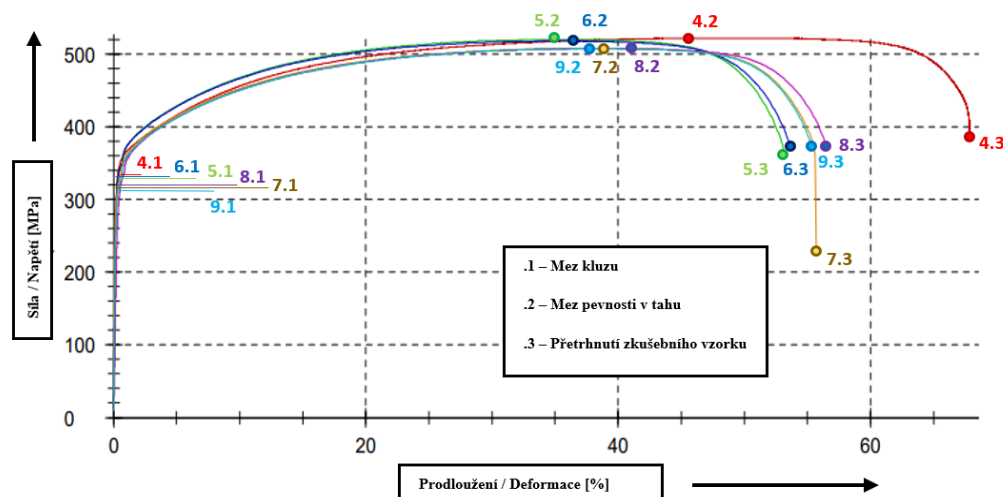
Tab. 19: Shrnutí výsledků tahových zkoušek zkušebních vzorků z oceli AISI 316L

Na obr. 21 byly graficky shrnuty tahové zkoušky vzorků bez tepelného zpracování z oceli AISI 316L. Nejvyšší hodnota meze kluzu byla 449 MPa u vzorku 3. Nejvyšší mez pevnosti v tahu 554 MPa byla naměřena u vzorku 1.



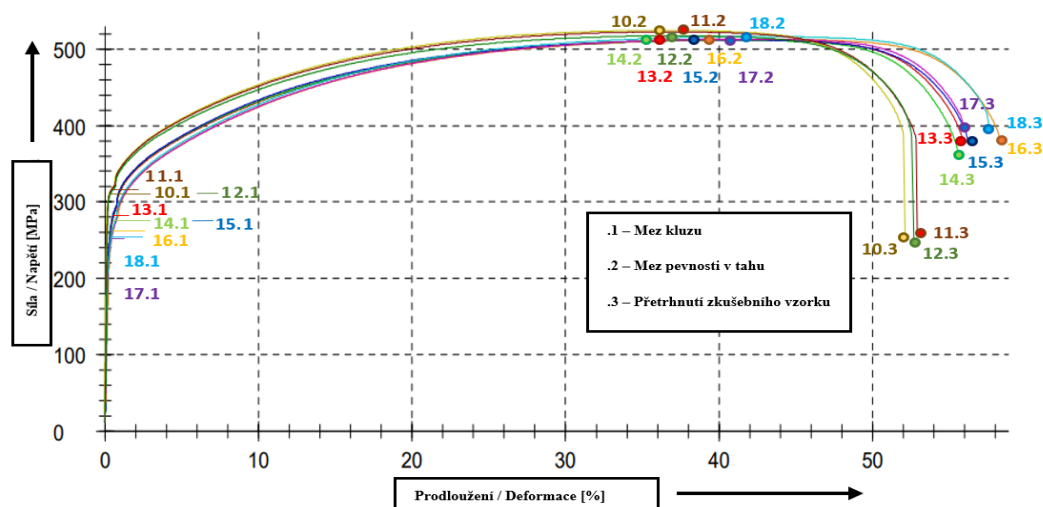
Obr. 21: Grafické záznamy tahových zkoušek vzorků bez tepelného zpracování

Na obr. 22 je ukázáno grafické shrnutí tahových zkoušek tepelně zpracovaných vzorků z oceli AISI 316L. Nejvyšší tažnosti 67,6 % bylo dosaženo u vzorku 4.



Obr. 22: Grafické záznamy tahových zkoušek tepelně zpracovaných vzorků při teplotě TZ 1 a TZ 2

Na obr. 23 byly graficky zaznamenány výsledky tahových zkoušek zkušební vzorků po HIP, nebo po HIP s následným tepelným zpracováním. Výsledky těchto zkušební vzorků se oproti předešlým vyznačovaly nižšími hodnotami meze kluzu a pevnosti v tahu. Ve srovnání s těmito vzorky bylo ovšem dosaženo nejvyšších hodnot tažnosti.



Obr. 23: Grafické záznamy tahových zkoušek vzorků s HIP či s HIP a tepelným zpracováním

10.1.2 Výsledky tahové zkoušky pro plastové vzorky

Ve výsledcích tahových zkoušek byly zahrnuty jak tepelně zpracované, tak i tepelně nezpracované plastové vzorky. V tab. 20 byly následně shrnuty výsledky těchto zkoušek. Druhy vzorků byly rozlišeny barevně. Jednotlivá barevná označení se vztahují i na grafické shrnutí zkoušek. Pro hodnoty tažnosti v tab. 20 byl zaveden Index A_{80} , který je spojen s počáteční měřenou délkou plochého zkušební vzorku v milimetrech. Výsledná hodnota A_{80} [%], tedy vyjadřuje tažnost počáteční měřené délky ($L_0 = 80$ mm).

Nejvyšších hodnot meze kluzu 30,3 MPa a meze pevnosti 31,7 MPa bylo dosaženo u vzorku 3 s přímočarou 100% výplní. Tento vzorek měl ovšem také před tepelným zpracováním nejnižší tažnost ze všech měřených vzorků. Druhé nejvyšší hodnoty meze kluzu 25,7 MPa a meze pevnosti 28,4 MPa bylo dosaženo u vzorku 5 před tepelným zpracováním s plástvemi a 70 % výplní, který měl ze vzorků bez tepelného zpracování druhou nejnižší tažnost.

U vzorku 2 s přímočarou 70% výplní byla naměřena až třetí nejvyšší hodnota meze kluzu 25,6 MPa a meze pevnosti v tahu 27,8 MPa ze všech zkušebních vzorků bez tepelného zpracování. Ze všech vzorků ovšem dosáhl druhé nejvyšší hodnoty tažnosti.

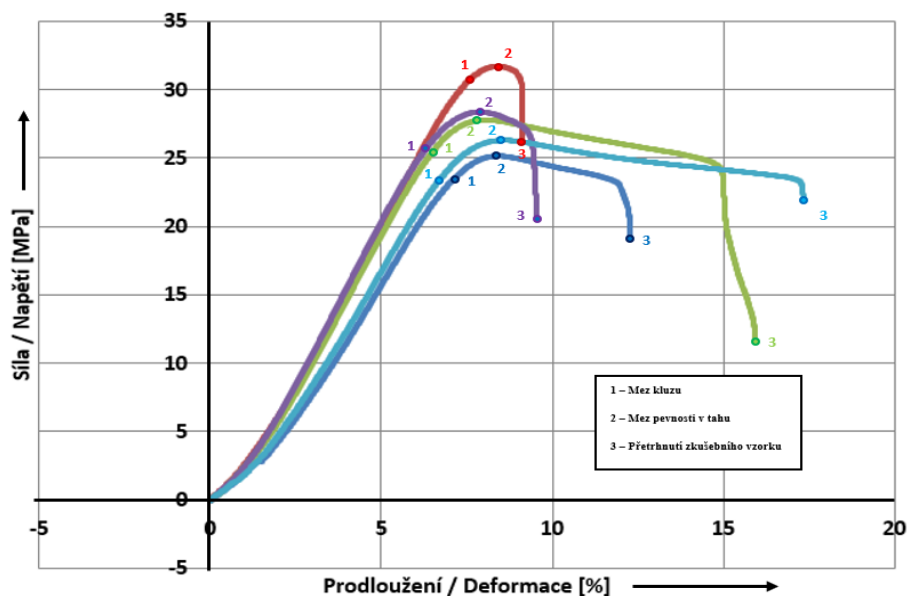
Z pohledu meze kluzu a meze pevnosti v tahu bývá plástev uváděna jako velmi užitečný typ výplně. Nevýhodou tohoto druhu výplně bylo, že se jeho vlastnosti pomocí tepelného zpracování výrazně nezlepšily (například oproti přímočaré výplni) a měl také nízkou tažnost.

Obecně můžeme říct, že tepelným zpracováním byla u všech zkušebních vzorků mírně snížena hodnota meze kluzu a meze pevnosti v tahu. Oproti tomu bylo dosaženo vyšší tažnosti (kromě vzorku 1B). Rovněž bylo zajímavé sledovat, jak se po tepelném zpracování dramaticky zvýšila hodnota tažnosti u vzorku 3B s přímočarou 100 % výplní.

Číslo vzorku	Označení	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
1	ASA s přímočarou 30 % výplní	23,2	26,3	11,1
2	ASA s přímočarou 70 % výplní	25,6	27,8	12,6
3	ASA s přímočarou 100 % výplní	30,3	31,7	2,8
4	ASA s plástvemi 30 % výplní	23,4	25,2	6,4
5	ASA s plástvemi 70 % výplní	25,7	28,4	4,4
1B	ASA s přímočarou 30 % výplní po TZ	22,5	24,4	7,6
2B	ASA s přímočarou 70 % výplní po TZ	23,3	25,3	12,7
3B	ASA s přímočarou 100 % výplní po TZ	24,2	26	17,6
4B	ASA s plástvemi 30 % výplní po TZ	21,3	23	3,3
5B	ASA s plástvemi 70 % výplní po TZ	23,4	25,3	5,2

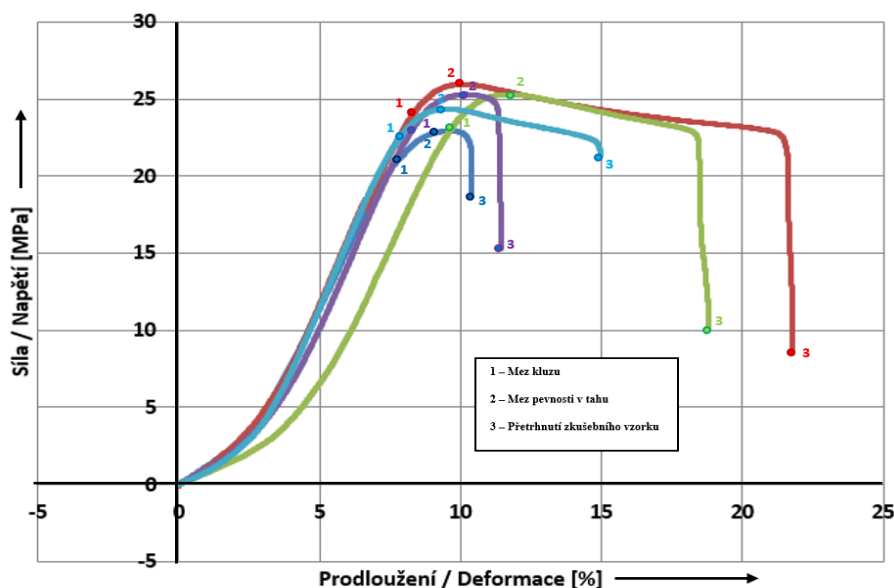
Tab. 20: Shrnutí výsledků tahových zkoušek plastových zkušebních vzorků

Na obr. 24 byly graficky shrnuty záznamy tahových zkoušek plastových zkušebních vzorků. Nejvyšší hodnoty meze kluzu 30,3 MPa a meze pevnosti 31,7 MPa bylo dosaženo u červeného vzorku s přímočarou 100 % výplní.



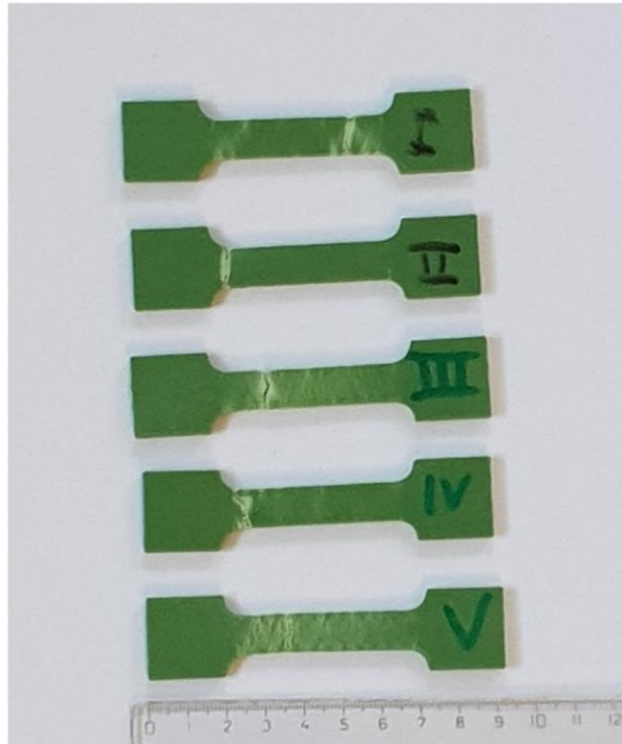
Obr. 24: Grafické záznamy tahových zkoušek tepelně nezpracovaných plastových vzorků

Grafické shrnutí tahových zkoušek tepelně zpracovaných plastových vzorků je zobrazeno na obr. 25. Nejvyšších hodnot meze kluzu 24,2 MPa a meze pevnosti 26 MPa bylo opět dosaženo u červeného vzorku s přímočarou 100 % výplní. Tyto hodnoty byly, ale nižší než před tepelným zpracováním.



Obr. 25: Grafické záznamy tahových zkoušek tepelně zpracovaných plastových vzorků

Na ukázkou jsou na obr. 26 zobrazeny plastové vzorky bez tepelného zpracování po tahové zkoušce.



Obr. 26: Plastové zkušební vzorky po tahové zkoušce

10.2 Tvrdost

Měření podle Vickerse byly provedena na mikrotvrdoměru DuraScan od firmy Struers. Vzorky pro měření mikrotvrdosti byly ze zkušebních vzorků odebrány v příčném i podélném směru. Jedná se o vzorky, vyrobené z oceli AISI 316L. V tab. 21 byly shrnuty výsledky hodnot tvrdosti.

Tvrdost HV 1 znamená, že na indentor působilo zatížení o velikosti 1 kilogramu. Nejvyšších průměrných hodnot tvrdosti $227,8 \pm 1,4$ HV1 v příčném i $232,2 \pm 0,8$ HV1 podélném směru bylo dosaženo u vzorků bez tepelného zpracování.

Tvrdost u těchto zkušebních vzorků je možné porovnat s hodnotami uvedenými v teoretické části. Z tepelně zpracovaných vzorků byla naměřena nejvyšší hodnota tvrdosti u vzorků zpracovaných při teplotě TZ 2. V příčném směru bylo dosaženo tvrdosti 201,2 HV1 a v podélném směru $183,4 \pm 2,6$ HV1. Nejnižší hodnoty tvrdosti u tepelně zpracovaných vzorků v příčném i podélném směru byly naměřeny u vzorků, které byly tepelně zpracovány při teplotě TZ 1.

U vzorků po izostatickém lisování za tepla opět pokračoval trend poklesu hodnot tvrdosti v příčném ($182,2 \pm 0,7$ HV1) i podélném (173 ± 4 HV1) směru, a to i po dalším tepelném zpracování. Jediná výjimka byla objevena u vzorků po izostatickém lisování za tepla

s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 2, kde byla tvrdost měřena u vzorků, které byli odebrány v podélném směru. Tvrdost u těchto vzorků byla vyšší a dosáhla hodnoty $190,2 \pm 2,7$ HV1.

Pro vyhodnocení tvrdosti bylo třeba doplnit vzorec pro výpočet aritmetického průměru tvrdosti z 5 měření:

$$\overline{HV1} = \frac{HV1_1 + HV1_2 + HV1_3 + \dots + HV1_n}{n} \quad (9)$$

Dalším vzorcem, který bylo potřeba doplnit, byla absolutní chyba měření, který je definován takto:

$$\delta HV1_i = \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i \Delta^2 HV1_i}{n * (n-1)}} \quad (10)$$

[45]

Číslo vzorku	Označení	Směr odběru vzorku	Aritmetický průměr HV1	Směrodatná odchylka HV1	Naměřená hodnota HV1
1	Bez tepelného zpracování	Podélný směr	223,2	0,8	223,2 ± 0,8
2		Příčný směr	227,8	1,4	227,8 ± 1,4
3	Tepelné zpracování TZ 1	Podélný směr	180,6	3,1	180,6 ± 3,1
4		Příčný směr	193,4	0,9	193,4 ± 0,9
5	Tepelné zpracování TZ 2	Podélný směr	183,4	2,6	183,4 ± 2,6
6		Příčný směr	201,2	4,6	201,2 ± 4,6
7	HIP	Podélný směr	173	4	173 ± 4
8		Příčný směr	182,2	0,7	182,2 ± 0,7

9	HIP s tepelným zpracováním TZ 1	Podélný směr	161,2	5,9	161,2 ± 5,9
10		Příčný směr	163,6	2,7	163,6 ± 2,7
11	HIP s tepelným zpracováním TZ 2	Podélný směr	190,2	2,7	190,2 ± 2,7
12		Příčný směr	162,4	1,8	162,4 ± 1,8

Tab. 21: Shrnutí výsledků zkoušek tvrdosti zkušebních vzorků z oceli AISI 316L

U navržených tepelných zpracování oceli AISI 316L bylo většinou jako konečný způsob ochlazení po žíhání zvoleno kalení do vody (kromě vzorků, které byly zpracovány pouze izostatickým lisováním za tepla). Tímto způsobem ochlazení z teploty žíhání je možné zabránit opětovnému vzniku karbidů.

U této oceli je možné zvolit tento způsob ochlazení bez obav z příliš vysokého nárůstu tvrdosti a vnitřního pnutí vlivem vzniku martenzitu. Teplota začátku transformace martenzitu u této oceli je totiž nižší než pokojová teplota. Proto po kalení nebylo možné dosáhnout martenzitické struktury a bylo naopak dosaženo nižší tvrdosti a křehkosti vlivem poklesu obsahu karbidů. Tepelným zpracováním se tedy především snížila tvrdost a zvýšila tažnost či korozní odolnost.

10.3 Pórovitost

U 3D výtisků bývá výskyt pórů označován jako jejich častý problém. Míra pórovitosti bývá rozdílná. Zvýšená pórovitost se obvykle pojí se sníženou kvalitou materiálu, a to kvůli nižším mechanickým vlastnostem. V tomto ohledu byl zvolený post-processing velmi důležitý a mohl by pórovitost snížit.

Vzorky pro analýzu pórovitosti byly odebrány ze zkušebních vzorků v příčném i podélném směru. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí analýzy podílu fází na světelném mikroskopu (SM) Nikon OPTIPHOT-100 a softwaru NIS Elements. Analýza je založena na principu barevného kontrastu dvou zkoumaných fází. Zkoumán byl kontrast mezi póry a zbylým materiálem vzorku. Pro každý typ zkušební vzorku bylo provedeno 5 měření na různých místech pro přesnější vyhodnocení pórovitosti. Cílem této zkoušky bylo kvantifikovat počet pórů oproti celkové měřené ploše.

Ze získaných dat lze analyzovat obsah pórů uvnitř zkušebních vzorků. Tab. 22 obsahuje souhrn průměrných hodnot výsledků těchto měření. Z hodnot v tabulce lze obecně vyvodit, že tepelným zpracováním bylo možné výrazně snížit pórovitost, ve srovnání se vzorky bez tepelného zpracování. Ze vzorků, které byly pouze tepelně zpracovány (bez HIP) dosáhly nejlepších výsledků v příčném i podélné směru ty, které byly zpracovány při teplotě TZ 2.

Velmi zajímavé výsledky pórovitosti byly zjištěny u vzorků po HIP, které měly již jen díky použití této samotné varianty post-processingu výrazně nižší hodnoty pórovitosti. Úplně nejlepších výsledků z hlediska pórovitosti bylo dosaženo u vzorků po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 2. U těchto vzorků bylo dosaženo pórovitosti $0,0018 \pm 0,0001$ % v podélném a $0,0017 \pm 0,0001$ % v příčném směru. Na tento výsledek mělo velký vliv navržené tepelné zpracování, jelikož dokázalo pórovitost vzorků po HIP ještě výrazně snížit. S tímto přístupem bylo možné dosáhnout mnohem hrubší mikrostruktury austenitu, která samotnou pórovitost snižuje.

Kromě pórovitosti bylo provedeno i 5 měření tvaru pórů. Tvarová analýza vzorků byla vyjádřena kruhovitostí, před a po tepelném zpracování. Tato analýza je shrnuta v tab. 23 a ukázala, že vzorky před tepelným zpracováním, po HIP, nebo po HIP s následným tepelným zpracováním odebrané v podélném i příčném směru dosáhly nejvyšších hodnot kruhovitosti. Nejnižších hodnot kruhovitosti v příčném směru bylo dosaženo u vzorku s tepelným zpracováním při teplotě TZ 1. Nejnižší hodnoty kruhovitosti v podélném směru bylo dosaženo u vzorku s tepelným zpracováním při teplotě TZ 2.

Pro vyhodnocení pórovitosti byly naměřené hodnoty pórovitosti doplněny o vzorec pro výpočet aritmetického průměru pórovitosti z 5 měření:

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}{n} \quad (11)$$

Dalším vzorcem, který bylo potřeba doplnit, byla absolutní chyba měření, která byla pro výpočet pórovitosti definována vztahem:

$$\delta P_i = \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i \Delta^2 P_i}{n * (n-1)}} \quad (12)$$

[45]

Označení vzorku	Směr odběru vzorku	Aritmetický průměr pórovitosti [%]	Směrodatná odchylka [%]	Naměřená pórovitost [%]
Bez tepelného zpracování	Podélný směr	0,0042	0,0002	0,0042 ± 0,0002
	Příčný směr	0,0064	0,0013	0,0064 ± 0,0013
Tepelné zpracování při teplotě TZ 1	Podélný směr	0,0037	0,0005	0,0037 ± 0,0005
	Příčný směr	0,0031	0,0003	0,0031 ± 0,0003
Tepelné zpracování při teplotě TZ 2	Podélný směr	0,0028	0,0001	0,0028 ± 0,0001
	Příčný směr	0,0026	0,0003	0,0026 ± 0,0003
HIP	Podélný směr	0,0022	0,0004	0,0022 ± 0,0004
	Příčný směr	0,0021	0,0002	0,0021 ± 0,0002
HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 1	Podélný směr	0,0019	0,0001	0,0019 ± 0,0001
	Příčný směr	0,0018	0,0002	0,0018 ± 0,0002
HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 2	Podélný směr	0,0018	0,0001	0,0018 ± 0,0001
	Příčný směr	0,0017	0,0001	0,0017 ± 0,0001

Tab. 22: Souhrn analýzy pórovitosti

Pro vyhodnocení analýzy tvaru pórů pomocí kruhovitosti, bylo nutné doplnit hodnoty kruhovitosti v tab. 23 o vzorec pro výpočet aritmetického průměru kruhovitosti z 5 měření:

$$\bar{K} = \frac{K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_n}{n} \quad (11)$$

Dalším vzorcem, který bylo potřeba pro měření kruhovitosti doplnit, byla absolutní chyba měření:

$$\delta K_i = \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i \Delta^2 K_i}{n * (n-1)}} \quad (12)$$

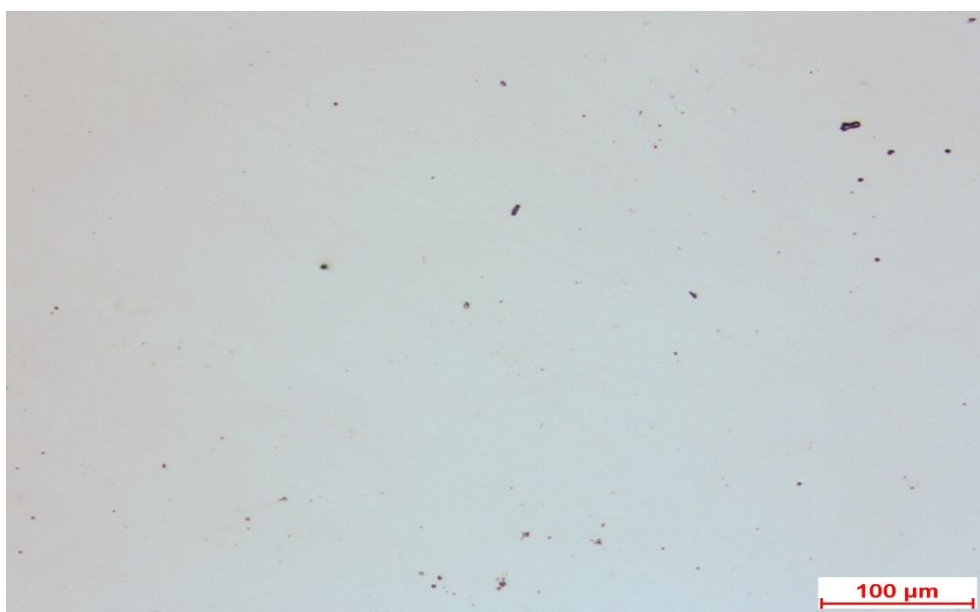
[45]

Označení vzorku	Směr odběru vzorku	Aritmetický průměr kruhovitosti	Směrodatná odchylka kruhovitosti	Naměřená kruhovitost
Bez tepelného zpracování	Podélný směr	0,88	0,01	0,88 ± 0,01
	Příčný směr	0,82	0,03	0,82 ± 0,03
Tepelné zpracování při teplotě TZ 1	Podélný směr	0,89	0,01	0,89 ± 0,01
	Příčný směr	0,79	0,01	0,79 ± 0,01
Tepelné zpracování při teplotě TZ 2	Podélný směr	0,82	0,02	0,82 ± 0,02
	Příčný směr	0,82	0,01	0,82 ± 0,01
HIP	Podélný směr	0,87	0,01	0,87 ± 0,01
	Příčný směr	0,88	0,01	0,88 ± 0,01

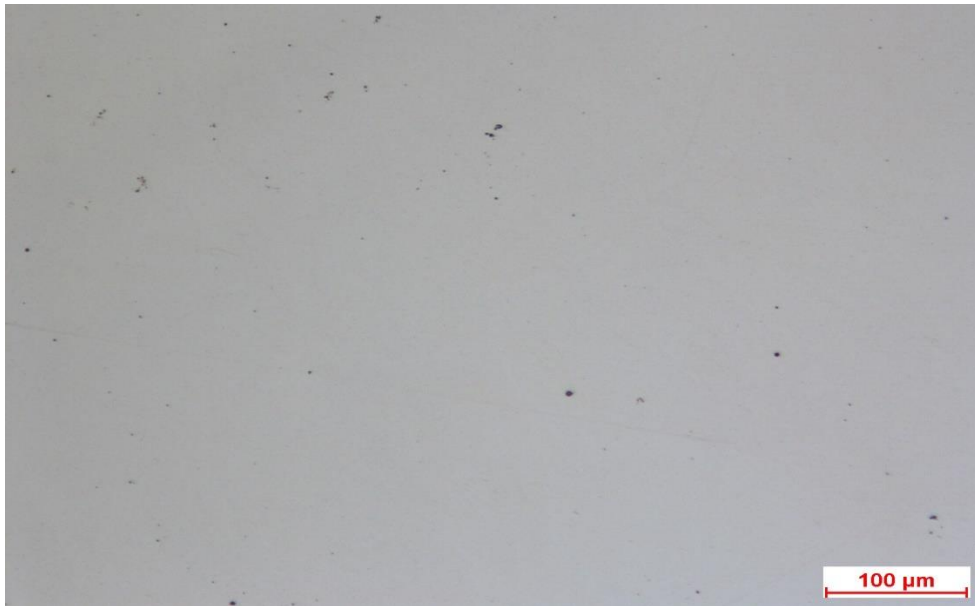
HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 1	Podélný směr	0,87	0,01	0,87 ± 0,01
	Příčný směr	0,89	0,01	0,89 ± 0,01
HIP s tepelným zpracováním TZ 2	Podélný směr	0,86	0,01	0,86 ± 0,01
	Příčný směr	0,87	0,01	0,87 ± 0,01

Tab. 23: Souhrn analýzy tvaru pórů

Pórovitost před tepelným zpracováním ukazuje obr. 27. Následující obrázky byly vybrány pro lepší grafické porovnání pórovitosti před a po tepelném zpracování (bez HIP).

**Obr. 27: Ukázka pórovitost vzorku bez tepelného zpracování**

Na obr. 28 je vidět pórovitost vybraného vzorku po tepelném zpracování při teplotě TZ 1



Obr. 28: Ukázka pórovitost vzorku po tepelném zpracování při teplotě TZ 1

Obr. 29 ukazuje pórovitost vzorku po tepelném zpracování při teplotě TZ 2.



Obr. 29: Ukázka pórovitost vzorku po tepelném zpracování při teplotě TZ 2

Na obrázcích pórovitosti je patrné, že nejvíce pórů se objevuje na obrázku vzorku bez tepelného zpracování (obr. 27). Naopak nejnižší pórovitost byla na posledním vzorku po tepelném zpracování při teplotě TZ 2 (obr. 29).

10.4 Textura povrchu

Topografie povrchu, jeho drsnost, vlnitost a tvar do značné míry ovlivňují odolnost materiálu vůči iniciaci únavového porušení materiálu. Z tohoto důvodu byla provedena analýza drsnosti povrchu. Ta byla provedena pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT. U tohoto mikroskopu se používá jako světelný zdroj laserový paprsek o vlnové délce 408 nm. Laserovým paprskem jakožto bodovým zdrojem světla je možno dosáhnout mimořádně ostrého a kontrastního obrazu. Tímto typem mikroskopu jsme také schopni dosáhnout prostorové rekonstrukce mikroskopických objektů z několika desítek postupně se měnících optických řežů. Proto se také velmi často využívá i pro pozorování nerovnoměrných povrchů (například křehkého lomu) při fraktografické analýze. Texturu povrchu 3D výtisků byla hodnocena z hlediska drsnosti (2D parametr struktury povrchu), nebo 3D parametru struktury povrchu (výškové). Výsledky těchto parametrů byly doplněny ještě o měření objemu výstupků a prohlubní [46].

10.4.1 Drsnost povrchu

Výběr profilu, který by mohl obecně charakterizovat vliv drsnosti povrchu na únavové vlastnosti se zdá být stále vcelku sporný. V této práci byl jako dominantní parametr zvolen R_a , což je průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti (jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot odchylek od střední čáry profilu). Další parametry byly vybrány jako doplňující. V tab. 24 byly shrnuty základní veličiny pro měření drsnosti povrchu [47], [48].

Pro vyhodnocení drsnosti bylo potřeba doplnit vzorec pro výpočet aritmetického průměru drsnosti povrchu z 5 měření profilu R_a a do tab. 24 byly doplněny konkrétní číselné hodnoty:

$$\overline{R_a} = \frac{R_{a_1} + R_{a_2} + R_{a_3} + \dots + R_{a_n}}{n} \quad (13)$$

Dalším vzorcem, který bylo potřeba doplnit, byla absolutní chyba měření, která byla definována vztahem:

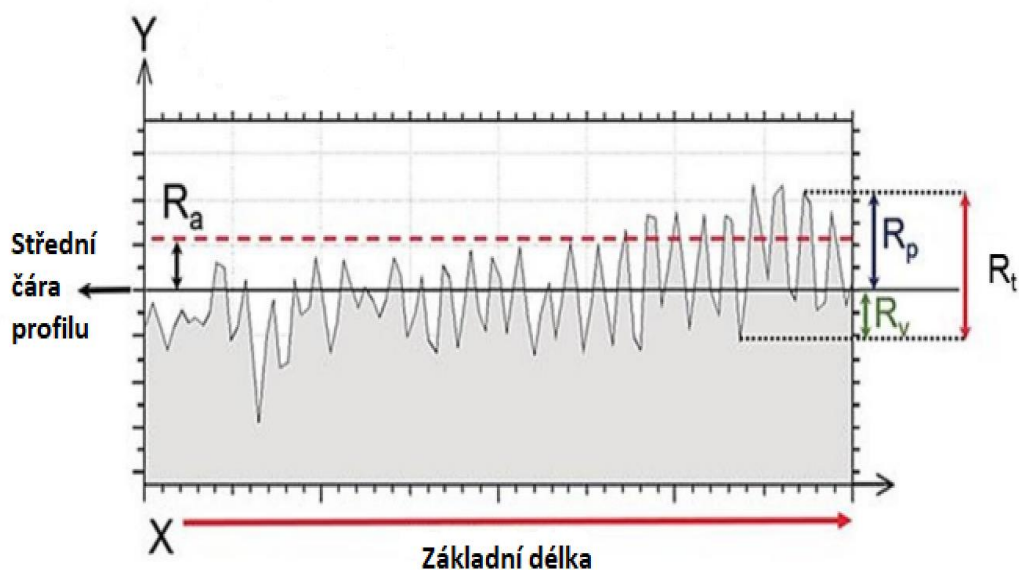
$$\delta R_{a_i} = \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i \Delta^2 R_{a_i}}{n * (n-1)}} \quad (14)$$

[45]

Označení	Název	Popis	Jednotka
R_a	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	Aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic v rozsahu délky L	[μm]
R_q	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti		[μm]
R_p	Největší výška výstupku profilu	Výška největšího výstupku profilu v rozsahu délky L	[μm]
R_v	Největší hloubka prohlubně profilu	Hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu délky L	[μm]
R_t	Největší výška profilu drsnosti	Součet výšky největšího výstupku a hloubky nejnižší prohlubně v rozsahu délky L	[μm]
L	Základní délka	Délka použitá pro rozpoznání nerovností daného profilu	
m	Střední čára profilu	Rozděluje skutečný profil tak, že v rozsahu základní délky je součet odchylek profilu od této čáry minimální	

Tab. 24: Základní veličiny pro měření drsnosti povrchu [47], [48]

Na obr. 30 se objevují základní veličiny pro měření drsnosti povrchu z tab. 24, kde byly pro snazší představu schematicky znázorněny.



Obr. 30: Schématické znázornění parametrů drsnosti povrchu [48]

V tab. 25 se uvádějí naměřené amplitudové parametry drsnosti pro každou variantu tepelného zpracování. U každého z těchto vzorků bylo naměřeno 5 profilů drsnosti.

Číslo vzorku	Označení	Aritmetický průměr amplitudových parametrů drsnosti [μm]	Směrodatná odchylka amplitudových parametrů drsnosti [μm]	Naměřená amplitudové parametry drsnosti [μm]	
1	Bez tepelného zpracování	R_a	13,934	1,784	13,934 \pm 1,784
		R_q	16,957	2,608	16,957 \pm 2,608
2	Tepelné zpracování při teplotě TZ 1	R_a	9,187	0,241	9,187 \pm 0,241
		R_q	11,904	0,447	11,904 \pm 0,447
3	Tepelné zpracování při teplotě TZ 2	R_a	9,692	0,612	9,692 \pm 0,612
		R_q	12,109	0,625	12,109 \pm 0,625

4	HIP	R_a	10,571	0,161	10,571 ± 0,161
		R_q	13,225	0,226	13,225 ± 0,226
5	HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 1	R_a	8,479	0,631	8,479 ± 0,631
		R_q	10,703	0,792	10,703 ± 0,792
6	HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 2	R_a	7,585	0,251	7,585 ± 0,251
		R_q	9,515	0,296	9,515 ± 0,296

Tab. 25: Výsledné parametry drsnosti

10.4.2 Výškové parametry [49]

Pro hodnocení struktury povrchu lze také použít trojrozměrné parametry. Prostorovou analýzou povrchu se otevírají nové možnosti pro hodnocení struktury, které při 2D měřeních nebyly možné. Vychází se z výškového rozložení souřadnic profilu. Tento popis struktury povrchu se často používá například pro hodnocení tření stykových ploch, opotřebení, nebo pro únavové vlastnosti. V tab. 26 lze pozorovat základní parametry pro toto měření struktury povrchu.

Označení	Název	Jednotka
S_a	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	[μm]
S_q	Průměrná kvadratická úchylka povrchu	[μm]
S_p	Maximální výška výstupků	[μm]
S_v	Maximální hloubka prohlubní	[μm]

Tab. 26: Základní veličiny pro měření výškových parametrů [49]

V tab. 27 byly uvedeny výsledky amplitudových parametrů prostorového hodnocení, které vycházely z 2D parametrů dle normy ČSN EN ISO 4287. Pro každou variantu tepelného zpracování bylo provedeno jedno měření.

Číslo vzorku	Označení	S_a [μm]	S_q [μm]	S_p [μm]	S_v [μm]
1	Bez tepelného zpracování	13,6	17,983	297,39	121,909
2	Tepelné zpracování při teplotě TZ 1	12,069	15,462	105,557	91,137
3	Tepelné zpracování při teplotě TZ 2	9,782	12,691	72,124	71,345
4	HIP	12,772	16,324	131,981	70,166
5	HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 1	9,774	12,678	82,353	60,399
6	HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 2	10,929	18,973	522,374	103,965

Tab. 27: Výsledné parametry prostorového hodnocení

10.4.3 Objem výstupků a prohlubní [49]

Objem výstupků a prohlubní lze označit za důležitý ukazatel kvality povrchu. Mimo jiné se jedná o ukazatel míry náročnosti na opracování povrchu. S rostoucím objemem výstupků a prohlubní se samozřejmě zvyšuje i náročnost na opracování povrchu. V tab. 28 se objevují základní parametry pro měření objemu výstupků a prohlubní.

Označení	Název	Jednotka
V_{mp}	Objem výstupků materiálu	[μm]
V_{mc}	Objem jádra materiálu	[μm]
V_{vc}	Nevyplněný objem jádra	[μm]
V_{vv}	Nevyplněný objem prohlubní	[μm]

Tab. 28: Základní veličiny pro měření objemu výstupků a prohlubní

V tab. 29 byly uvedeny výsledky amplitudových hodnot objemů výstupků a prohlubní. Pro každou variantu tepelného zpracování bylo provedeno jedno měření.

Číslo vzorku	Označení	$V_{mp} [\mu\text{m}]$	$V_{mc} [\mu\text{m}]$	$V_{vc} [\mu\text{m}]$	$V_{vv} [\mu\text{m}]$
1	Bez tepelného zpracování	1,22	14,366	21,886	1,847
2	Tepelné zpracování při teplotě TZ 1	0,902	13,291	18,877	1,622
3	Tepelné zpracování při teplotě TZ 2	0,787	10,698	15,249	1,415
4	HIP	0,964	14,062	19,952	1,713
5	HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 1	0,813	10,615	15,223	1,326
6	HIP s tepelným zpracováním při teplotě TZ 2	1,214	10,714	15,2	2,106

Tab. 29: Výsledné parametry objemového hodnocení výstupků a prohlubní.

10.4.4 Obecné shrnutí výsledků

Textura povrchu se zdá být pro 3D výtisky naprosto zásadní faktor. Pokud totiž bude textura povrchu špatná, bude u 3D výtisků působit jako koncentrátor napětí. U těchto výtisků se tedy dá předpokládat, že vydrží menší počet cyklů při působícím napětí. Výsledky hodnocení textury povrchu lze shrnout tak, že u všech měření kvality povrchu bylo dosaženo nejnižší kvality povrchu u vzorků bez tepelného zpracování. Hodnota naměřené drsnosti povrchu R_a před tepelným zpracováním byla $13,934 \pm 1,784 \mu\text{m}$. Tuto hodnotu lze porovnat s předpokládanou hodnotou $13 \pm 5 \mu\text{m}$ ihned po tisku, jenž byla uvedena v teoretické části. Bylo tedy docíleno shodného výsledku. U vzorků po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 2 byl dosaženo nejlepší hodnoty drsnosti povrchu R_a $7,585 \pm 0,251 \mu\text{m}$. Oproti tomu byla drsnost povrchu po HIP s tepelným zpracováním TZ 1 přibližně o 10 % vyšší a po

HIP dokonce o cca 28 % vyšší. U vzorků po HIP, nebo HIP s následným tepelným zpracováním byly získány nejlepší výsledky při měření drsnosti povrchu. U výsledků prostorového hodnocení či měření objemu výstupků a prohlubní už ovšem tak dobrých výsledků dosaženo nebylo. Jedinou výjimkou byly vzorky po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 1, které spolu se vzorky s tepelným zpracováním při teplotě TZ 2 docílily celkově nejlepších výsledků měření textury povrchu. Tyto vzorky tedy měly nejlepší kvalitu povrchu. Měření textury povrchu je možné shrnout tak, že navrženými tepelnými zpracováními byla oproti vzorkům bez tepelného zpracování pozitivně ovlivněna textura povrchu.

11 Metalografická analýza

Pro metalografickou analýzu bylo důležité zvolit dobré místo odběru vzorků. Na samotném zkušebním vzorku nebylo mnoho alternativ, proto byla jako místo odběru v příčném i podélném směru zvolena oblast upínací části zkušební tyče. Dále byl uveden obecný postup přípravy metalografických vzorků:

- Odběr vzorků (metalografická pila Struers Discotom 6)
- Zapečení metalografických vzorků (Lis Struers Citopress 10 a zalévací hmota PolyFast)
- Broušení (Metalografická bruska a leštička Struers Tegramin 25)
- Leštění (Metalografická bruska a leštička Struers Tegramin 25)
- Leptání
- Pozorování vzorků pod mikroskopem

Žádná z uvedených metod přípravy metalografických výbrusů se nevymykala zavedeným postupům, proto nebudou podrobněji popisovány. Je ovšem důležité poznamenat, že velkým problémem pro přípravu zkušebních vzorků bylo leptání. Ocel AISI 316L je totiž austenitická ocel, která se velmi obtížně chemicky leptá. Proto bylo při leptání vzorků bez tepelného zpracování použito elektrolytické leptání (parametry leptání byly uvedeny v tab. 30). Pro tento způsob leptání byl zvolen elektrolyt s tímto chemickým složením (36,1 ml HCl, 4 ml HNO_3 a 750 ml H_2O). Pro vzorky po tepelném zpracování bylo použito leptadlo Vogel (složení: 180 ml HCl, 18 ml HNO_3 , 180 ml H_2O) zahřáté na teplotu 70 °C, doba leptání byla 10 – 15 vteřin.

Clona [cm ²]	Teplota [°C]	Napětí [V]	Průtok elektrolytu [0 - 20]	Doba leptání [s]
1/2	20	5	12	15

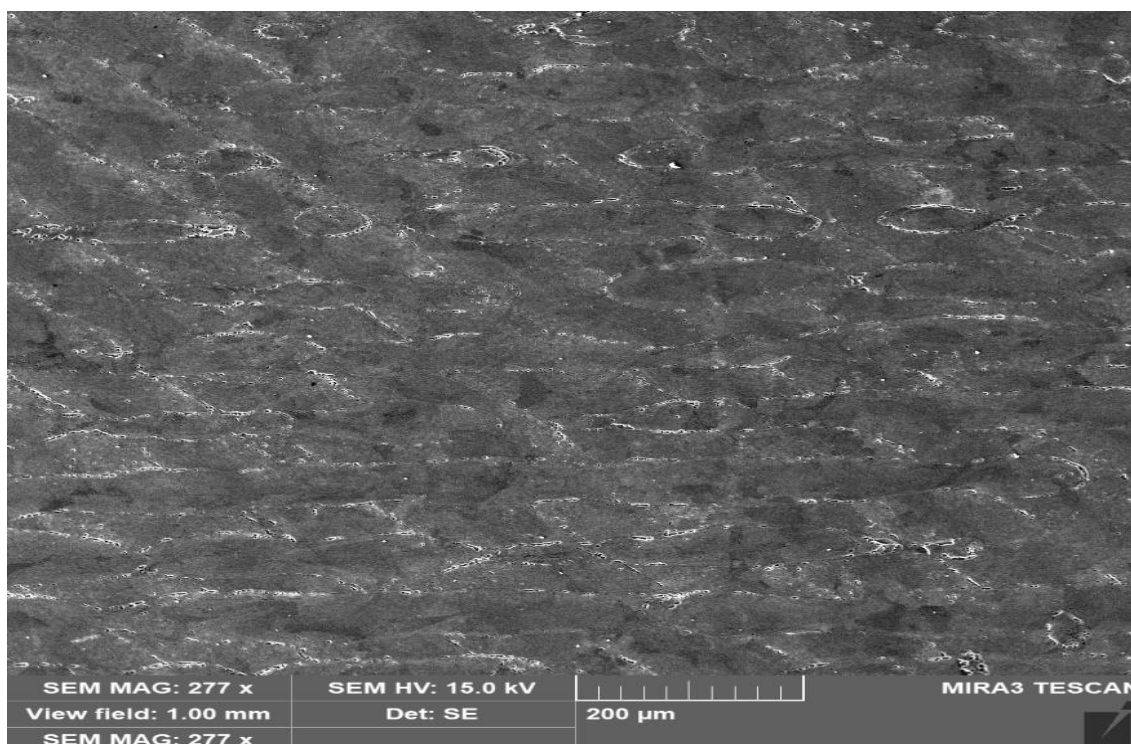
Tab. 30: Shrnutí nastavených parametrů při elektrolytickém leptání

11.1 Pozorování mikrostruktury

V této části jsou představeny jednotlivé mikrostruktury u zkušebních vzorků, které jsou uvedeny v jednotlivých kapitolách podle druhu tepelného zpracování.

11.1.1 Mikrostruktura oceli AISI 316L bez tepelného zpracování

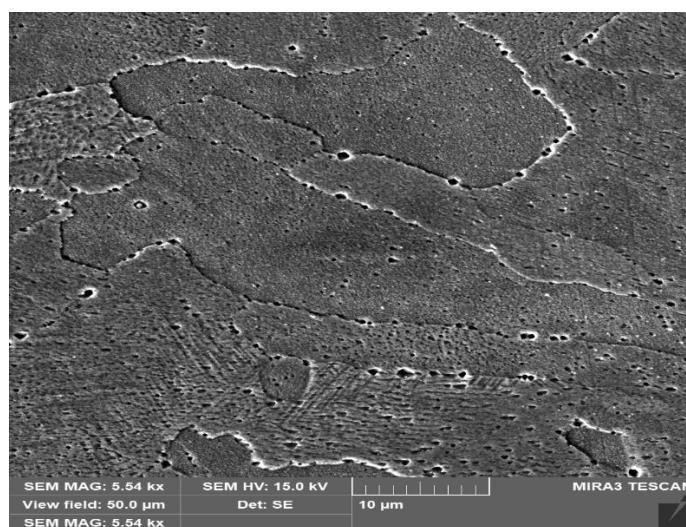
Jedná se o mikrostrukturu oceli ihned po tisku, bez tepelného zpracování. Tato mikrostruktura se při pozorování vyznačuje viditelnými hranicemi taveniny a mikrosegregací. Na obr. 31 odebraném v příčném směru bylo možné pozorovat hranice taveniny, karbidy a orientaci zrn ve směru tisku. Tato struktura byla způsobena vysokou rychlostí ochlazování po tisku. V příloze (15) můžeme vidět i mikrostrukturu vzorku bez tepelného zpracování v podélném směru [36].



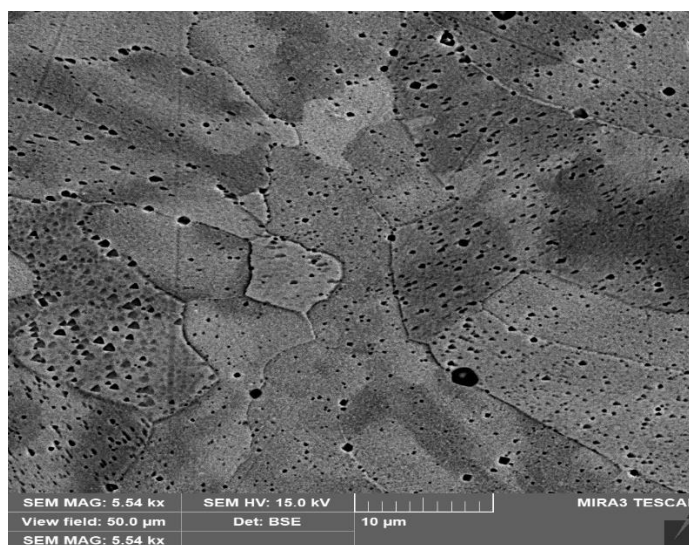
Obr. 31: Mikrostruktura vzorku oceli AISI 316L bez tepelného zpracování

11.1.2 Mikrostruktura po tepelném zpracování

Tato mikrostruktura zahrnuje pouze vzorky s tepelným zpracováním (bez HIP). Proces tepelného zpracování nezměnil tvar zrn. Došlo ovšem k odstranění hranic taveniny, stop po laseru a dendritické struktury po tisku. Na obr. 32 můžeme vidět mikrostrukturu po tepelném zpracování při teplotě TZ 1 (vzorek odebrán v příčném směru) a na obr. 33 mikrostrukturu po tepelném zpracování při teplotě TZ 2 (vzorek odebrán v příčném směru) bylo dále možné pozorovat precipitáty, které vznikaly především na hranicích zrn. Na obr. 33 bylo možné pozorovat, že se precipitáty nesoustředily jen na hranice zrn, ale byly rozloženy více homogenně. Precipitáty hrají důležitou roli při zpevňování oceli. Mikrostruktury ostatních vzorků v podélném směru byly uvedeny v příloze (15), [36].



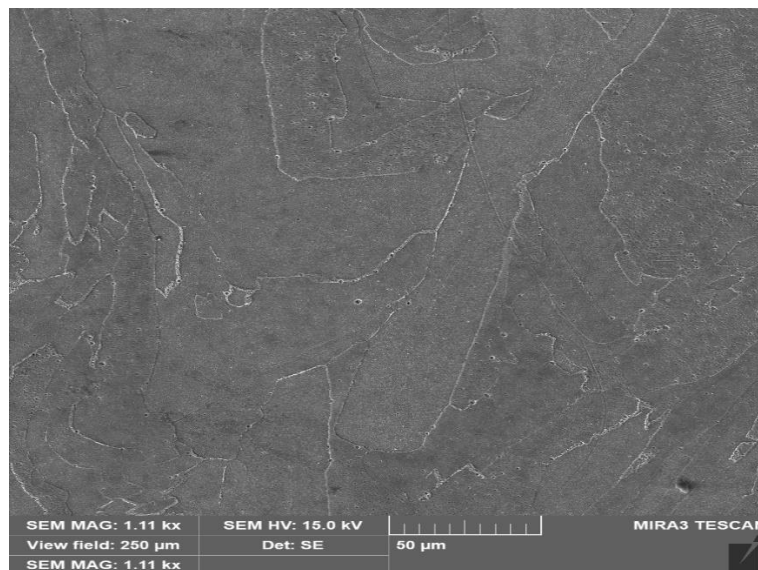
Obr. 32: Mikrostruktura po tepelném zpracování při teplotě TZ 1



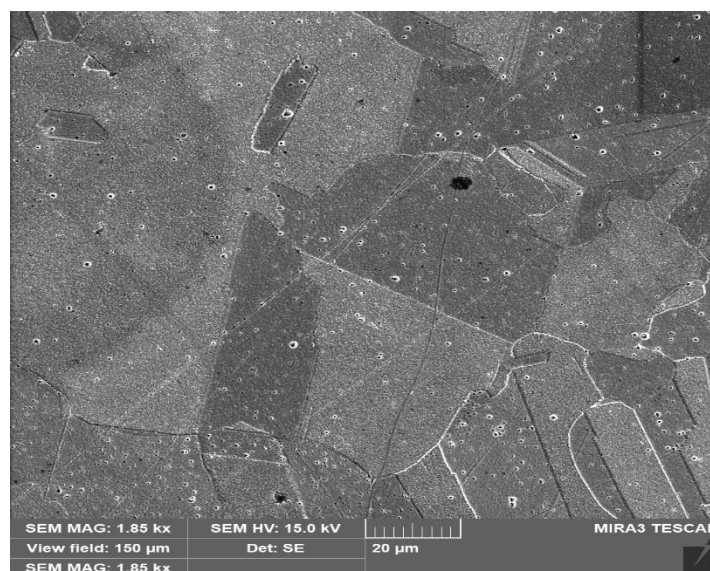
Obr. 33: Mikrostruktura po tepelném zpracování při teplotě TZ 2

11.1.3 Mikrostruktura po HIP a HIP s tepelným zpracováním

Mikrostruktura těchto zkušebních vzorků v praxi dokázala, že bylo dosaženo rozdílné velikosti zrn oproti předešlým typům (zrna byla větší). K tomuto faktu nejspíše přispěl tlak působící při HIP. Struktura byla jinak vcelku podobná předešlým vzorkům po tepelném zpracování. Na obr. 34 a na obr. 35 (oba vzorky odebrány v podélném směru) opět můžeme pozorovat tvorbu precipitátů, které zde již nebyly soustředěny výhradně na hranicích zrn. Tepelným zpracováním bylo u vzorků po izostatickém lisování za tepla dosaženo mnohem vyššího výskytu precipitátů. Mikrostruktury ostatních vzorků byly uvedeny v příloze (15), [36].



Obr. 34: Mikrostruktura po HIP



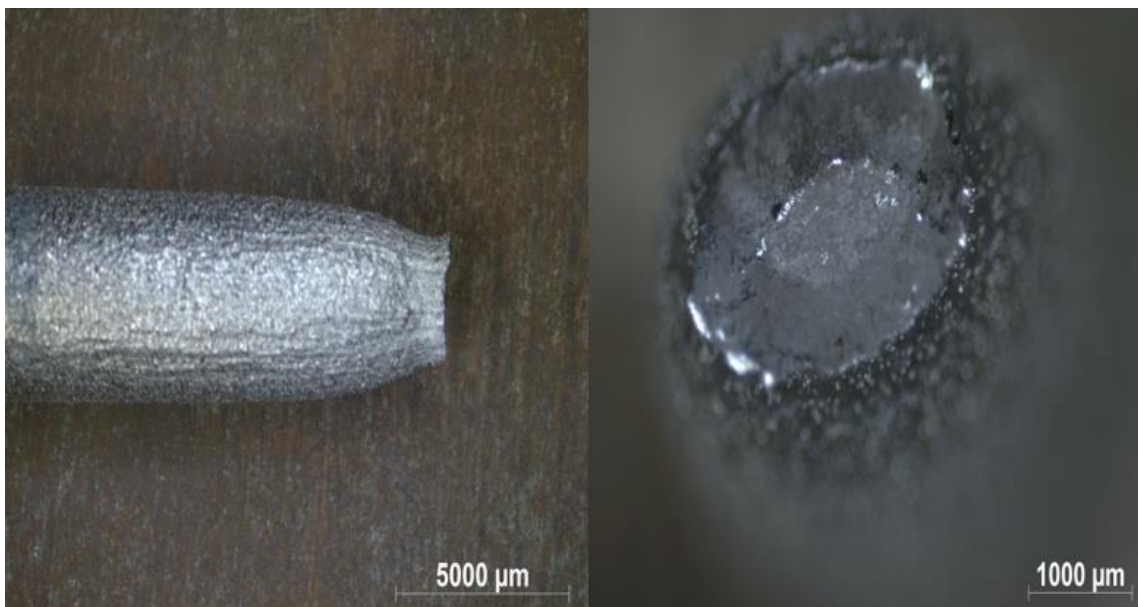
Obr. 35: Mikrostruktura po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 1

12 Fraktografická analýza

Fraktografická analýza zkušebních vzorků byla provedena na konfokálním mikroskopu Olympus LEXT. V první části byly postupně porovnány obsahy lomové plochy. Z makroskopického hlediska je lom charakterizován velikostí, homogenitou v místě lomu a orientací lomové plochy ke směru působení zatěžování [43].

Pro pozorování lomové plochy je velmi důležité rozpoznat křehký a dutinový lom. Křehký lom vzniká u křehkých materiálů a jeho lomová plocha má lesklý zrnitý vzhled. Dutinový lom (znám též jako kalíškový) vzniká, pokud ve střední části zkušební vzorku dojde k tvorbě a šíření mikroskopických dutin. Oblast lomové plochy je tedy velmi důležitá pro správné charakterizování vytvořeného lomu [43].

Fraktografická analýza začala u vzorku bez tepelného zpracování, který můžeme vidět na obr. 36. Na tomto obrázku a na obrázcích ostatních zkušebních vzorků a jejich lomových ploch, které jsou uvedeny v příloze (15) můžeme vidět typické znaky houževnatých (tvárných) lomů. K tvorbě houževnatého lomu je oproti křehkému lomu potřeba velké množství energie, ta se projevuje velkou plastickou deformací v oblasti lomu a tvorbou krčku (dělení lomu z hlediska energie potřebné k vzniku lomové plochy) [43].



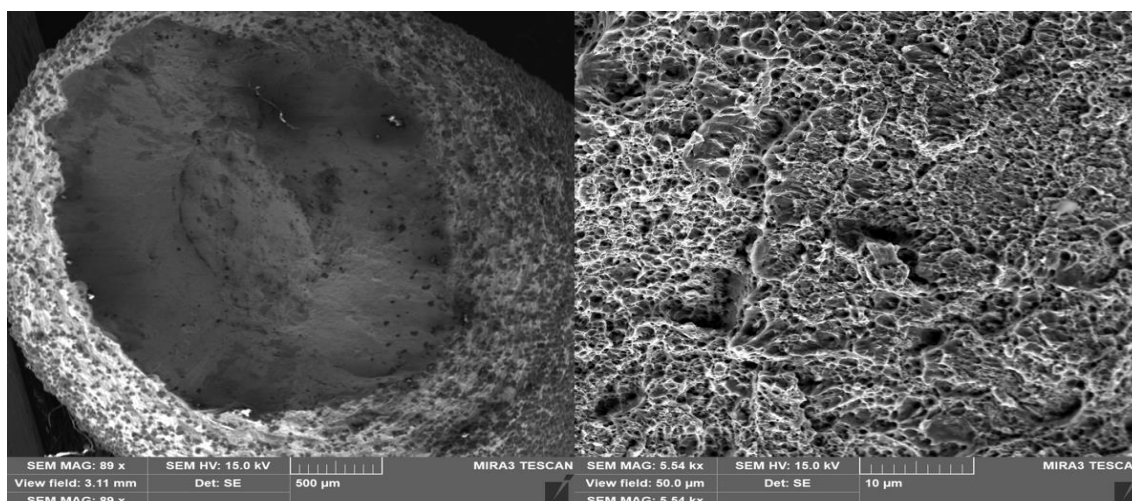
Obr. 36: Vyhodnocení lomové plochy vzorku bez tepelného zpracování

U předešlých vzorků se zdálo být na obrázcích zkušebních vzorků a lomové plochy jasně prokázáno, že se jedná o tvárný lom, který se u všechny zkušebních vzorků vytvořil. Tento pohled byl ovšem trochu zavádějící. Z hlediska mechanismu procesu porušování můžeme lom

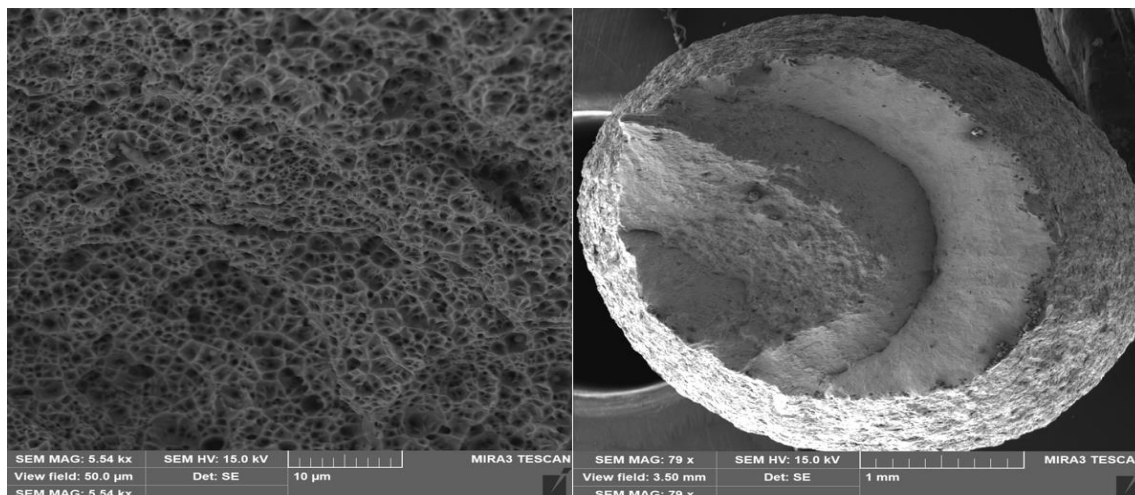
rozdělit na transkrystalický a interkrystalický. Na obr. 37 a obr. 38 můžeme vidět transkrystalický lom [36], [50].

Podle odborné literatury o tomto tématu se transkrystalický lom dá ještě dále rozdělit na štěpný a tvárný. Na obr. 37 (vzorek bez tepelného zpracování) můžeme pozorovat fazetky (vytvořily se kvůli karbidům na hranicích zrn), které jsou typické pro transkrystalický štěpný lom. Nedojde zde tedy ke tvárnému porušení, ale ke křehkému. Na obr. 38 (vzorek po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 2) oproti tomu můžeme pozorovat jamkovou morfologii, která je typická pro tvárné porušení. Tento typ porušení můžeme popsat tak, že se trhlinka šíří skluzovým systémem a vyčerpává plastickou deformaci. Spotřebovává tedy více energie a tento materiál je více houževnatý [36], [50].

Až podrobnější pohled do mikrostruktury lomové plochy tedy odhalil, že ne u všech zkušebních vzorků došlo k tvorbě tvárného lomu. Dalším poznatkem a závěrem je, že tepelné zpracování velmi ovlivnilo míru houževnatosti materiálu. Obrázky dalších mikrostruktur lomové plochy jsou uvedeny v příloze (15), [36], [50].



Obr. 37: Mikrostruktura lomové plochy vzorku bez tepelného zpracování



Obr. 38: Mikrostruktura lomové plochy vzorku po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 2

13 Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout post-processing pro aditivně vyrobené zkušební vzorky. Některé vzorky zůstaly ve stavu po vytisknutí. Na dalších bylo provedeno tepelné zpracování či HIP. Následná měření mechanických vlastností pomáhají vyhodnotit a vybrat nejvhodnější metodu post-processingu.

Mechanické zkoušky poukázaly na fakt, že vzorky bez tepelného zpracování z oceli AISI 316L dosahují nejvyšších hodnot tvrdosti, meze pevnosti v tahu a meze kluzu. Tyto vlastnosti jsou spojeny se strukturou po tisku, která vzniká vlivem příliš rychlého ochlazení po tisku. Naproti tomu vzorky tepelně zpracované při teplotě TZ 1 a TZ 2 dosahují lepších hodnot tažnosti. Tedy i mnohem lepšího poměru mezi pevností a houževnatostí. Obě varianty tepelného zpracování zároveň dosahují dobrých výsledků při analýze pórovitosti a textury povrchu.

Pokud zvolíme metodu post-processingu, kdy je použito HIP, nebo HIP s následným tepelným zpracováním, bude tepelným zpracováním ještě zesílen účinek HIP. Bude tedy vlivem ochlazení po tepelném zpracování dosaženo ještě nižší meze kluzu. Zároveň bude dosaženo nejvyšší tažnosti a nejnižší pórovitosti, s výbornou kvalitou povrchu.

Tyto vlastnosti bylo klíčové ověřit v praktické části, jelikož bylo prokázáno, že jsou spojeny se zlepšením únavových vlastností a prodloužením životnosti dílů. Během vyhodnocení mechanických vlastností, nebo při metalografické či fraktografické analýze byly tyto předpoklady potvrzeny.

Navržené režimy tepelného zpracování měly za cíl odstranit typickou strukturu po tisku, která je velmi jemná a také je v ní obsaženo velké množství karbidů. Aplikováním tepelného zpracování (žihání) je naopak docíleno mnohem hrubší struktury (u oceli AISI 316L tedy hrubšího austenitu). Hrubší struktura je obecně oproti jemnozrnné struktuře spojena s nižší mezí pevnosti v tahu a tvrdostí. Spolu s tímto mechanismem u navrženého tepelného zpracování podobně působí na vlastnosti výtisků i fakt, že je odstraněno velké množství karbidů. Ty jsou velmi tvrdé, křehké a snižují tažnost oceli. Výsledné mechanické vlastnosti po tepelném zpracování tedy budou mít naopak nižší pevnost v tahu, tvrdost a vyšší tažnost. Po tepelném zpracování lze tedy očekávat nejdlejší životnost během provozu.

Jako nejvhodnější metodu post-processingu pro ocel AISI 316L volím varianta HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 2, konstantní dobou výdrže na této teplotě a následným ochlazením ve vodě.

Tepelné zpracování u všech plastových vzorků mírně snížilo mez kluzu a mez pevnosti v tahu. Oproti tomu bylo dosaženo vyšší tažnosti (kromě vzorku 1B). Nejvyšších hodnot meze kluzu a meze pevnosti dosáhl před i po tepelném zpracování červený vzorek s přímočarou 100 % výplní. Vzorek 2 s přímočarou 70 % výplní měl třetí nejvyšší hodnotu meze kluzu i pevnosti v tahu před tepelným zpracováním a druhou nejvyšší po tepelném zpracování. Tažnost tohoto vzorku byla ze všech tepelně nezpracovaných vzorků nejvyšší a z tepelně zpracovaných vzorků druhá nejvyšší.

Plastové vzorky se 70 % přímočarou výplní a tepelným zpracováním dosáhly až druhého nejlepšího výsledku po tahové zkoušce. Vzhledem k nižším nákladům na výrobu je přesto tato varianta doporučena jako nejlepší. Teplota tepelného zpracování byla obecně zvolena 1,5 – 1,6 násobek teploty skelného přechodu s dobou výdrže na teplotě 30 minut a s následným ochlazením na vzduchu, což snížilo pevnost v tahu a mez kluzu těchto vzorků, ale zároveň zvýšilo jejich tažnost.

14 Seznam použitých zdrojů

- [1] HRBÁČKOVÁ, Taťána. *The effect of heat treatment on mechanical properties and microstructure of additively manufactured components* [online]. Plzeň [cit.2021-09-29]. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/461/1/012026>
- [2] FLYNT, Joseph. *Has 3D Printing Changed the World?* [online]. [cit.2021-09-30]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/has-3d-printing-changed-the-world/>

- [3] TWI. *What is 3D printing? – Technology definition and types* [online]. [cit.2021-09-30]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing#Historyof3DPrinting>
- [4] FLYNT, Joseph. *How 3D Printing Will Be Used in 2021 and Beyond* [online]. [cit.2021-10-06]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printing-in-2021/>
- [5] KUMAR, Sanjay. *Additive Manufacturing Processes*. North York: York University, 205 s. ISBN 978-3-030-45088-5.
- [6] ALZA. *3D tisk: jak funguje, kde stáhnout předlohy a jak začít?* [online]. [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/3d-tisk>
- [7] WIKIPEDIE. *Galvanometr*. [online]. [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Galvanometr>
- [8] Mounde, Alex. *Adaption of 3D Printing for Manufacturing in Kenya* [online]. [cit.2021-10-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/338991408_Adaption_of_3D_Printing_for_Manufacturing_in_Kenya
- [9] ALL3DP. *The Types of 3D Printing Technology* [online]. [cit.2021-10-24]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- [10] HULLETTE, Tobias. *How Does a 3D Printer Work? – Simply Explained* [online]. [cit.2021-10-17]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/how-does-a-3d-printer-work-simply-explained/>
- [11] DK METAL. *Přehled technologií 3D tisku* [online]. [cit.2021-10-24]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [12] MATERIALPRO3D. *FFF/FDM Technologie* [online]. [cit.2021-10-30]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/fff-fdm-technologie/>
- [13] CUTU. *SLS (Selective Laser Sintering)* [online]. [cit.2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/126/sls-selektivni-laserove-spekani>
- [14] COTU. *3D tisk spékáním práškové vrstvy* [online]. [cit.2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/90/praskovy-3d-tisk>
- [15] PRUSAPRINTERS. *PLA* [online]. [cit.2021-11-08]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/pla_2062#_ga=2.55438635.1002294925.1637135012-1109772133.1635585374
- [16] MATERIALPRO3D. *PLA* [online]. [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>

- [17] PRUSAPRINTERS. *PETG* [online]. [cit 2021-11-09]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/petg_2059#_ga=2.55438635.1002294925.1637135012-1109772133.1635585374
- [18] MATERIALPRO3D. *PET, PET-G* [online]. [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g/>
- [19] PRUSAPRINTERS. *ABS* [online]. [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/abs_2058#_ga=2.266267663.1002294925.1637135012-1109772133.1635585374
- [20] MATERIALPRO3D. *ABS* [online]. [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
- [21] PRUSAPRINTERS. *ASA* [online]. [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/asa_1809
- [22] MATERIALPRO3D. *ASA* [online]. [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa/>
- [23] MATERIALPRO3D. *PEEK* [online]. [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/peek/>
- [24] MATMATCH. *Metal Powders for 3D Printing: Characteristics, Production, Processing and Applications* [online]. [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: <https://matmatch.com/learn/material/metal-powders-3d-printing>
- [25] 3D PRINTING INDUSTRY. *A Look into Powder Materials for Metal 3D Printing* [online]. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/a-look-into-powder-materials-for-metal-3d-printing-57788/>
- [26] PROTO3000. *Maraging Steel (MS1)* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://proto3000.com/materials/dmls-maraging-steel-ms1/>
- [27] PROTO3000. *Material Data Sheet MS1* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://proto3000.com/wp-content/uploads/2018/03/MSDS-MaragingSteel_MS1.pdf
- [28] PROTO3000. *Stainless Steel* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://proto3000.com/materials/dmls-stainless-steel-316l/#highlights>
- [29] PROTO3000. *Material Data Sheet 316 L* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: https://proto3000.com/wp-content/uploads/2018/03/MSDS-StainlessSteel_316L.pdf
- [30] TECRON. *Tipy pro tvorbu modelů pro 3D tisk* [online]. [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://tecron.cz/konstrukce-modelu-pro-3d-tisk/>

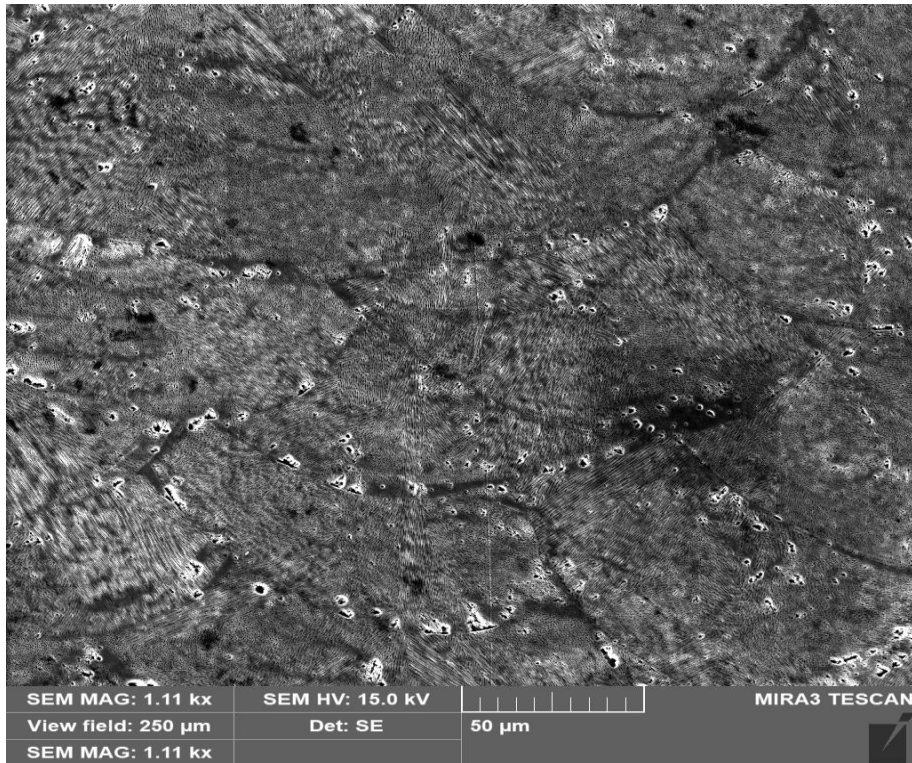
- [31] AMFG. *5 Common Problems Faced with metal 3D printing – And How You Can Fix Them* [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://amfg.ai/2018/05/01/5-problems-faced-when-3d-printing-metals-and-how-to-fix-them/>
- [32] OTEC. Einfach Glänzend Hightech Schmuckpolitur [online]. [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: https://www.otec.de/fileadmin/uploads/Downloads/Prospekte/Prospekt_Schmuckindustrie_EPAG_CF_DE.pdf
- [33] DEBROY, T. a kolektiv. Additive manufacturing of metallic components – Process structure and properties [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642517301172#>
- [34] INSIDE METAL ADDITIVE MANUFACTURING. *Porosity in metal components made using Selective Laser Melting* [online]. [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/porosity-in-metal-components-made-using-selective-laser-melting>
- [35] METAL AM. Hot Isostatic Pressing: *Improving quality and performance in AM parts production* [online]. [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.metal-am.com/articles/hot-isostatic-pressing-improving-quality-and-performance-in-3d-printing/>
- [36] CHADHA, Kanwal a kolektiv. *Effect of annealing heat treatment on the microstructural evolution and mechanical properties of hot isostatic pressed 316 L stainless steel fabricated by laser powder bed fusion* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.industrialheating.com/ext/resources/White-Papers/2020/metals-10-00753.pdf>
- [37] PRUSAPRINTERS. *Jak zesílit svůj výtisk žháním* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/jak-zesilit-svuj-vytisk-zihanim_31088/
- [38] CHEN, Xiaohui a kolektiv. *Effect of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel 316L using arc additive manufacturing* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509317313102#!>
- [39] KŘÍŽ, Antonín. *Vliv mikrostruktury slinutých karbidů na životnost nástrojů a strojních součástí* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/fraktografie_prednaska2.pdf

- [40] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [41] DIRECT INDUSTRY. *Linn High Therm* [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://pdf.directindustry.com/pdf/linn-high-therm/dental/16483-591664.html>
- [42] PRUSAPRINTERS. *Vše co potřebujete znát o tiskových výplních* [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://blog.prusaprinters.org/cs/vse-co-potrebuji-43579/>
- [43] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 978-80-7043-417-8.
- [44] OPI ZČU. *Strojírenské materiály* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/staticke_zkouseni_cviceni.pdf
- [45] KFY ZČU. *Chyby měření* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://www.kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FP1/chyby.pdf>
- [46] OPI ZČU. *Laserový konfokální mikroskop* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/historie_mikroskopie.pdf
- [47] PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technická měření a metrologie* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: [Technická měření a metrologie VŠB.pdf](#)
- [48] LIANG, Xiaoyu. *High cycle fatigue behaviour of additive manufactured stainless steel 316 L: free surface effect and microstructural heterogeneity* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02951486/file/liang.pdf>
- [49] NOVÁK, Zdeněk. *Prostorové měření a hodnocení textury povrchu přístroji Taylor Hobson* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf
- [50] MENDELU. *Fraktografie – nauka o lomech* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=3605&typ=html

15 Seznam příloh

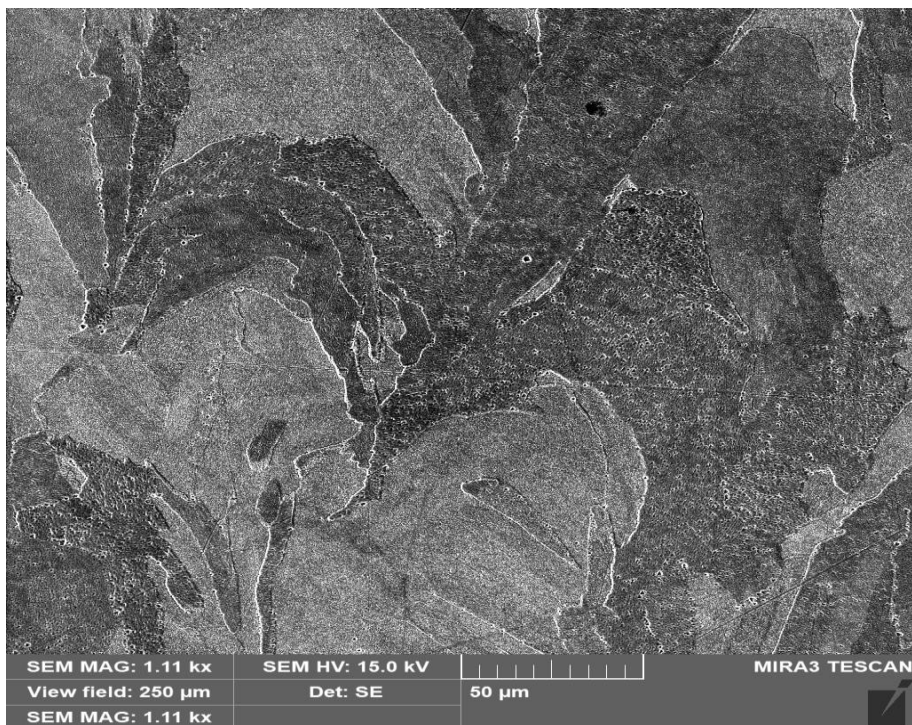
Obrázek 1: Mikrostruktura vzorku oceli AISI 316L bez tepelného zpracování

v podélném směru s. 88



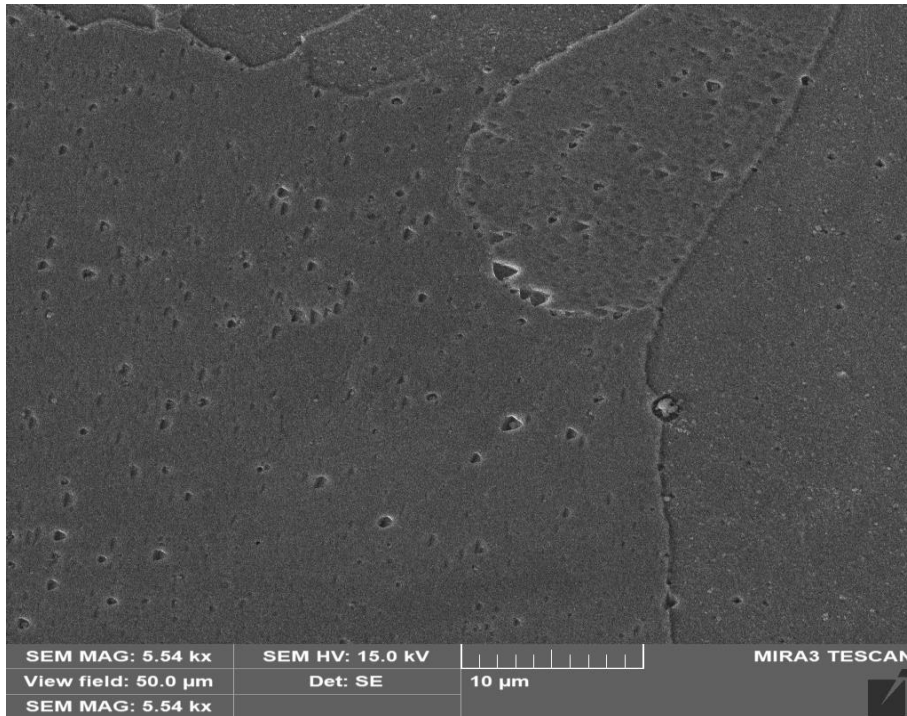
Obrázek 2: Mikrostruktura po tepelném zpracování při teplotě TZ 1

v podélném směru s. 89

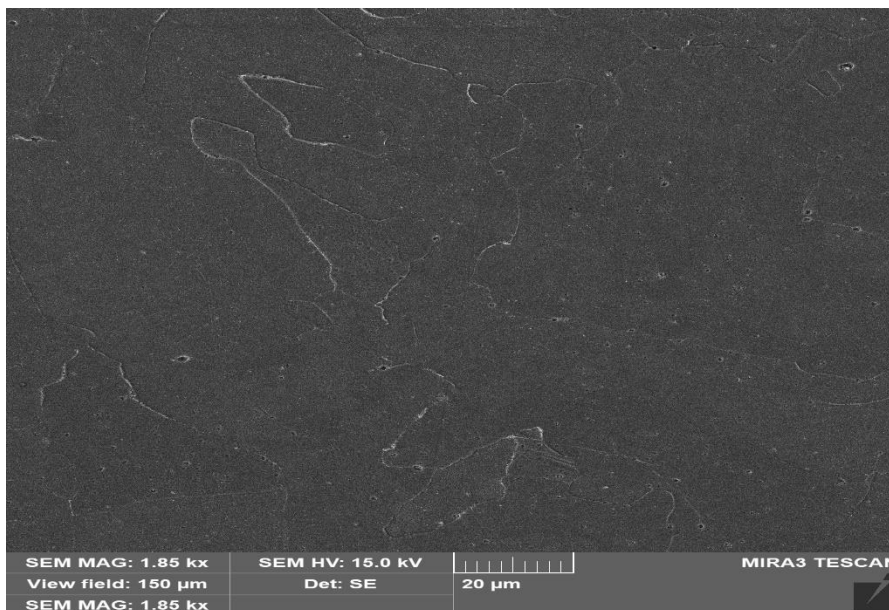


Obrázek 3: Mikrostruktura po tepelném zpracování při teplotě TZ 1

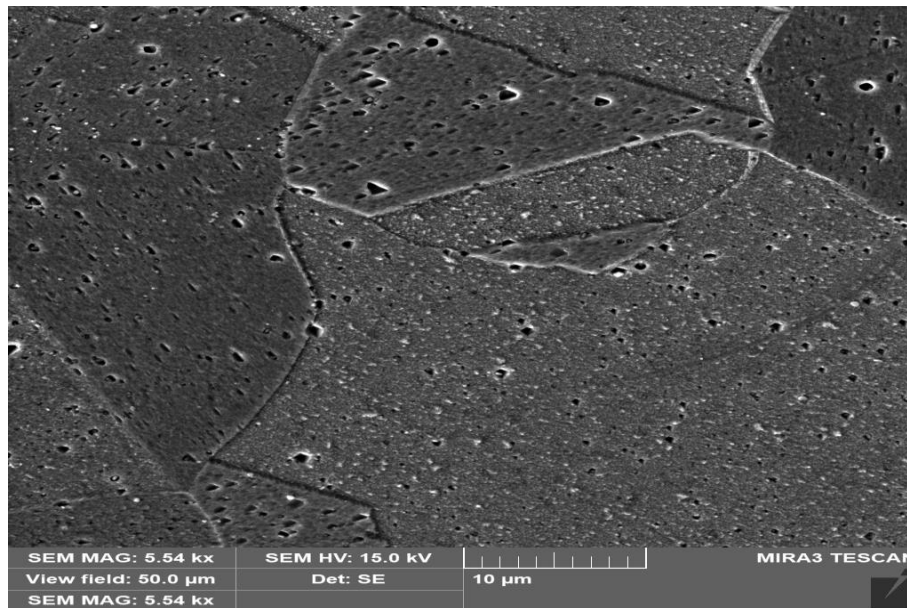
v podélném směru s. 89



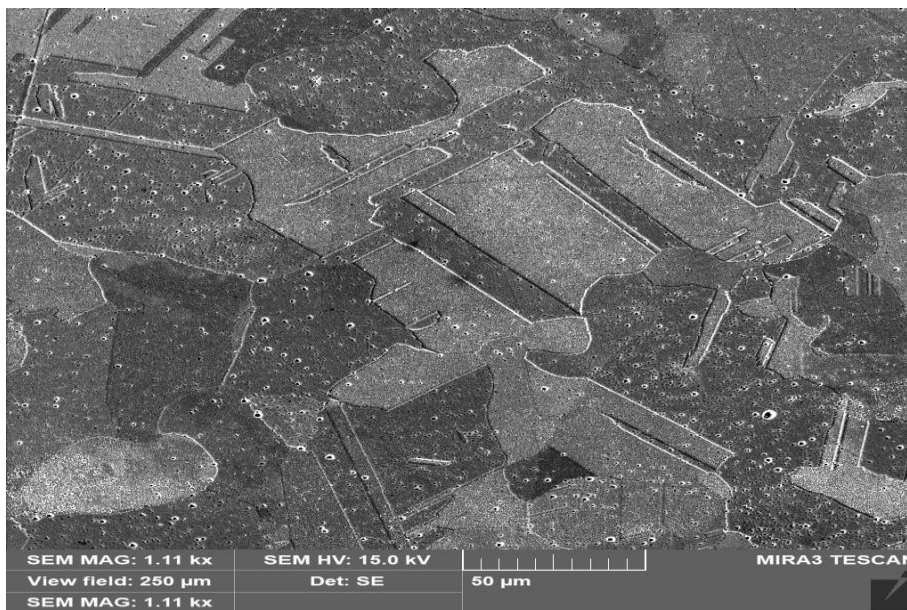
Obrázek 4: Mikrostruktura po HIP v příčném směru s. 90



**Obrázek 5: Mikrostruktura po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 1
v příčném směru s. 90**



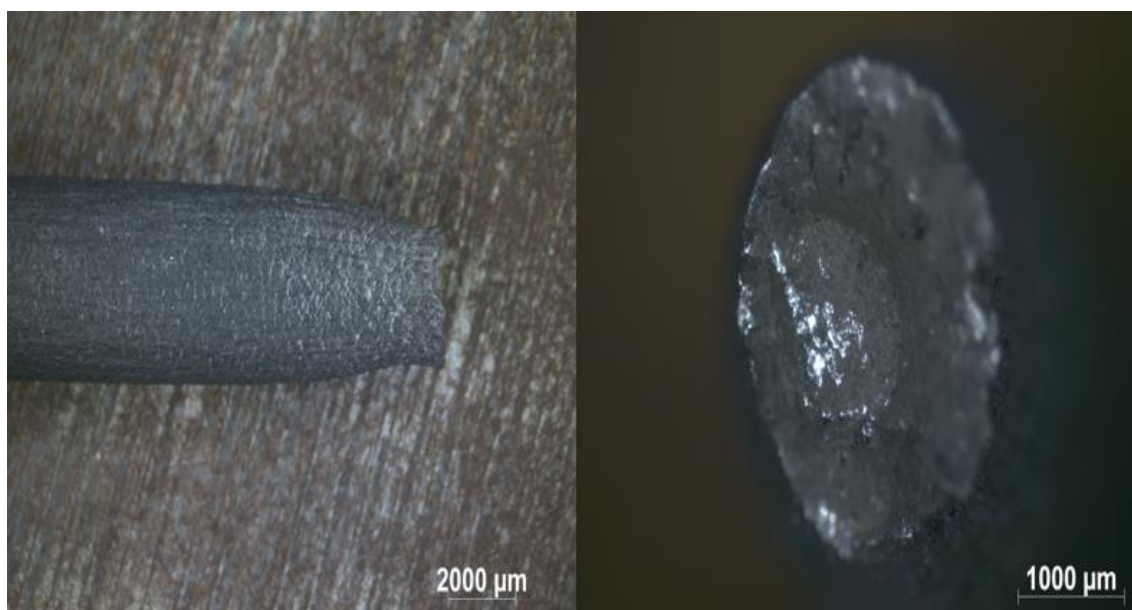
**Obrázek 6: Mikrostruktura po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 2
v příčném směru s. 91**



**Obrázek 7: Mikrostruktura po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 2
v podélném směru s. 91**



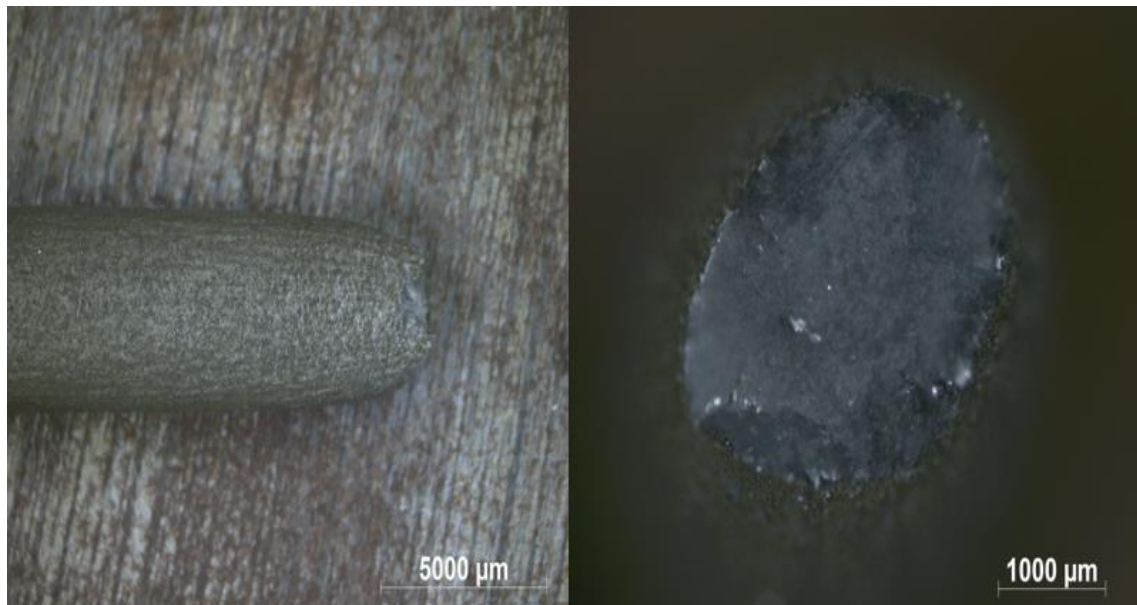
Obrázek 8: Vyhodnocení lomové plochy vzorku po tepelném zpracování při teplotě TZ 1 s. 92



Obrázek 9: Vyhodnocení lomové plochy vzorku po tepelném zpracování při teplotě TZ 2 s. 92



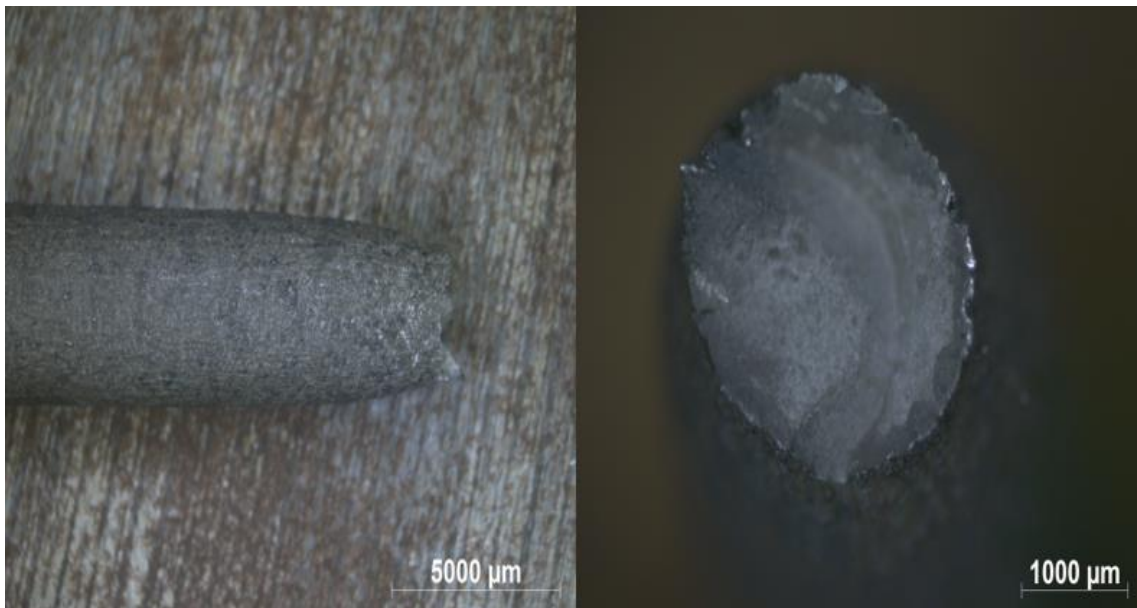
Obrázek 10: Vyhodnocení lomové plochy vzorku po HIP..... s. 93



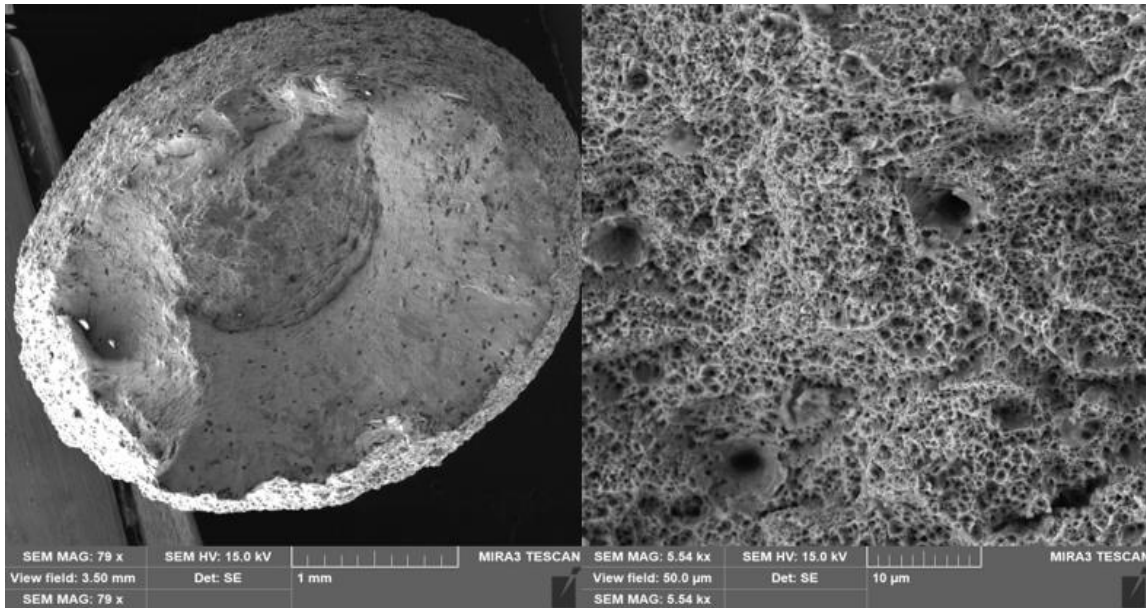
Obrázek 11: Vyhodnocení lomové plochy vzorku po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 1..... s. 93



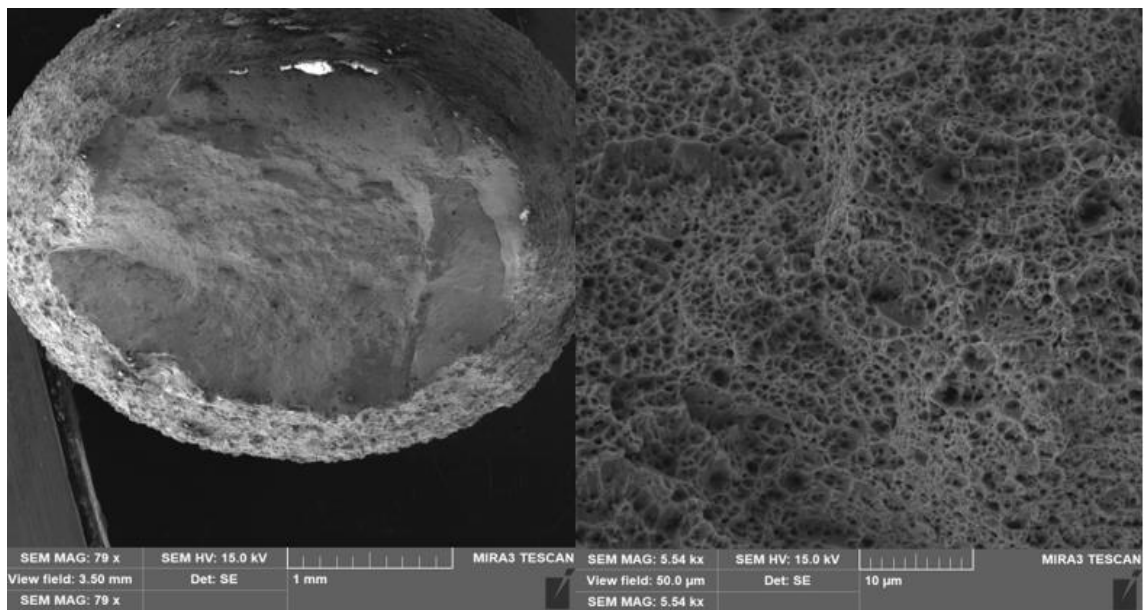
Obrázek 12: Vyhodnocení lomové plochy vzorku po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 2..... s. 94



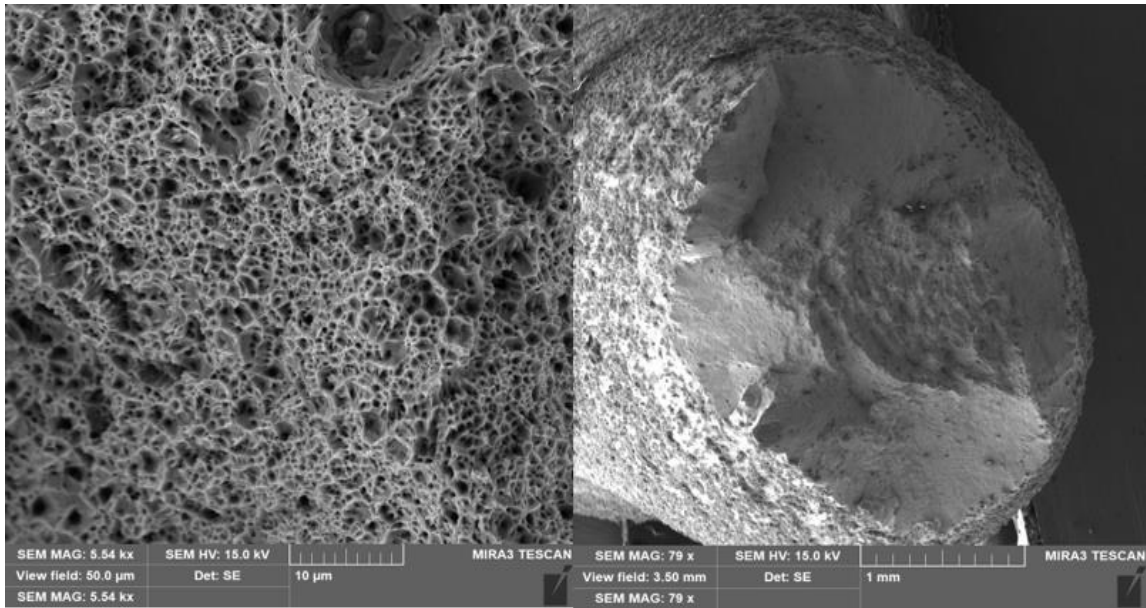
Obrázek 13: Mikrostruktura lomové plochy vzorku po tepelném zpracování při teplotě TZ 1 s. 94



Obrázek 14: Mikrostruktura lomové plochy vzorku po tepelném zpracování při teplotě TZ 2..... s. 95



Obrázek 15: Mikrostruktura lomové plochy vzorku po HIP s. 95



Obrázek 16: Mikrostruktura lomové plochy vzorku po HIP s následným tepelným zpracováním při teplotě TZ 1 s. 96

