



Kvalitativní porovnání dílů vyrobených z oceli 316L aditivními technologiemi FFF a SLM

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Výrobní systémy a procesy

Autor práce:

Bc. Jakub Macháček

Vedoucí práce:

Ing. Jirí Šafka, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace

Konzultanti práce:

Ing. Martin Seidl, Ph.D.

Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace

Ing. Lukáš Voleský, Ph.D.

Katedra materiálu





Zadání diplomové práce

Kvalitativní porovnání dílů vyrobených z oceli 316L aditivními technologiemi FFF a SLM

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Macháček**
Osobní číslo: S18000236
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní systémy a procesy
Zadávací katedra: Katedra výrobních systémů a automatizace
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

Cílem diplomové práce je otestovat experimentální materiál 316L s polymerním nosičem na technologii FFF a porovnat zpracování materiálu 316L s technologií SLM. Provést studii proveditelnosti tisku a vlivu technologických parametrů na následnou sintraci vzorků. Otestovat postup debinding a sintrace pro odstranění polymerní části. Dále zajistit 3D tisk testovacích součástí pro potřeby ověření vybraných mechanických vlastností dílů z materiálu 316L a tyto vlastnosti porovnat s materiálem 316L na technologii SLM.

Práce bude obsahovat rozbor problematiky, naplánování a provedení experimentálních měření a vyhodnocení získaných dat.

1. Provést rešerši v oblasti zpracovatelnosti materiálu s polymerním nosičem u metody FFF.
2. Seznámit se s technologií FFF a experimentálním materiálem.
3. Identifikovat a optimalizovat procesní parametry pro 3D tisk a debinding, sintraci.
4. Provedení vybraných mechanických testů – vlastní testy budou definovány v průběhu zpracování diplomové práce.
5. Vyhodnocení výsledků, závěr.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby
60 stran textu včetně příloh
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] Ultrafuse 316L: BASF. BASF [online]. Německo: Basf, 2019, 2019 [cit. 2019-09-12]. Dostupné z: https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/locations/europe/german-companies/basf-3d-printing-solutions-gmbh/metal-solutions/Ultrafuse_316L.html.
- [2] NOORANI, R. Rapid Prototyping: principles and applications. Hoboken: John Wiley and Sons, 2006. ISBN 0-471-73001-7.
- [3] JACOBS, P. F. Stereolithography and other RP and M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling. New York: ASME Press, 1996. ISBN 0-87263-467-1.
- [3] GIBSON, I., D.W. ROSEN a B. STUCKER. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.
- [4] HOPKINSON, N., R. HAGUE a P. DICKENS. Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age. Chichester: Wiley, 2006. ISBN 978-0-470-01613-8.

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Šafka, Ph.D.
Katedra výrobních systémů a automatizace

Konzultanti práce:

Ing. Martin Seidl, Ph.D.
Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace
Ing. Lukáš Voleský, Ph.D.
Katedra materiálu

Datum zadání práce:

20. listopadu 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

20. května 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

9. června 2020

Bc. Jakub Macháček

Kvalitativní porovnání dílů vyrobených z oceli 316L aditivními technologiemi FFF a SLM

Abstrakt

Cílem této práce bylo ověření možnosti výroby kovových dílů s využitím technologie Fused Filament Fabrication (FFF). Pro testy byl použit materiál Ultrafuse 316LX od firmy BASF. Tento tiskový materiál obsahuje vysoké procento práškového kovu v polymerním nosiči. Z materiálu Ultrafuse 316LX byly vytištěny sady testovacích vzorků pro určení mechanických vlastností materiálu a měření geometrické přesnosti a drsnosti povrchu. Stejně sady vzorků byly vyrobeny z materiálu AISI 316L pomocí aditivní technologie Selective Laser Melting (SLM) pro přímé porovnání měřených vlastností. Oba procesy byly také hodnoceny z hlediska finanční a výrobní náročnosti.

Klíčová slova: 3D tisk, kov, ocel, 316L, Ultrafuse 316LX, FFF, Fused Filament Fabrication, FDM, ADAM, Atomic Diffusion Additive Manufacturing, SLM, Selective Laser Melting, tisková struna

Qualitative comparison of products made of 316L steel and produced with additive technologies FFF and SLM

Abstract

This work was aimed to verify the feasibility of production of metal parts using Fused Filament Fabrication (FFF) technology. Ultrafuse 316LX from BASF was used as a test material. This printing material contains a high percentage of metal powder in a polymeric base. Using Ultrafuse 316LX material, a group of specimens for determination of mechanical properties, shape accuracy and surface roughness were printed. The same group of specimens was fabricated from AISI 316L stainless steel with the use of Selective Laser Melting (SLM) technology for direct comparison of measured properties. Both processes were also evaluated with respect to the financial point of view and production complexity.

Keywords: 3D printing, Metal, Steel, 316L, Ultrafuse 316LX, FFF, Fused Filament Fabrication, FDM, ADAM, Atomic Diffusion Additive Manufacturing, SLM, Selective Laser Melting, Filament

Poděkování

Velice rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě této práce a své rodině za podporu při studiu. Jmenovitě děkuji panu Ing. Jiřímu Šafkovi Ph.D. za vedení práce a jeho cenné rady a zkušenosti v oblasti 3D tisku. Panu Ing. Martinu Seidlovi, Ph.D. za pomoc se zpracováním vzorků z Ultrafuse 316LX. V neposlední řadě panu Ing. Michalu Ackermannovi Ph.D. za pomoc s technologií SLM, provedením a vyhodnocením mechanických testů.

Tato práce byla podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci v rámci projektu č. SGS-2019-5012.

Obsah

Seznam zkratk	10
Seznam symbolů	11
1 Úvod	12
1.1 Additive Manufacturing	12
1.1.1 Vytvoření 3D CAD dat	13
1.1.2 Příprava dat pro výrobu	14
1.1.3 Aditivní výroba	14
1.1.4 Dokončovací operace	15
1.2 Aditivní zpracování kovů	16
1.2.1 Přímá výroba z kovových prášků	16
1.2.2 Zpracování kovových prášků v polymerním nosiči	17
2 BASF Ultrafuse 316LX	20
2.1 3D tisk Ultrafuse 316LX	21
2.1.1 Technologie Fused Filament Fabrication	22
2.1.2 Parametry 3D tisku	23
2.2 Debinding	26
2.2.1 Debinding materiálu Ultrafuse 316LX	27
2.3 Sintrace	35
2.3.1 Sintrace materiálu Ultrafuse 316LX	36
3 Technologie Selective Laser Melting	38
3.1 Proces výroby	39
3.1.1 Příprava tiskových dat	40
3.1.2 Příprava zařízení na tisk	43
3.1.3 Výrobní proces	46
3.1.4 Vyjmutí výrobků z tiskárny	47
3.1.5 Očištění výrobků a další dokončení	48
4 Testy mechanických vlastností	49
4.1 Zkouška tahem	50
4.1.1 Zkušební tělesa	51
4.1.2 Parametry zkoušky	51
4.1.3 Měření tahových vlastností	52
4.2 Zkouška rázem	53

5	Hodnocení jakosti výroby	54
5.1	Rozměrová přesnost	54
5.2	Drsnost povrchu	55
6	Hodnocení technologií	56
6.1	Kvalita výroby	56
6.2	Uživatelská náročnost	58
6.3	Finanční a časová náročnost procesu	59
7	Závěr	61
	Použitá literatura	66
	Přílohy	68

Seznam zkratek

3D	Three-dimensional (Trojrozměrný)
3MF	3D Manufacturing Format
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ADAM	Atomic Diffusion Additive Manufacturing
AM	Additive Manufacturing (Aditivní výroba)
ANSI	American National Standards Institute
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DSC	Differential scanning calorimetry (Diferenční skenovací kalorimetrie)
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
LENS	Laser Engineered Net Shaping
MIM	Metal Injection Molding
PC	PolyCarbonate
PET	Polyethylentereftalát
PLA	Polylactic Acid
SEM	Scanning Electron Microscope (Rastrovací elektronový mikroskop)
SLA	Stereolitografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Triangle Language
TGA	Thermogravimetric analysis (Termogravimetrická analýza)
TPE	Thermoplastic elastomer (Termoplastický elastomer)
TPU	Thermoplastic polyurethane (Termoplastický polyurethan)
TUL	Technical university of Liberec (Technická univerzita v Liberci)
UV	Ultraviolet (Ultrafialové záření)

Seznam symbolů

A	Tažnost materiálu	[%]
E	Objemová hustota energie	[J/mm ³]
h	Rozestup drah laseru	[mm]
P	Energie laseru	[W]
Ra	Střední hodnota profilu povrchu	[μm]
Rm	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$Rp_{0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
Rz	Výška nerovnosti profilu	[μm]
t	Výška tiskové vrstvy	[mm]
v	Rychlost pohybu laserového bodu	[mm/s]

1 Úvod

Aditivní technologie kovů jsou dnes jednou z nejrychleji se rozvíjejících oblastí aditivní výroby. Tento značný rozvoj umožňuje inovace a také vznik nových technologií aditivního zpracování kovů. Díky velkému zájmu z průmyslové sféry jsou všechny nově vzniklé technologie a postupy zpracování kovů zajímavým tématem k testování. Je tedy vhodné se věnovat otázce porovnání výrobků z aktuálně zavedených technologií a z technologií nových. Jednou z již zavedených technologií je technologie SLM (Selective Laser Melting) používaná i na Technické univerzitě v Liberci. Nově vznikajícím postupem se značným aplikačním potenciálem je využití FFF (Fused Filament Fabrication) technologie na zpracování kovových materiálů. FFF je levná technologie, která je standardně určená pro zpracování termoplastů. Díky nízké pořizovací ceně a velké dostupnosti technologie FFF je myšlenka zpracovávat kovové materiály touto technologií zcela revoluční. V porovnání s finančně nákladnou technologií SLM může být technologie FFF zajímavým směrem k dalšímu rozvoji aditivní výroby kovových materiálů.

Hlavním cílem diplomové práce je tedy ověřit proveditelnost zpracování kovů technologií FFF. Dalším cílem je porovnání tohoto nového postupu s technologií SLM. Porovnání bude provedeno na základě mechanických vlastností, kvality výroby a finanční náročnosti technologií. Jako referenční materiál byla zvolena nerezová ocel ANSI 316L (DIN 1.4404), nově dodávaná společností BASF SE pro FFF tiskárny značená jako Ultrafuse 316LX.

1.1 Additive Manufacturing

Additive Manufacturing (AM), česky aditivní výroba, je soubor mnoha výrobních technologií označovaných také jako 3D printing (3D tisk). Tyto technologie mají svůj počátek v 80. letech 20. století, kdy vznikají první AM technologie. AM technologie mají svůj základ v přidávání materiálu. U většiny AM technologií dochází k přidávání materiálu po jednotlivých tenkých vrstvách vrstvu po vrstvě. Rozdílem mezi samotnými AM technologiemi je technické provedení jednotlivých vrstev, nebo zpracovávaný materiál. Historicky první patentovanou technologií byla v roce 1986 technologie Stereolitografie (SLA). SLA technologie pracuje s UV fotopolymerním materiálem který je vytvrzován vrstvu po vrstvě za použití UV laserového paprsku. Po technologii SLA vznikaly další AM technologie, které zpracovávají různé druhy materiálů různými způsoby. Většina technologií AM od svého vzniku do současnosti zaznamenaly rychlý rozvoj a rozšíření. Jedním z impulzů pro rozvoj AM je inicia-

tiva Průmysl 4.0. K dnešnímu rozšíření také přispívá postupné uvolňování patentů na principy, konstrukce strojů a jejich částí. Díky tomuto se dnes AM technologie, zařízení a materiály rozvíjejí velice dynamicky. Nejrozšířenější technologií dnešní doby je Fused Filament Fabrication (FFF) na zpracování termoplastických polymerů v podobě vlákna (struny). [1, 2, 3, 4]

Technologie AM lze rozdělit dle druhu, nebo podoby zpracovávaného materiálu. Rozdělení dle druhu zpracovávaného materiálu: polymerní, kovové, voskové a další. Dalším možným rozdělením je dle podoby zpracovávaného materiálu. Dělení je uvedeno v následujícím výčtu. [5, 3, 4]

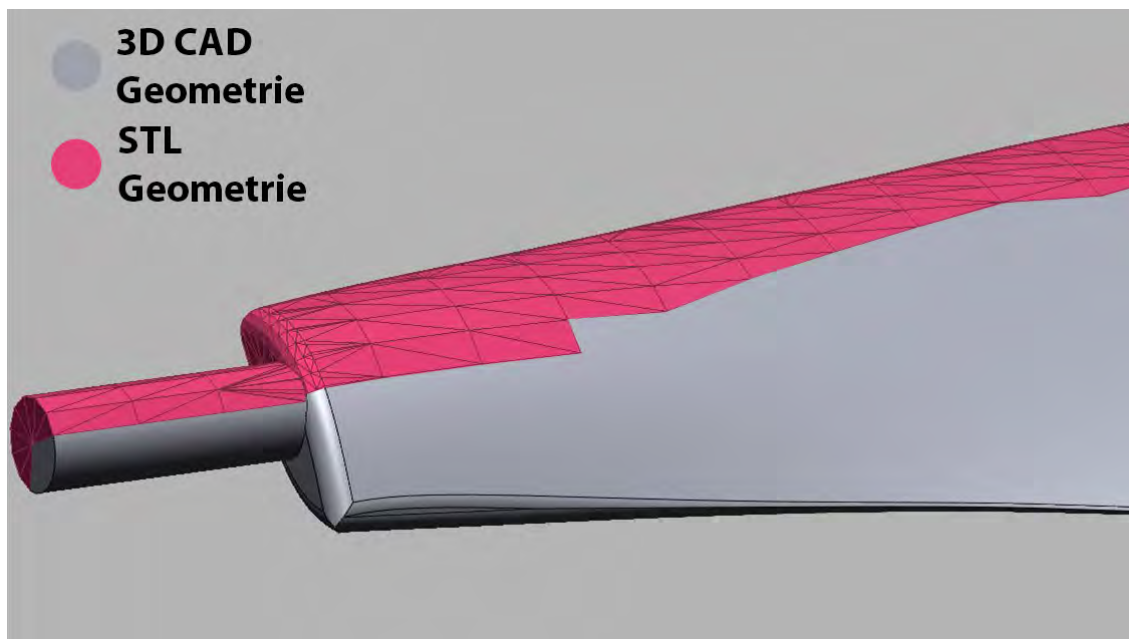
- Material Extrusion (Extruze materiálu)
- Vat Photopolymerization (Vytvrzování foto-polymeru)
- Material Jetting (Tryskání materiálu)
- Powder bed (Práškové lože)
- jiné

Výrobci aditivních technologií dnes kladou velký důraz na rychlost použití a přípravy výroby. K výrobě není potřebná běžná výkresová dokumentace výrobku, základem je 3D model výrobku v 3D CAD datech. Celý proces výroby dílů s využitím aditivních technologií lze rozdělit do čtyř základních kroků. Dílčí průběh těchto kroků se liší dle výrobce jednotlivých zařízení a softwaru k tomu určených.

1. Vytvoření 3D CAD dat
2. Příprava dat pro výrobu
3. Aditivní výroba
4. Dokončovací operace

1.1.1 Vytvoření 3D CAD dat

Prvním nezbytným krokem pro AM je vytvoření 3D CAD modelu výrobku. 3D model je možné vytvářet v libovolném 3D CAD modeláři, nebo 3D designérském softwaru. Jedinou podmínkou pro tyto softwary je nutnost exportu dat do přenosového formátu, vhodného pro 3D tisk. Nejpoužívanějším datovým formátem dnešních technologií, pro svou univerzálnost, je formát STL (Standard Triangle Language). Tento formát vznikl pro potřeby přenosu 3D dat k technologii SLA. STL soubor popisuje povrchovou geometrii 3D objektu za použití trojúhelníkové sítě. Náhled na trojúhelníkovou síť je na obrázku 1.1. V současné době se začíná rozvíjet nový typ souborového formátu 3MF (3D Manufacturing Format). Na vývoji a implementaci tohoto formátu se podílejí přední hráči v oblasti aditivní výroby a CAD softwarů. 3MF je souborový archiv jednoho, nebo více souborů, hlavním souborem je 3D geometrie. 3MF nabízí možnosti nést další soubory, například barvy (textury), rozměrové jednotky a konfigurace pro zařízení, nebo software. [6]



Obrázek 1.1: Porovnání zobrazení geometrie 3D CAD modeláře a STL dat

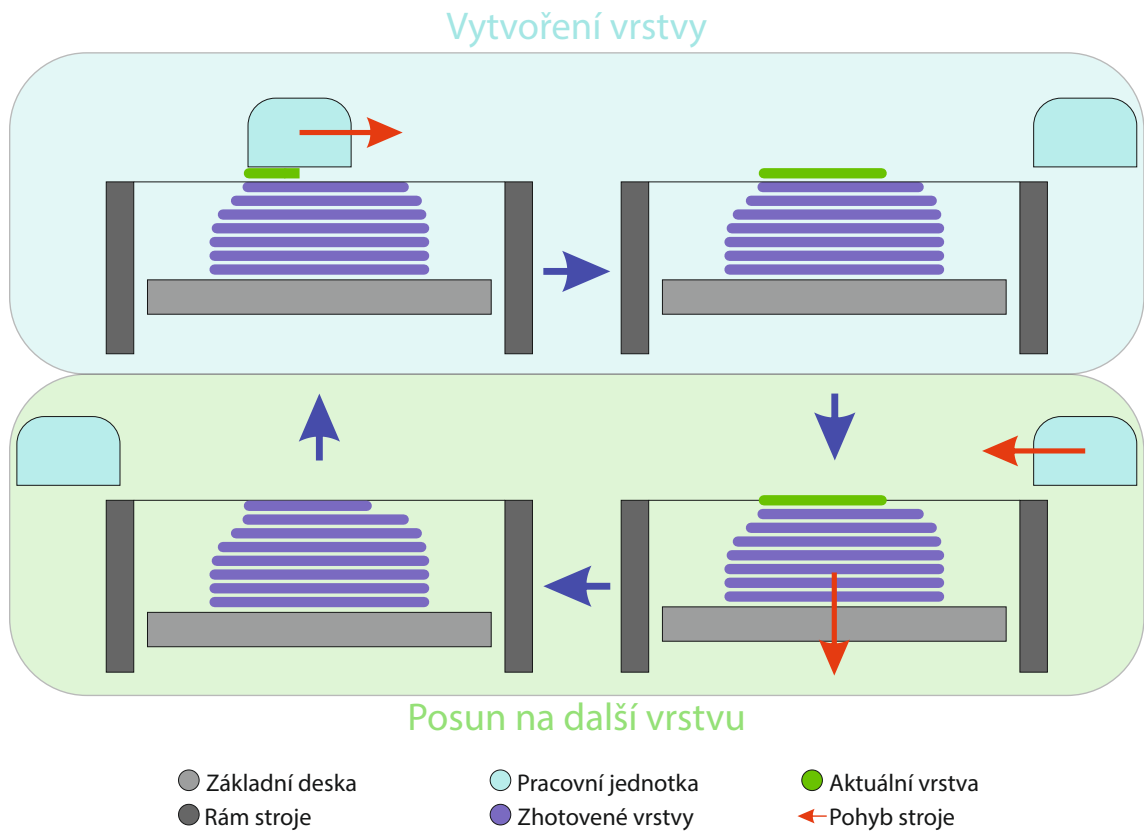
1.1.2 Příprava dat pro výrobu

Následujícím krokem u aditivní výroby je příprava dat ve speciálním CAM (Computer Aided Manufacturing) softwaru pro aditivní výrobu. Typ softwaru se liší dle technologie a výrobce 3D tiskárny. V softwaru se díl ustaví do pracovního prostoru tiskárny. Pro vybrané technologie je orientace dílu v pracovním prostoru zásadní, například pro dosažení nižšího vnitřního pnutí dílu, zvýšení kvality povrchu a žádané pevnosti výrobku. Po orientaci dílu uživatel, nebo software definuje podpurné struktury pro fixaci dílu během stavby. Jakmile jsou všechny přípravné práce hotové, dochází v softwaru k rozdělení připravených dat na jednotlivé vrstvy a zároveň jsou přiřazeny technologické parametry zvolené pro výrobu. Výstupní data ze softwaru jsou specifická pro zvolenou tiskárnu. Tato data mohou mít podobu textového řídicího kódu, obrazů průřezu jednotlivých vrstev, nebo zcela odlišná dle konkrétního výrobce tiskárny.

1.1.3 Aditivní výroba

Třetí fáze je již samotná výroba. Před zahájením stavby dílu mohou být nutné přípravné kroky specifické pro dané zařízení. Může jít o čištění, kalibraci stroje a jiné. Jakmile je příprava stroje kompletní může začít proces stavby. Stavba probíhá ve dvou opakujících se krocích vytvoření vrstvy a posunu na další vrstvu. Oba tyto kroky jsou specifické, dle technologie a konstrukčního řešení stroje. Na obrázku 1.2 je opakující se proces aditivní výroby zobrazen. Stavba může trvat od několika minut až po dny. U některých technologií je čas stavby závislý na velikosti dílu, výšce stavby a složitosti dílu. Nejčastěji se ovšem jedná o kombinaci mnoha parametrů, proto je složité odhadnout dobu výroby. Po samotné stavbě může následovat ještě

další technologický čas, například chlazení výrobků nebo stroje z provozní teploty na teplotu okolního prostředí pro možnost další manipulace. Takovéto chlazení může proběhnout během několika minut, nebo hodin dle technologie. [5, 3, 4]



Obrázek 1.2: Základní cyklus aditivní výroby

1.1.4 Dokončovací operace

Poslední výrobní fázi při aditivní výrobě bývají dokončovací operace. Nejčastěji do těchto operací patří odstranění podpurných struktur, či jiné nutné činnosti. Některé technologie ale vyžadují i kompletní postupový proces dokončování pro dosažení žádaného výsledku. K dokončovacím operacím lze také zařadit povrchové úpravy výrobků, či obrobení funkčních ploch. Zde vždy záleží na požadované jakosti a přesnosti výrobku.

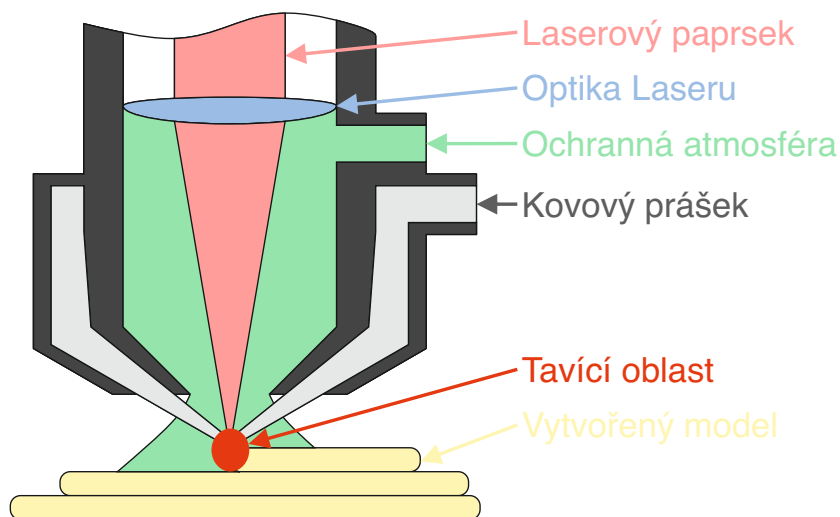
1.2 Aditivní zpracování kovů

První aditivní technologie na zpracování kovů se začaly vyvíjet v 90. letech 20. století. Tyto technologie vycházejí z technologie Selective Laser Sintering (SLS), na zpracování termoplastických polymerů v podobě prášku za použití laseru. U SLS technologie je termoplastický prášek nanesen v tenké vrstvě na pracovní desku a následně na vybraných místech spékán laserovým paprskem. Záměnou polymerního prášku za kovový vznikaly první technologie Direct Metal Laser Sintering (DMLS) a Selective Laser Melting (SLM). Nejpodstatnější rozdíly v technologiích DMLS a SLM jsou v používaném typu kovového prášku a energii laseru na jeho zpracování. Tyto technologie jsou rozšířené v různých průmyslových odvětvích zejména pro výsledné mechanické vlastnosti a volnost v designu výrobku. V posledních letech se objevují další výrobci a technologie na aditivní zpracování kovů. Z velké části se zpracovávají kovové prášky. Mezi další technologie na zpracování kovového prášku dnes patří například Electron Beam Melting (EBM), Laser Engineered Net Shaping (LENS). Technologie DMLS, SLM, EBM a LENS jsou díky značnému vývoji na straně výrobců dnes průmyslovým standardem s jednoduchým použitím. Díky patentům a ochranným známkám na některé názvy si každý výrobce značí technologii jiným způsobem. [7, 8]

1.2.1 Přímá výroba z kovových prášků

Technologie SLM, DMLS a EBM se řadí mezi technologie Powder Bed. Základní myšlenka technologií je pro všechny tři zmíněné shodná. Celý proces probíhá v inertní atmosféře, nebo ve vakuu, kdy dochází k nanesení souvislé vrstvy jemného kovového prášku na stavební platformě. Následně je prášek spékán (sintrován), respektive taven laserem (SLM, DMLS), nebo paprskem elektronů (EBM) v žádaných místech. Technologie umožňují výrobu značně složitých a přesných geometrických tvarů s vysokým detailem. Podrobný popis technologie SLM je uveden v kapitole 3 Technologie Selective Laser Melting. [9, 10]

Technologie LENS také pracuje s kovem v podobě prášku. Ovšem prášek je přiváděn do speciální laserové hlavy, kde je pomocí inertního plynu dopraven do ohniska laserového paprsku, jak je zobrazeno na obrázku 1.3. V ohnisku laseru dochází k natavování kovového prášku a jeho přitavení k základnímu materiálu. LENS nemusí pracovat po rovnoběžných vrstvách, ale může pracovat v několika směrech. Tato technologie je tedy ideální pro práci s robotickými rameny a víceosými CNC stroji. Technologie LENS je tak vhodná pro navařování složitých geometrických tvarů na již existující polotovary či poškozené výrobky. LENS je tak vhodná technologie pro prodloužení životnosti některých výrobků se znatelným opotřebením. Jedním z největších průkopníků technologie LENS je společnost DMG-Mori se stroji řady Lasertec 3D hybrid. Stroje kombinují práškové navařování kovů (LENS) s 5-osým CNC obráběním. Je tak možné na jednom stroji aditivně vyrobit polotovar a následně provést obrobení přesných ploch. Na obrázku 1.4 je příklad takto vyráběného dílu. [11, 12]



Obrázek 1.3: Schéma laserové hlavy technologie LENS



Obrázek 1.4: Rám turbíny vyrobený technologií LENS na stroji společnosti DMG-Mori s obráběním přesných ploch [13]

1.2.2 Zpracování kovových prášků v polymerním nosiči

Vzhledem k vysokým pořizovacím a provozním nákladům práškových technologií SLM, DMLS, EBM a LENS, které se pohybují v řádech milionů korun českých, se vyvíjejí technologie na zpracování kovů v jiné formě. Aktuálně populární je používání kovového prášku v polymerním, nebo voskovém nosiči. Tento materiál je zpracován na relativně levné 3D tiskárně, s principem tisku FFF, či Fused Deposition Modeling (FDM). Takto je vytištěn díl z polymeru s kovovým plněním. Obsah

kovu v materiálu je přibližně 60 % a více. Přesné procento obsahu kovu v materiálu závisí na výrobci a použitých materiálech. Takto vyrobený díl má ovšem pouze vlastnosti polymerního nosiče, nikoliv kovu. Pro dosažení kovového dílu se všemi jeho vlastnostmi jsou zapotřebí další dokončovací operace. Technologie zpracování vychází z průmyslové technologie vstřikování Metal Injection Molding (MIM). Technologie MIM také používá kovovým práškem plněný polymer pro vstřikování dílů do forem na upraveném vstřikovacím stroji, dokončovací operace jsou tak podobné, až identické. Po vyrobení dílu z plněného materiálu dochází k odstranění pojiva a následné sintraci kovového prášku. Po sintračním procesu je získán výsledný kovový výrobek. Kovový výrobek se ovšem během procesu smršťuje a může docházet i k deformacím geometrie. Detailní popis postupu výroby je v kapitole 2 BASF Ultrafuse 316LX. [14, 15, 16]

Technologii kovů v polymerním, nebo voskovém nosiči se věnuje několik společností. Tyto společnosti jdou dvěma směry nabízených možností a produktů.

Kompletní řešení

Jeden ze směrů je vytvoření celého technického řešení od tisku až po konečnou sintraci výrobku. U těchto nabízených systémů jsou většinou všechny parametry procesu uživatelem voleny pouze výběrem použitého materiálu. Veškeré parametry procesu jsou tak uživateli uzavřené a neznámé. V současnosti se tímto směrem ubírají dvě společnosti Markforged, Inc. se svou technologií Atomic Diffusion Additive Manufacturing (ADAM) se zařízením Metal X (Obrázek 1.5), a společnost Desktop Metal, Inc. se svým přístrojovým řešením Studio System. Společnost Markforged používá kov v polymerním nosiči, v podobě dlouhé struny navinuté na cívku. Společnost Desktop Metal používá nosič voskový v podobě silných, krátkých tyčinek. Obě společnosti využívají pro svůj proces dvou materiálů. Z jednoho vytvářejí výsledný díl a druhý slouží jako podpůrný (separační), který umožňuje snadné oddělení dočasných struktur pro fixaci složité geometrie během celého procesu výroby. Separací materiál je složen z keramického prášku a nosiče. Keramický prášek brání ve spojení kovového dílu s podpůrnými strukturami. Na obrázku 1.6 je vidět díl na podpůrných strukturách se separační vrstvou a na obrázku 1.7 výsledný díl bez podpor. [15, 16]



Obrázek 1.5: Kompletní systém MetalX od společnosti Markforged, Inc.[15]



Obrázek 1.6: Výrobek technologie ADAM společnosti Markforged, Inc. z materiálu AISI 17-4PH s podpůrnou strukturou a separační vrstvou [17]



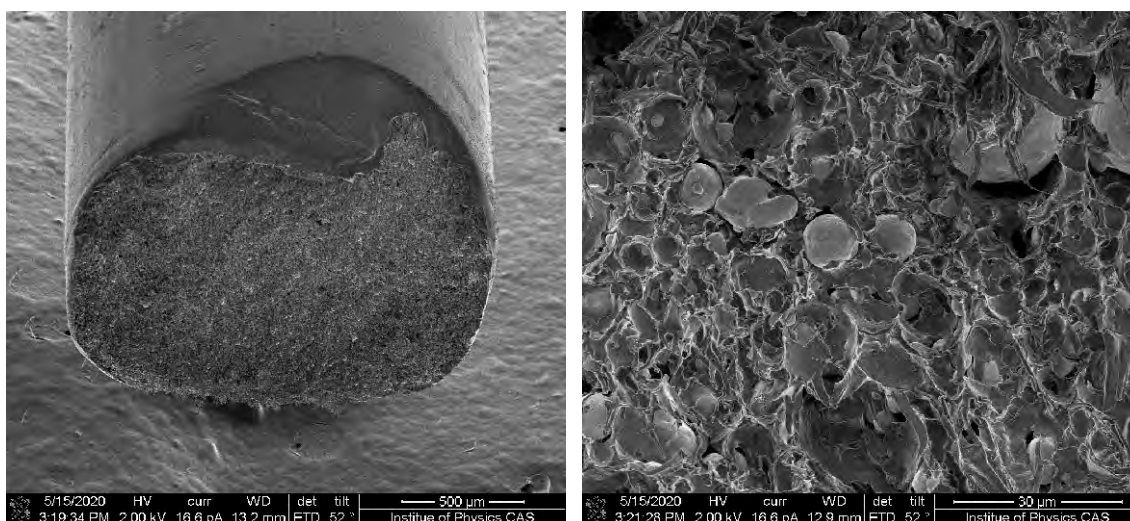
Obrázek 1.7: Výrobek technologie ADAM společnosti Markforged, Inc. z materiálu AISI 17-4PH po odstranění podpůrné struktury [17]

Materiálové řešení

Druhý směr je zaměřen na nabídku širokého spektra materiálů, kdy společnost nabízí pouze materiál na tisk modelu. Další zpracování je již ponecháno na uživateli s určitým doporučením od výrobce materiálu. Uživatel pro dokončení kovového výrobku využívá své vybavení. Není tak nucen k pořízení jednoúčelového stroje od dodavatele. Tento přístup nabízí možnost značné úspory pořizovacích nákladů pro společnosti, zabývající se technologiemi MIM. Mezi společnostmi, nabízející materiál k tisku patří BASF SE a The Virtual Foundry, Inc. Obě tyto společnosti nabízejí strunu pro tisk na tiskárnách technologie FDM/FFF. K materiálům dále poskytují základní informace pro postup dalšího zpracování. Pro možnost zpracovávání stačí vlastnit tiskárnu technologie FDM/FFF, zařízení na provedení debinding procesu a sintrační pec. Přesný postup zpracování se liší dle typu materiálu a výrobce. Postup práce s materiálem Ultrafuse 316LX od společnosti BASF je detailně popsána v kapitole 2 BASF Ultrafuse 316LX. [14, 18]

2 BASF Ultrafuse 316LX

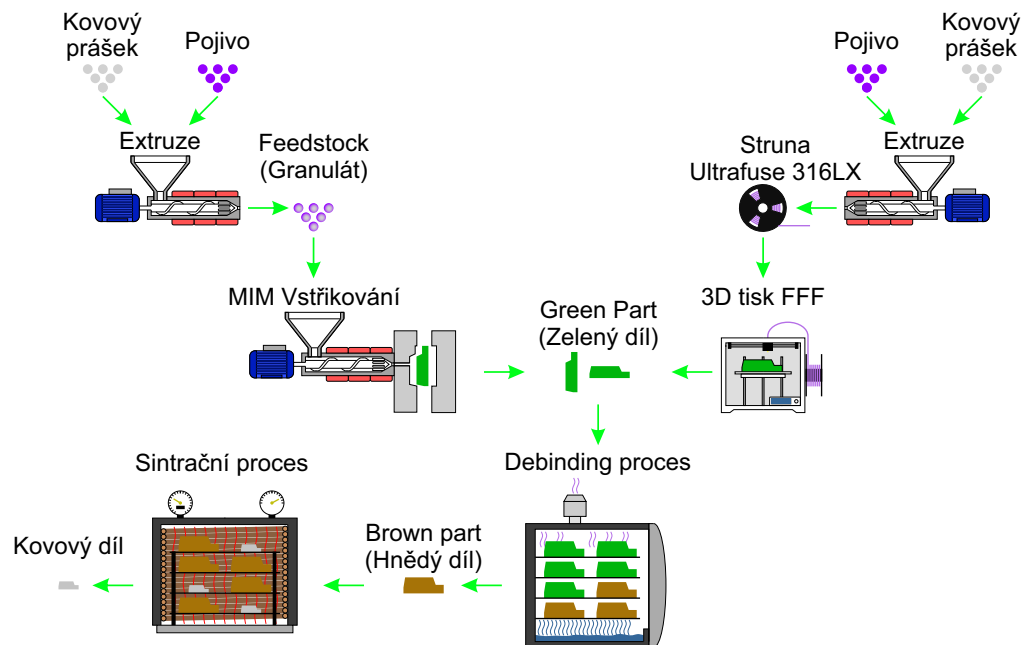
Materiál BASF Ultrafuse 316LX je výrobkem od společnosti BASF 3D Printing Solutions GmbH. Jedná se o materiál určený ke zpracování na libovolné 3D tiskárně technologie FDM, nebo FFF. Materiál je tvořen polymerním nosičem (pojivem) a kovovým práškem oceli AISI 316L (DIN 1.4404). Na obrázku 2.1 je pohled na průřez tiskovou strunou pomocí Skenovací elektronové mikroskopie (SEM). BASF udává podíl kovového prášku v materiálu více než 80 % hmotnosti. Společnost BASF vyvinula materiál Ultrafuse 316LX na základě svých zkušeností s technologií MIM. Materiál tak vychází z materiálů pro technologii MIM (Metal Injection Molding), kde společnost BASF působí jako dodavatel materiálů již řadu let.



Obrázek 2.1: SEM snímky průřezu tiskovou strunou BASF Ultrafuse 316LX

Postup práce s materiálem Ultrafuse 316LX je tak shodný s postupem pro zpracování kovových výrobků technologií MIM. V prvním kroku dochází k vytvoření tvaru výrobku, tzv. Green Part (zelený díl), kdy se jedná o díl z polymerního nosiče s kovem. Green Part musí poté projít procesem Debindingu (Odstranění pojiva) kde je odstraněna většina pojiva a model přechází do své další fáze, tzv. Brown part (hnědý díl). Brown part je již tvořen téměř pouze práškovým kovem jen s minimálním množstvím pojiva na hranách zrn kovového prášku. Díl si sice zachovává svůj tvar, ale nikoli mechanické vlastnosti. Brown part je velice náchylný na poškození geometrie v důsledku manipulace. Díl je následně sintrován (spékán), a tím je dosaženo odstranění zbytkového pojiva a spojení částic kovu. Vzniká tak kovový díl se

všemi svými vlastnostmi. Během sintrace dochází u dílů ke smrštění. Smrštění může vést i k deformacím tvaru, pokud je díl nebo jeho podpora nevhodně navržena. Celý proces zpracování výrobků technologií MIM a proces zpracování Ultrafuse 316LX je na obrázku 2.2 [19, 14, 20, 21]



Obrázek 2.2: Technologický postup výroby MIM a zpracování materiálu Ultrafuse 316LX od společnosti BASF

Pro dokončení výrobků z Ultrafuse 316LX je využíváno standardního vybavení pro dokončování výrobků technologií MIM. Jedná se tak o materiál vhodný zejména pro dlouholeté uživatele MIM technologie s technickým zázemím, kde pro zpracování materiálu postačuje nízkonákladová 3D tiskárna technologie FFF.

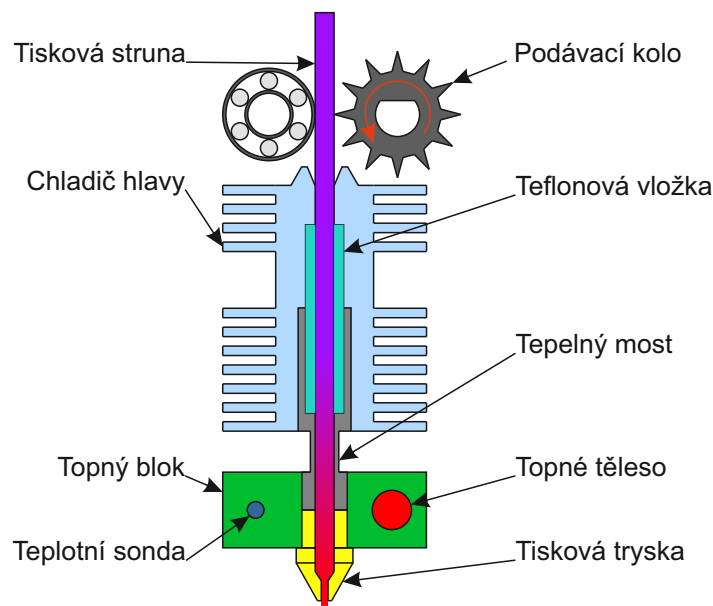
2.1 3D tisk Ultrafuse 316LX

Pro zpracování materiálu Ultrafuse 316LX je zapotřebí použít 3D tiskárnu technologie Fused Filament Fabrication (FFF). Technologie FFF je originálně určena pro zpracování termoplastických polymerů v podobě vlákna (struny) o průměru 1,75 mm, nebo 2,85 až 3,00 mm. Pro tyto účely je tak společností BASF nabízen materiál Ultrafuse 316LX ve dvou variantách, a to s průměrem vlákna 1,75 mm, nebo 2,85 mm. Obě varianty jsou dodávány v návinu na cívce o celkové hmotnosti materiálu 3 kg. Pro porovnání se standardním polymerním materiálem pro FFF tiskárny jde cca o 250 m struny o průměru 1,75 mm. [14]

2.1.1 Technologie Fused Filament Fabrication

Technologie FFF vychází a je téměř identická s technologií Fused Deposition Modelling (FDM). Proto jsou v praxi tyto názvy často zaměňovány. Rozdílem v technologiích FFF a FDM jsou patentová práva. Technologie FFF využívá techniky propadlých patentů technologie FDM. Výrobci zařízení technologie FFF původní techniky FDM dále rozvíjejí v nová řešení. Díky jednoduchosti základního principu se tiskárny FFF staly rychle velmi populární, levné a dostupné i pro hobby nadšence. Pro nízkou pořizovací cenu tiskárny je tak možnost proměnit libovolnou FFF tiskárnu v technologii zpracovávající kovové materiály revoluční. [5, 3]

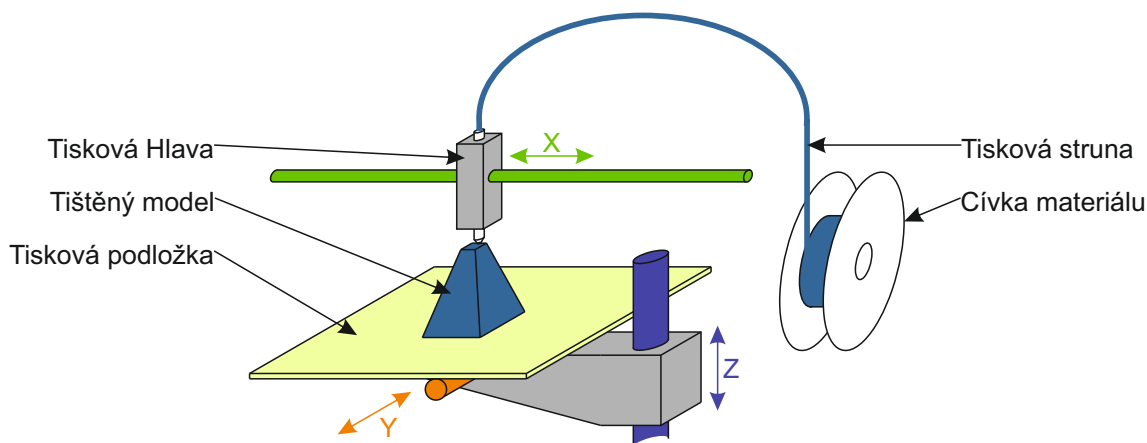
Princip technologie FFF a FDM je velice jednoduchý. Termoplastická struna materiálu je navedena do tiskové hlavy. Hlava se pohybuje ve dvou na sebe kolmých osách X;Y a opisuje průřez tištěné vrstvy. V tiskové hlavě je materiál taven a tryskou (obvykle o výstupním průměru 0,4 mm) vytlačován jako tenké vlákno pod hlavu. Detailní zobrazení tiskové hlavy je na obrázku 2.3. Vytlačené vlákno se díky své vysoké teplotě spojuje s již předtím vytlačeným a ochlazeným materiálem. Po vytvoření celé vrstvy se model posune o výšku vrstvy po ose Z a pokračuje se další vrstvou.



Obrázek 2.3: Schématický průřez tiskovou jednotkou FFF tiskárny

Pohyby v jednotlivých osách X;Y;Z jsou realizovány různým způsobem dle konkrétního stroje. Původní stroje FDM technologie pohybují tiskovou hlavou v ose X;Y a modelovým stolem v ose Z. U dnešních strojů FFF dochází k pohybu v osách X;Y;Z různými komponenty, přičemž tyto pohyby vždy zajistí stejný pohyb trysky vůči modelu. Na obrázku 2.4 jsou znázorněny pohyby FFF tiskárny vycházející z konstrukce tiskárny, použité v této práci. Technologie FDM využívá dva samostatné materiály pro vytvoření geometrie výrobku. Materiál modelový na výrobek a materiál podpůrný pro dočasné konstrukce, nutné pro podržení složité geometrie během procesu

tisku. Zařízení technologie FFF využívají jeden, nebo více materiálů. Zařízení s více materiály mohou být využity i pro výrobu kompozitních modelů z více modelových materiálů. Pokud se u technologie FFF nepoužívá podpurný materiál, je složitá geometrie podpořena konstrukcí ze shodného materiálu, jakým je vyráběný díl. Mezi běžně zpracovávané materiály technologií FDM a FFF patří PLA, ABS, PET, PC, PC-ABS, TPU, TPE, a další termoplastické polymery. [5, 3, 22, 23]



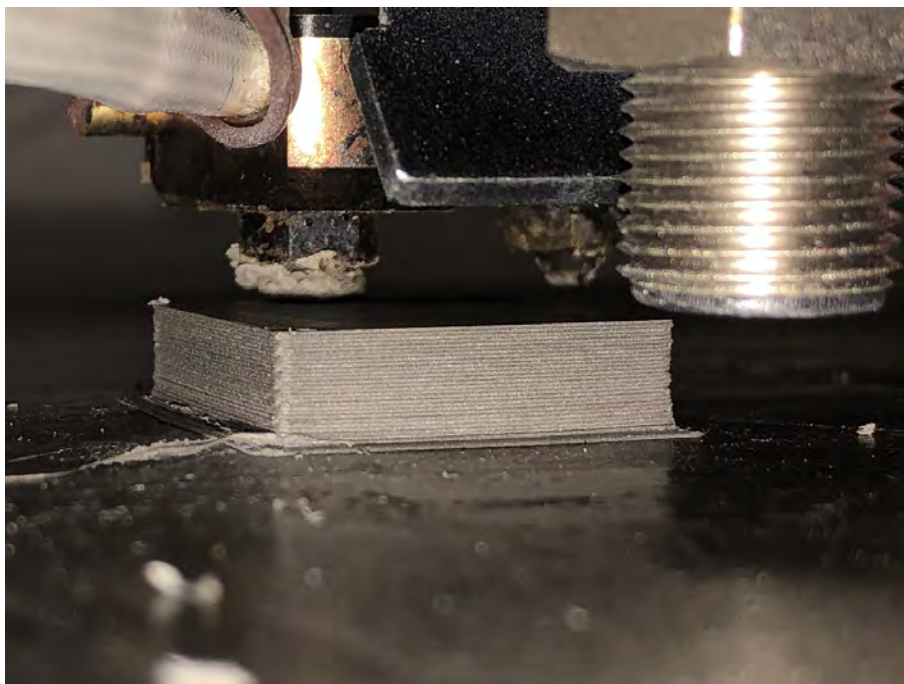
Obrázek 2.4: Schéma FFF tiskárny

2.1.2 Parametry 3D tisku

Pro tisk z materiálu Ultrafuse 316LX byla vybrána tiskárna Felix Tec4 (FELIX-printers), využívající technologii FFF. Technické specifikace tiskárny jsou uvedeny v tabulce 2.1. Pro tisk Ultrafuse 316LX byla využita pouze jedna ze dvou tiskových jednotek. Druhá byla mechanicky nadzdvížena, aby nijak neovlivnila výtisk. Materiál, díky vysokému obsahu kovových částic, je v roztaveném stavu velice abrazivní. Abrazivní účinek materiálu vede k rychlejšímu opotřebení standardní mosazné trysky, ve srovnání s použitím pro běžné polymerní materiály. Pro udržení životnosti tiskové jednotky je nutné vyměnit mosaznou trysku za tvrzenou ocelovou. Ocelová tryska ovšem snižuje účinnost ohřevu a hrot trysky nemusí být prohříván shodně jako mosazný. Na obrázku 2.5 je detailní snímek na tiskovou hlavu během tisku materiálu Ultrafuse 316LX. Vzhledem k viditelnému ulpívání materiálu na bocích trysky je tento materiál nutné pravidelně z trysky odstraňovat pro zachování kvality tisku. Za tímto účelem byl na tiskovou plochu přidán ocelový kartáč pro čištění trysky po dokončení každé tiskové vrstvy. [23, 14, 19]

Tabulka 2.1: Technické specifikace tiskárny Felix Tec4 od výrobce FELIXprinters [23]

Tiskové hlavy:	2× max. 275 °C
Průměr materiálu:	1,75 mm
Stavební prostor:	237×244×235 mm
Tisková vrstva:	0,05 - 0,25 mm
Průměr trysky:	0,25; 0,35 ;0,5; 0,7 mm
Tiskový stůl:	Magnetický, vyhřívaný max. 95 °C
Materiál:	PLA, PET, ABS, PVA, Flex, Wood, Glass
Software:	Repetier Host, Simplify3D



Obrázek 2.5: Detailní snímek tiskové hlavy Felix Tec4 při tisku z materiálu Ultrafuse 316LX s usazeným materiálem na trysce

Společnost BASF poskytuje doporučené parametry tisku pro technologii FFF. Pro zpracování tisku byl použit software Simplify 3D s tiskovým nastavením pro Felix Tec4. Parametry tisku byly upraveny dle doporučení od společnosti BASF. Doporučené nastavení a nastavení použité při prvním tisku jsou uvedeny v tabulce 2.2. Společnost BASF doporučuje použít trysku o průměru 0,4 mm. Pro tiskárnu FelixTec4 jsou nejbližší k rozměru 0,4 mm dostupné trysky pouze 0,35 mm a 0,5 mm. Pro výrobu vzorků byla vybrána tryska průměru 0,5 mm, z důvodu dodržení minimálně doporučeného průměru trysky. Společnost BASF k materiálu též doporučuje použít jako tiskový podklad kaptonovou fólii, nebo skleněnou desku a speciální sprej Dimafix. Pro první tisky byla volena kaptonová fólie, která byla nalepena na kovové desce. Při prvních tiscích neměl materiál ani při tisku malých kostiček dostatečnou

adhezi k podložce a docházelo k jeho samovolnému uvolnění během tisku. Pro ilustraci nízké adheze je na obrázku 2.6 nedokončený výtisk na kaptonovou fólii. Jako další byl aplikován sprej Dimafix na kaptonovou fólii. Za použití fólie a spreje je adheze k desce pro tisk dostatečná. Výrobek je po tisku na folii se sprejem těžko odstranitelný z podložky. Pro jeho oddělení je nutné použití velké síly a nože. Při tomto odřezávání dochází k poškození některých dílů. Výroba tak byla kvůli odstraňování z desky značně zmetkovitá. Bohužel na tiskárně Felix Tec4 není možné snadno uchytit skleněnou podložku a otestovat doporučenou variantu, která je sklo a sprej Dimafix. [14]

Tabulka 2.2: Nastavení tiskových parametrů v softwaru Simplify3D [14]

Parametr	Doporučení BASF	Nastavení Simplify3D
Nozzle size [mm]	0,4	0,5
Extrusion multiplier	1,0-1,1	1
Extrusion width [mm]	0,35	0,45
Retraction distance [mm]	1,5	1,5
Retraction speed [mm/s]	45	45
Layer height [mm]	0,1-0,25	0,2
Outlines	1-2	2
Infill [%]	100	100
Outline overlap [%]	20-35	25
Nozzle temperature [°C]	230-250	230
Bed temperature [°C]	90-120	95
Default print speed [mm/s]	35	35



Obrázek 2.6: Dvě kostičky velikosti 6×6×8 mm tištěné na kaptonovou fólii dle doporučení společností BASF

Parametry tisku musely být dále upravovány dle výsledku dalšího zpracování, které je popsáno v následujících částech 2.2 Debinding a 2.3 Sintrace. Finální parametry jsou uvedeny v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3: Nastavení tiskových parametrů v softwaru Simplify3D po úpravách na základě dalších procesů zpracování

Parametr	Nastavené hodnoty
Nozzle size [mm]	0,5
Extrusion multiplier	1,06
Extrusion width [mm]	0,4
Retraction distance [mm]	1
Retraction speed [mm/s]	45
Layer height [mm]	0,15
Outlines	2
Infill [%]	100
Outline overlap [%]	30
Nozzle temperature [°C]	245
Bed temperature [°C]	80
Default print speed [mm/s]	30

2.2 Debinding

Debinding proces je používán před sintrací výrobku k odstranění polymerních pojiv z materiálu. V materiálu může být použito několik různých pojiv. Po odstranění části, nebo jednoho typu pojiva nedochází k úplnému rozpadu výrobku. Po debinding procesu je výrobek velice křehký a je s ním nutné patřičně manipulovat. Pojivo může být odstranitelné tepelně, nebo chemicky v závislosti na druhu a jeho množství ve výrobku. [14, 20]

Během tepelného debindingu je výrobek zahříván a při zvýšené teplotě dochází ke zplynování pojiva ve výrobku. Plyn pak odchází prostorem mezi kovovými částicemi. Pokud dochází k příliš rychlému zplynování velkého množství pojiva, může dojít k porušení soudržnosti výrobku, či geometrickým deformacím. Je tedy nutné volit proces tepelného debindingu opatrně, a to zejména u tlustostěnných výrobků. Tepelný debinding není nijak náročný na přístrojové vybavení a je možné jej provést v sintrační peci. Díky tomu se často tepelný debinding volí jako součást sintračního procesu pro odstranění zbytkového pojiva z výrobku. Tepelný cyklus s debindingem je specifický pomalejším teplotním náběhem pro pozvolné zplynování pojiva a prevenci potrhání výrobku, v důsledku jeho rozpínání. Časová výdrž na debinding teplotě (teplotě přechodu pojiva) slouží pro možnost pomalého úniku plynů z výrobku a k dosažení potřebné teploty i v jádru tlustostěnných výrobků. [20, 21, 24, 25]

Chemický debinding, na rozdíl od tepelného vyžaduje speciální technologické vybavení a procesní látky. Chemický debinding může probíhat v kapalině, nebo

plynu. Proces je volen dle typu pojiva a účincích jednotlivých chemických látek na dané pojivo. Jako procesní látky jsou nejčastěji voleny anorganické kyseliny, nebo zásady. Některá pojiva mohou být chemicky narušována i organickými rozpouštědly, nebo vodou (například PVA). Během procesu dochází k nasycení procesního média pojivem a je tedy nutné procesní médium měnit. Výměna média může probíhat kontinuálně během procesu ze zásobníků, nebo po určitém počtu cyklů. Proces debindingu probíhá většinou za zvýšené teploty. V případě provádění procesu ve výparech chemické látky je proces prováděn v ochranné atmosféře. [21, 25, 26]

Pro odstraňování pojiva z materiálu Ultrafuse 316LX je výrobcem předepsán proces tzv. katalytického debindingu procesu ve výparech kyseliny dusičné. Proces katalytického debindingu probíhá v přehřátých parách kyseliny dusičné na teplotu cca 120 °C (teplota varu kyseliny je cca 83 °C). Během procesu dochází k uvolňování formaldehydu z výrobku do procesní komory. Formaldehyd je toxický a se vzduchem výbušný. Z bezpečnostních důvodů je komora naplněna dusíkem a výstup plynů z komory filtrován, či řízeně spalován dle konkrétního provedení stroje. Kyselina dusičná jako procesní médium je do komory dodávána kontinuálně ze zásobníku. Ukončení procesu je možné řídit dle možností zařízení časem, nebo pomocí úbytku hmoty výrobků. Úspěšně dokončený debinding proces je na dílu poznatelný pomocí procentuálního úbytku hmotnosti. Pro materiál Ultrafuse 316LX je předepsaný minimální úbytek hmoty 10 %. [21, 25, 26]

2.2.1 Debinding materiálu Ultrafuse 316LX

Laboratoř prototypových technologií a procesů na CxI TUL, ani další laboratoře TUL nedisponují vybavením pro katalytický debinding proces dle požadavků výrobce na zpracování materiálu Ultrafuse 316LX.

V první fázi testování procesu debinding byl i navzdory doporučení výrobce testován tepelný debinding. Teplota pro tento experiment byla volena dle Termogravimetrické analýzy (TGA) materiálu na teplotu 375 °C, kde dochází k úbytku hmotnosti. Parametry ohřevu na teplotu 375 °C byly voleny dle výsledků Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) a jsou v tabulce 2.4. Před debinding procesem bylo těleso zváženo za účelem zjištění úbytku hmotnosti během debindingu. První experimentální těleso procesem prošlo v peci bez ochranné atmosféry. Dle změny v zabarvení tělesa došlo k jeho reakci s atmosférou při zvýšené teplotě. Bohužel nebylo možno těleso po procesu zvážit, protože došlo k jeho extrémnímu narušení a při manipulaci i k jeho rozpadu. Výsledek prvního experimentu je na obrázku 2.7.

Tabulka 2.4: Teplotní průběh tepelného debinding v běžné peci.

Krok	Cílová teplota [°C]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Výdrž na teplotě [min]
1	200	1	30
2	375	1	120
Chladnutí pece			



Obrázek 2.7: Těleso po teplotním debindingu procesu (první experiment v běžné peci)

Pro zabránění reakce materiálu s atmosférou byl další tepelný debinding proveden ve vakuové sintrační peci. Po debindingu bylo testovací těleso v peci přímo i sintrováno v rámci jednoho tepelného procesu. Výsledkem těchto experimentů jsou tak již zcela zpracovaná tělesa. Nehrozí tak znovu poškození způsobené nevhodnou manipulací.

Bohužel proces tepelného debindingu ve vakuu porušil povrch tělesa který se vzedmul rozpínajícími se plyny uvnitř tělesa. Tělesa byla i po sintraci velice křehká a lámala se. Pro snížení vlivu unikajících plynů bylo testováno několik rychlostí ohřevu. Testované tepelné průběhy jsou v tabulce 2.5. Při zpomalování rychlosti ohřevu se zvyšuje čas zpracování. V důsledku vzrůstajících časů procesu a stále neuspokojivých výsledků byla možnost tepelného debindingu opuštěna. Jedno z těles, testovaných teplotním debindingem, je zobrazeno na obrázku 2.8.

Tabulka 2.5: Testované tepelné debinding procesy ve vakuové sintrační peci

Test č.	Krok	Cílová teplota [°C]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Výdrž na teplotě [min]
1	1	200	1	30
	2	375	1	120
	3	Sintrace		
2	1	200	1	30
	2	375	0,5	120
	3	Sintrace		
3	1	200	0,5	30
	2	375	0,5	120
	3	Sintrace		
4	1	200	0,2	30
	2	375	0,1	120
	3	Sintrace		



Obrázek 2.8: Těleso po teplotním debinding procesu se sintací ve vakuové peci

Po neúspěšných pokusech s tepelným debinding procesem bylo přistoupeno k testování chemického debinding procesu v laboratorních podmínkách. Jako první test bylo provedeno přímé leptání v koncentrované kyselině dusičné a v ředěné s vodou v poměru 1:1. Vzorek o hmotnosti 1,5 g byl testován ve 4 ml kyseliny. V koncentrované kyselině do minuty začíná probíhat velice rychlá a bouřlivá reakce s velkým exotermním projevem (viz obrázek 2.9). Asi po 2 minutách dochází ke kompletnímu rozpadu vzorku. Při použití ředěné kyseliny 1:1 reakce začíná probíhat až po 3 minutách se shodným průběhem jako u neředěné kyseliny. Výsledkem přímého ponoření materiálu do kyseliny je tedy vždy rozpad vzorku na kovový prášek (obrázek 2.10). Vzhledem k rychlosti reakce je debinding přímým ponořením dílu do kyseliny těžko říditelný proces, a proto dále nepoužitelný.



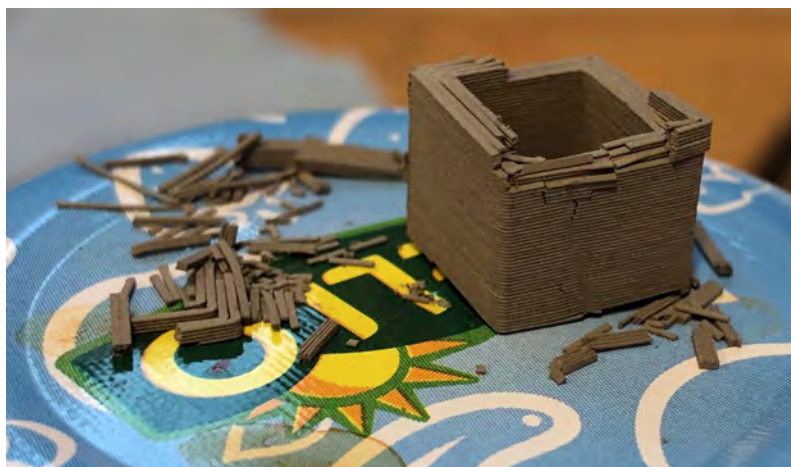
Obrázek 2.9: Reakce materiálu Ultrafuse 316LX s ředěnou kyselinou dusičnou 1:1 s vodou



Obrázek 2.10: Materiál Ultrafuse 316LX rozpuštěný v kyselině dusičné

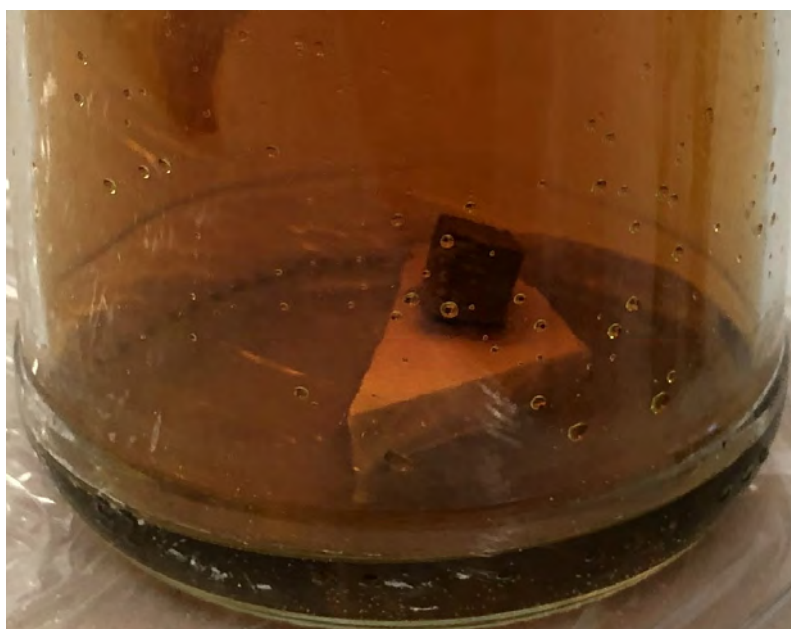
Druhým pokusem o chemický debinding bylo umístění vzorku nad hladinu kyseliny dusičné při pokojové teplotě v uzavřené nádobě (sklenici). Sklenice se postupně naplní výpary z kyseliny a dojde tak k narušení pojiva ve vzorku. První experiment proběhl zavěšením vzorku na nerezový háček nad hladinou kyseliny. Po 2 hodinách došlo k narušení stability vzorku a jeho částečnému rozpadu. Během manipulace při

vyjímání se vzorek dále rozpadal (obrázek 2.11), proto nebylo možné zjistit úbytek hmotnosti.



Obrázek 2.11: Vzorek z materiálu Ultrafuse 316LX po 2 hodinách nad volnou hladinou kyseliny dusičné v uzavřené nádobě

Při dalším experimentu byl vzorek umístěn na keramickou destičku nad hladinu kyseliny v uzavřené sklenici. Na obrázku 2.12 je sklenice se vzorkem po dvou hodinách od vložení vzorku. Po 4 hodinách byl vzorek vyjmut ze sklenice a nechán cca 12 hodin na vzduchu zcela vyschnout. Vážením vzorku po vyschnutí nebyl zjištěn úbytek hmotnosti. Nicméně pevnost vzorku byla narušena a vzorek se i při minimálním kontaktu rozpadal na prach. Chybějící úbytek hmotnosti byl nejspíše zapříčiněn nasycením výparů v uzavřeném objemu sklenice.



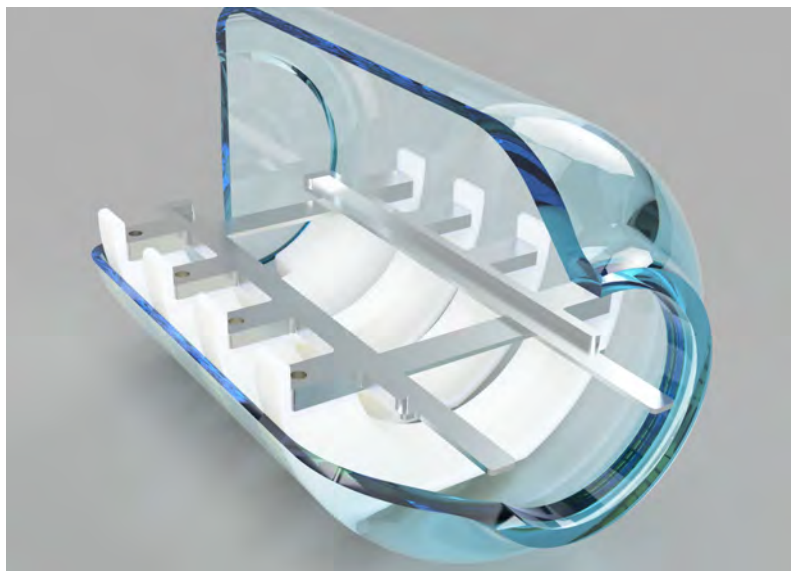
Obrázek 2.12: Druhý pokus debinding v uzavřené sklenici po 2 hodinách od uzavření vzorku uvnitř sklenice

Další, 4-hodinový, experiment byl proveden s odvětráváním sklenice každých 30 minut otevřením víčka. Po zopakování experimentu došlo u vzorku s hmotností 6,03 g k úbytku hmotnosti 0,08 g. Výrobce u vzorku této hmotnosti předepisuje úbytek minimálně 0,61 g. Debinding tak byl u vzorku ještě prodloužen o další 4 hodiny a se zvýšením teploty na 50 °C umístěním sklenice do pasivní sušící pece. Po 4 hodinovém debindingu za zvýšené teploty se na vzorku projevil celkový úbytek hmotnosti 0,034 g. Předpokládá se, že pokračováním by došlo k žádanému úbytku hmotnosti. Vzorek se bohužel při opakovaném umístování do sklenice porušil a rozpadl.

Vlastní debinding komora

Z důvodu komplikované manipulace se vzorky v malé sklenici bylo rozhodnuto o vytvoření vlastní větší komory pro debinding vzorků. Větší komora umožní debinding i vzorků větších rozměrů, například tělesa pro zkoušku statickým tahem (více o zkušebních tělesech v kapitole 4 Testy mechanických vlastností). Pro vytvoření větší komory byla vybrána zavařovací sklenice o objemu 3,7 l, ve které byla vytvořena konstrukce pro snadné umístění vzorků.

Na vnitřní konstrukci byl použit nerezový plech, řezaný laserem a polypropylenové díly, tištěné technologií FFF. Oba materiály byly zvoleny pro svou odolnost vůči kyselině. Pro snadný návrh vnitřních dílů sklenice, byl použit 3D skener. Naskenována byla vnitřní stěna sklenice za použití křídového spreje uvnitř lahve a skenování přes průhlednou stěnu. 3D sken je ovlivněn optickými vlastnostmi stěny sklenice, ale pro ohraničení návrhu vnitřních komponent je ovlivnění zanedbatelné. Všechny vnitřní komponenty jsou dále omezené velikostí hrdla sklenice pro možnost jejich umístění. Návrh dále musí počítat se sestavením komponent uvnitř stísněných prostor sklenice. Návrh vnitřní konstrukce byl proveden v softwaru Fusion 360 od společnosti Autodesk, Inc. CAD model je zobrazen na obrázku 2.13



Obrázek 2.13: Renderovaný náhled na hlavní konstrukci debinding komory

Celá sklenice byla umístěna do speciálního tištěného držáku pro získání stability. Kontaktní plocha sklenice a držáku je opatřena vyhřívací fólií pro zvýšení teploty na dně sklenice a zajištění vyššího odparu kyseliny během procesu. Teplota byla řízena termostatem v místě kontaktu folie se sklenicí. Teplota uvnitř sklenice je tak bohužel neznámá. Pro kontrolní měření byl umístěn nezávislý teploměr na vrchní vnější stěnu sklenice. Během prvních testů bylo na sklenici použito originální víčko které se muselo pro odvětrání výparů několikrát za hodinu celé otevřít a bylo tak nebezpečím pro obsluhu. Zároveň originální víčko rychle, po několika testech, začalo podléhat korozním účinkům vnitřního prostředí. Bylo tedy nahrazeno víčkem vlastní konstrukce z nerezového plechu s otvory pro metrické šrouby M10. Otvory ve víčku slouží pro možnost nastavení kontinuálního odvětrávání sklenice a jako přístupové místo pro vstřikování kyseliny během provozu. Po prvním testu nerezového víčka byl ještě přidán nástavec na odsávací flexi trubku vzduchotechniky pro odvod výparů. Na obrázcích 2.14 a 2.15 je celá reálná sestava po jejím dokončení.



Obrázek 2.14: Fotografie celé sestavy debinding komory po jejím dokončení



Obrázek 2.15: Vnitřní prostor debinding komory s jednou podkladní deskou pro vzorky

Po sestavení komory byla testována řada podmínek až do stavu úbytku hmotnosti cca 9–11 % u vzorků různé velikosti. Konečný proces debindingu tak trvá zhruba jeden den, včetně vysušení vzorků. Proces je popsán krok po kroku v tabulce 2.6. Během procesu dochází k úbytku hmotnosti vzorku. Vzorek i přes tento úbytek hmotnosti zůstává dostatečně pevný pro následnou manipulaci, na rozdíl od testů v malé sklenici. Při prvních testech byly vzorky umístěny přímo na vyřezané nerezové podkladové desky. Po procesu se však vzorky přichytily k deskám a při snaze je přesunout docházelo k poškození povrchu vzorku. Pod vzorky byl vystřížen kancelářský papír pro jejich separaci od podkladní desky. Z papíru lze vzorky již bez poškození lehce přesouvat. Papír je ovšem po procesu narušen kyselinou a nelze jej použít znovu. Na obrázku 2.16 jsou tahové vzorky na podkladní desce po procesu leptání. Vzorky během leptání neprochází viditelnou změnou rozměrů, pouze dochází k nepatrné změně odstínu barvy vzorku.

Tabulka 2.6: Postup při debinding procesu s výsledným úbytkem hmotnosti vzorků 9-11%

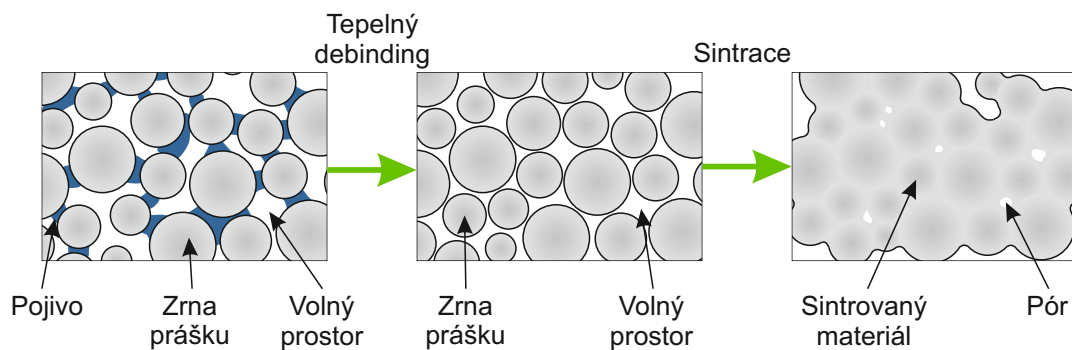
Krok	Operace	Čas začátku	Čas trvání	Čas konce
1	Vložení vzorků Spuštění ohřevu (80 °C)	00:00	60 min	01:00
2	Vstříknutí 20 ml Uzavření lahve	01:00	30 min	1:30
3	Otevření dvou protilehlých otvorů víčka	1:30	30 min	2:00
4	Vstříknutí 10 ml uzavření otvorů víčka	2:00	30 min	2:30
5	Otevření dvou protilehlých otvorů víčka	2:30	180 min	5:30
6	Vstřík 5 ml Uzavření otvorů víčka	5:30	30 min	6:00
7	Otevření dvou protilehlých otvorů víčka	6:00	180 min	9:00
8	Vypnutí vytápění Otevření lahve	9:00	Do ochladnutí lahve cca do druhého dne	
9	Výjmutí vzorků			



Obrázek 2.16: Vzorky na podkladní desce ihned po debinding procesu

2.3 Sintrace

Sintrování, neboli spékání je tepelný proces spojování práškových materiálů. Během sintrování je prášek přiveden na teplotu sintrace, která je blízká teplotě tavení materiálu, ale nikdy ji nesmí dosáhnout. Při sintraci dochází k pronikání povrchu zrn prášku do sebe a tím k jejich spojování. Na obrázku 2.17 je proces sintrace ilustrován. Během sintrace nedochází k plnému protavení materiálu. Výrobky tak mohou mít zvýšenou porozitu oproti jiným procesům výroby. Sintrační proces musí probíhat v ochranné, či aktivní atmosféře, nebo ve vakuu. Aktivní atmosféra může během procesu ovlivnit reakce některých chemických prvků a napomoci k redukci těchto prvků či jejich sloučenin v materiálu. Hlavním cílem atmosféry, či vakua je z prostředí odstranit kyslík a zabránit oxidaci materiálu. Kyslíková atmosféra má oxidační vliv na povrch zrn během zahřívání. Díky tomu by byl oxidovaný povrch zrn následně uzavřen uvnitř výrobku. Mezi nejběžněji používané plyny pro sintraci patří argon a vodík. Argon se používá pro svou inertnost. Vodík slouží jako redukční plyn, který brání zvyšování křehkosti u ocelí. Během procesu sintrace v důsledku prolínání povrchu zrn kovu do sebe dochází ke zmenšení celkového zaujímaného objemu. Výrobek se tak během procesu smršťuje. U některých tvarů (typů) výrobků může smrštění vést až k deformaci či destrukci geometrie. [14, 27]



Obrázek 2.17: Ilustrace změn v práškovém materiálu během procesu sintrace

2.3.1 Sintrance materiálu Ultrafuse 316LX

Pro materiál Ultrafuse 316LX je výrobcem předepsán proces sintrace ve vodíkové atmosféře, se sintrační teplotou 1380 °C. Jedná se tedy o standardní sintrační proces, používaný při technologii MIM. Kromě sintrační teploty je doporučený přesný teplotní průběh sintračního procesu (tabulka 2.7). Rychlost pro fázi chlazení není výrobcem předepsána. Je tedy nechána na přirozeném vychladnutí sintrační pece. [14]

Tabulka 2.7: Doporučený teplotní průběh sintračního procesu pro materiál Ultrafuse 316LX [14]

Krok	Cílová teplota [°C]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Výdrž na teplotě [min]
1	600	5	60
2	1380	5	180
3	Přirozené chlazení pece		

V rámci testování sintrance materiálu Ultrafuse 316LX byla použita sintrační vakuová pec určená pro technologii MIM, od firmy CLASIC CZ. Procesy sintrace byly prováděny pouze ve vakuu, pro snížení finančních nákladů a technické náročnosti na procesní plyny. Testovány byly vzorky s různým procesem debinding dle části 2.2.1 Debinding Materiálu Ultrafuse 316LX. Vzorky byly vždy sintrovány dle výrobcem doporučeného průběhu teplot z tabulky 2.7. Během testování chemického debinding procesu se po sintraci zkušební tělíska objevil rozpad tělesa na jednotlivé dráhy tisku (obrázek 2.18). Byly tedy upraveny parametry tisku vzorků. Parametry jsou uvedeny v části 2.1.2 Parametry tisku v tabulce 2.3.



Obrázek 2.18: Rozpadající se těleso v důsledku nevhodných tiskových parametrů

Po úpravě parametrů tisku došlo ke zlepšení soudržnosti tělesa během všech procesů. Během procesu sintrace se však začal projevovat průhyb tělesa, respektive zvedání jeho konců (obrázek 2.19). Předpokládalo se, že deformace byla způsobena rychlým ochlazením sintrační pece. Pro ověření byl k procesu sintrace doplněn i řízený průběh chlazení. Konečný průběh sintračního cyklu je uveden v tabulce 2.8. Po této úpravě bylo sintrováno další zkušební těleso. U tohoto tělesa se již deformace

neprojevila. Tento průběh sintrace byl tedy konečný a byl tak použit pro výrobu zkušebních vzorků. Výsledný vzorek je uveden na obrázku 2.20.

Tabulka 2.8: Použitý teplotní průběh sintračního procesu pro materiál Ultrafuse 316LX s řízeným chlazením

Krok	Cílová teplota [°C]	Rychlost ohřevu [°C/min]	Výdrž na teplotě [min]	Proces
1	600	2,5	60	Sintrace
2	1380	5	180	
3	800	-1	0	Chlazení
4	400	-2,5	0	



Obrázek 2.19: Prohnutí tělesa po sintraci bez řízeného chlazení

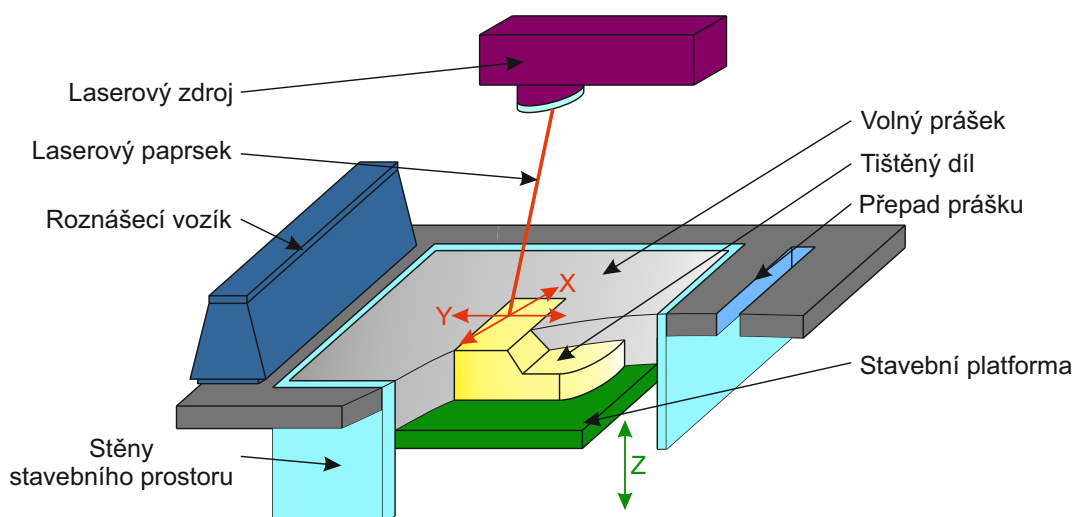


Obrázek 2.20: Sintrované těleso dle konečných parametrů procesu pro zpracování Ultrafuse 316LX

3 Technologie Selective Laser Melting

Technologie Selective Laser Melting (SLM), neboli Selektivní laserové tavení, je jednou z nejběžnějších průmyslových technologií aditivní výroby na přímé zpracování kovů. SLM patří mezi technologie typu Powder Bed. Pro technologii SLM se využívá materiál v podobě jemného kovového prášku. Tento prášek je vyráběn atomizací s velikostí zrn 15–45 μm dle typu materiálu. Mezi využívané materiály patří jakostní oceli, hliníkové, niklové, titanové, kobaltové a měděné slitiny. V současné době je v oblasti SLM rozvíjen zejména vývoj nových typů prášků v oblasti železných i neželezných kovů. [9, 10, 28]

Principem technologie SLM je tavení kovového prášku za použití laseru. Prášek je rozprostřen v tenké vrstvě na celou tiskovou plochu a do této vrstvy prášku je laserem vypálen průřez dílu v tiskové vrstvě. Pálením je prášek ve vrstvě roztaven, a tím spojen s již hotovou částí výrobku. Po vypálení celé vrstvy sjíždí tisková platforma s práškem a výrobkem o tloušťku vrstvy níže (hlouběji do tiskového válce). Proces se opakuje až do navrstvení celého výrobku. Na obrázku 3.1 je zobrazen zjednodušený náčrt tiskové komory. Při výrobě je zapotřebí mít dostatek prášku na zaplnění celého tiskového prostoru do odpovídající výšky vyráběného dílu. Nevyužitý okolní práškový materiál je po vyjmutí z tiskového prostoru nutné přesít a odstranit tak nevhodně velké částice. Přesetý prášek je možné opět vrátit do procesu a použít znovu. Přesto je technologie náročná na potřebné množství prášku pro tisk i při výrobě objemově malých dílů. [9, 10, 28]



Obrázek 3.1: Schéma SLM procesu

Celý proces výroby probíhá v ochranné atmosféře dusíku či argonu, pro zabránění oxidace výrobku. Ochranná atmosféra nejen chrání před oxidací, ale také brání vznícení (hoření) malých zrn kovového prášku během pálení. Během pálení do práškové vrstvy se uvolňují spaliny z procesu tavení zrn prášku. Tyto spaliny je nutné odvést z oblasti procesu. Celá ochranná atmosféra je tak po dobu procesu neustále cirkulovaná přes filtrační systém stroje. [9, 10, 28]

Technologie SLM nabízí značnou tvarovou volnost vyráběných dílů. Příkladem tvarových možností SLM technologie je ukázka na obrázku 3.2. Díky práci s úzkým laserovým paprskem je možné dosáhnout i tenkých stěn a velkých detailů. Výrobek ovšem nemůže být zcela volně, je nutné jej spojit se základní stavební deskou za pomoci systému podpěrných struktur. Tyto struktury brání dílu v propadání se do prášku a zároveň k deformacím dílu v důsledku vznikajícího vnitřního pnutí během procesu. Výrobek je laserem taven pouze v malém bodě a tím vzniká extrémní rozdíl teplot během stavby. Toto tepelné namáhání může vést dle topologie výrobku k deformacím geometrie. V extrémních případech může docházet až k praskání stěn výrobku. Vnitřní pnutí je závislé na typu materiálu a parametrech tiskového procesu. U některých materiálů je nezbytné po výrobě provádět tepelné zpracování pro odstranění vnitřního pnutí a dosažení požadovaných mechanických vlastností. [29, 30]



Obrázek 3.2: Cyklistický představec, topologicky optimalizovaný pro výrobu na technologii SLM z materiálu AlSi10Mg

3.1 Proces výroby

Proces výroby je popsán na stroji SLM 280HL, který je umístěn v Laboratoři prototypových technologií a procesů na CxI TUL. Stroj SLM 280HL vyroben roku 2013 od společnosti SLM Solutions Group AG je v konfiguraci s jedním 400 W laserem a pracovním prostorem 280 mm × 280 mm × 365 mm. Stroj pracuje s inertní atmosférou dusíku, nebo argonu pro reaktivní materiály. Dusíkovou atmosféru si stroj vyrábí interním generátorem dusíku ze stlačeného vzduchu. Argonová atmosféra je dodávána z tlakových lahví. Pro možnost recyklace (přesetí) kovového prášku náleží

ke stroji manuálně obsluhovaná přesívací stanice PSM 100. Celá sestava SLM 280HL a PSM 100 je na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Stroj SLM 280HL a přesívací stanice PSM 100 od společnosti SLM Solutions Group AG

Celý proces výroby na zařízení SLM 280HL se standardním ocelovým materiálem 316L od společnosti SLM Solutions Group je pro pracovníky laboratoře rutinní záležitostí. Práce lze rozdělit do několika dílčích kroků.

1. Příprava tiskových dat
2. Příprava tiskárny a materiálu
3. Výrobní proces
4. Vyjmutí výrobků z tiskárny
5. Očištění výrobků a další dokončení

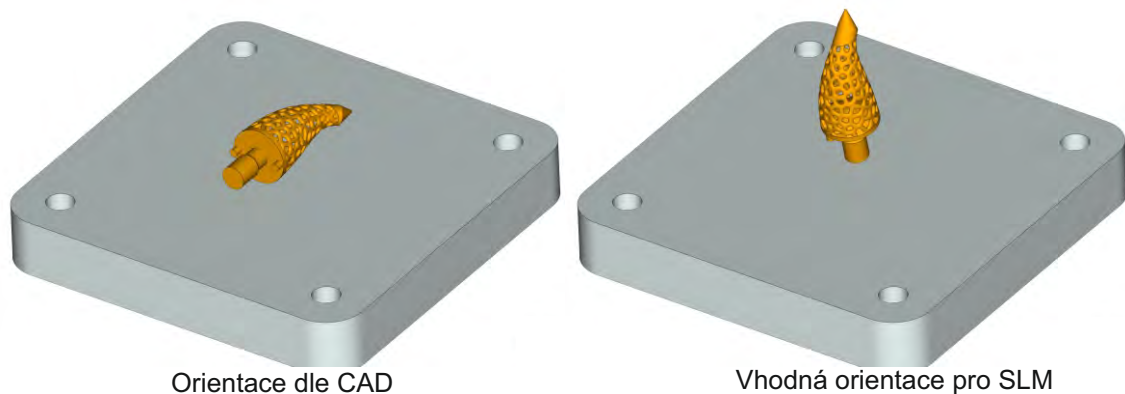
3.1.1 Příprava tiskových dat

Příprava tiskových dat je základním krokem pro stanovení náročnosti výroby a její možnou realizaci. Samotná příprava dat má specifický postup, lišící se dle použitých softwarových řešení. V laboratoři je pro přípravu dat aktuálně používán software Magics v.24 od společnosti Materialise. Pro přenos geometrie do Magics jsou nejčastěji používány soubory typu STL. Magics je software určený primárně pro práci s STL modely a export dat pro SLM je pouze doplňkovou funkcí.

Prvním krokem přípravy je zvolení orientace dílu (modelu) ve stavebním prostoru tiskárny. Orientaci dílu v prostoru je vhodné volit s ohledem na snížení koncentrace vnitřního pnutí a deformací při tisku. Pro snížení pnutí má být díl orientován tak, aby docházelo během vrstvení pouze k plynulým změnám průřezu. U většiny

výrobků je tohoto dosaženo jejich nakloněním do úhlopříčného směru (ukázka na obrázku 3.4). Toto řešení však vede ke zvyšování stavební výšky dílu. Zvyšováním stavební výšky dochází k prodlužování výrobního času a zároveň roste množství potřebného prášku pro zaplnění stavebního prostoru. Při orientování dílů jsou tedy dva požadavky, které je nutné optimalizovat: výšku stavby a deformace výrobku. V případě softwaru Magics je orientace dílu pouze na znalostech a zkušenostech uživatele. Je možné použít specializované softwary pro simulaci procesu SLM výroby a optimalizovat tak deformace. Tyto simulace jsou však výpočtově časově náročné a jejich význam je pouze při extrémně velkých a nákladných výrobcích. [31, 29]

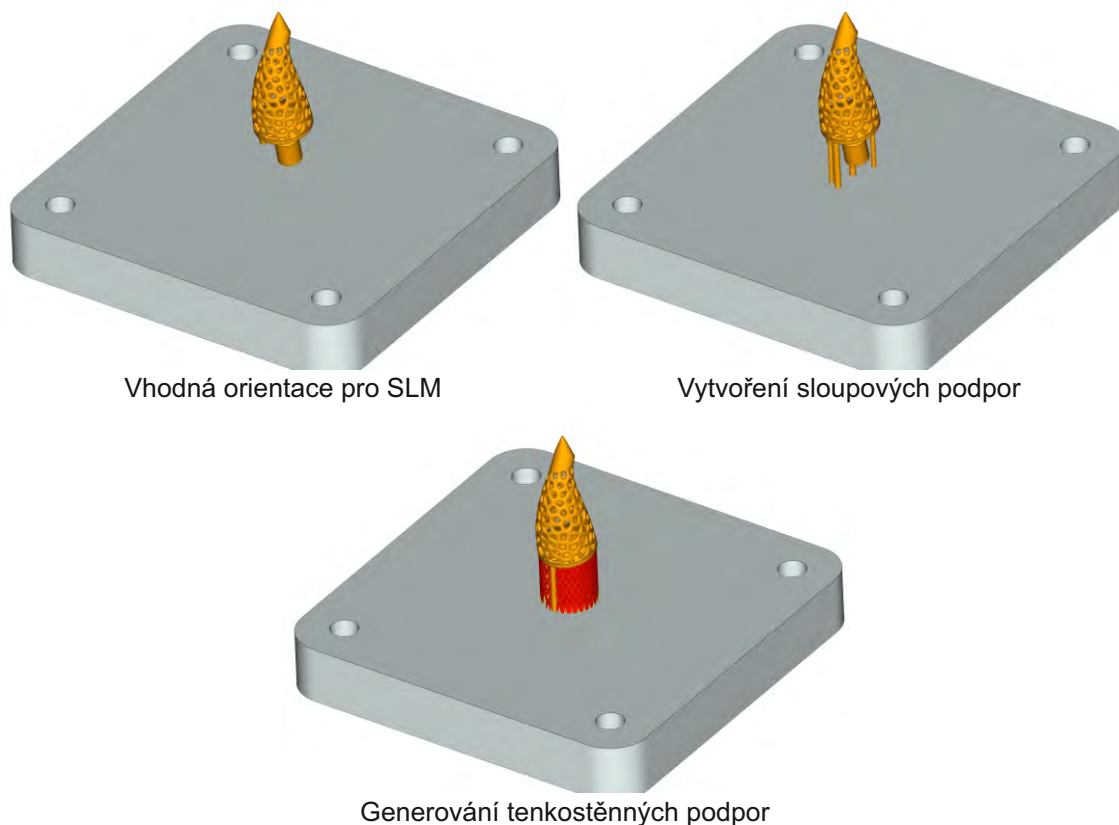
V případě testovacích vzorků je použita orientace shodná s možnostmi výroby materiálu Ultrafuse 316LX. Tělesa jsou položena na plochu v rovině vrstev. Jedná se tak o relativně nevhodnou orientaci pro SLM technologii z pohledu velikosti pálené plochy výrobku. Je zde ale nejnižší možná stavební výška, a tak nejkratší výrobní čas.



Obrázek 3.4: Ukázka změny orientace dílu na stavební desce pro SLM proces

Druhým krokem je vytváření podpurných struktur fixujících výrobek. Tyto struktury zároveň umožňují snazší oddělení výrobků od stavební desky během dokončování. Snadné odstranění dílu z desky je zabezpečeno uchycením dílu na podporách ve výšce 3–10 mm nad samotnou plochou desky. Tento prostor dává dostatek místa pro oddělení pomocí různých nástrojů. Pro vytvoření podpurných struktur má software Magics obsažen modul "Support generation". Tato funkce umožňuje tvorbu tenkostěnných komplexních struktur s malou kontaktní plochou na dílu, pro možnost snadného odstranění po tisku. Další možností uchycení dílu k desce je použití sloupků. Sloupky jsou zcela definovány uživatelem. Na rozdíl od tenkostěnných podpor mají sloupky vyšší tuhost, ale mohou zanechat na dílu stopy i po jejich odstranění. Na obrázku 3.5 je zobrazen celý postup vytváření podpurných struktur.

Třetím krokem přípravy dat je rozmístění dílů s podporami na stavební desku. Zde je optimální umístění dílů z pohledu laserového paprsku uprostřed stavební desky. U zařízení SLM 280HL není vhodně vyřešeno proudění atmosféry v komoře, proto je nevhodné umístit výrobek příliš blízko vstupu atmosféry do komory. V této oblasti byla u některých materiálů zjištěna zvýšená porozita.



Obrázek 3.5: Kroky při vytváření podpůrných struktur pro SLM

Posledním krokem přípravy dat je volba parametrů tisku a vytvoření datového souboru pro tiskárnu. Mezi nejpodstatnější parametry patří použitá energie laseru P [W], rychlost pohybu laserového bodu v [mm/s], výška tiskové vrstvy t [mm] rozestup drah laseru h [mm]. Tyto parametry vstupují do základního vzorce energie, předané do prášku E [J/mm³] (rovnice 3.1). Pro zpracování vzorků je použito standardní nastavení od SLM Solutions Group na zpracování oceli 316L dle tabulky 3.1 [32]

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (3.1)$$

Tabulka 3.1: Parametry zpracování oceli 316L

Energie laseru [W]	175
Rychlost laseru [mm/s]	750
Výška tiskové vrstvy [mm]	0,03
Rozestup drah laseru [mm]	0,12

3.1.2 Příprava zařízení na tisk

Přípravu lze rozdělit do dvou skupin činností. Jednou skupinou je příprava kovového prášku. Druhou skupinou je poté příprava samotné tiskárny.

Příprava kovového prášku

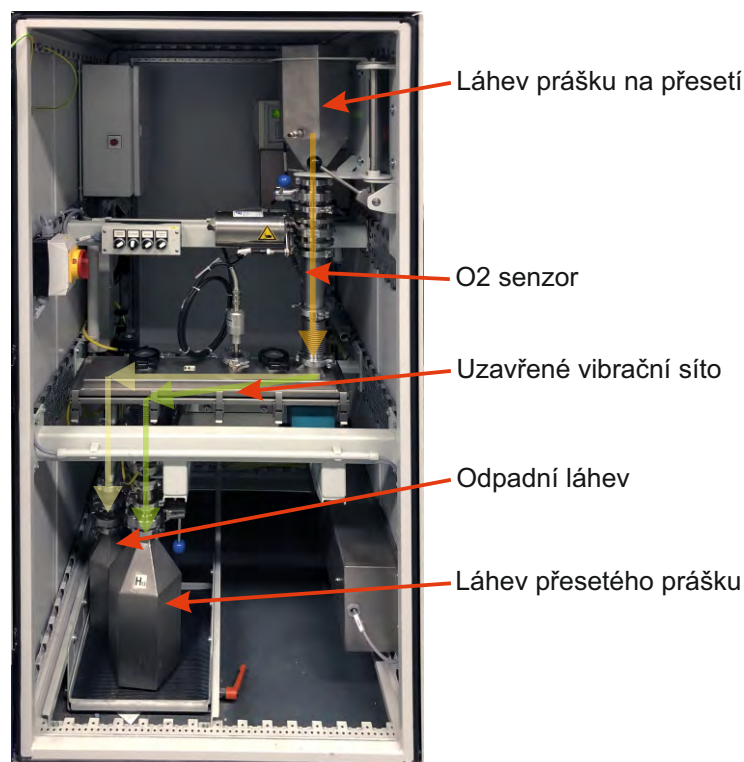
Vstupní kovový prášek přímo ovlivňuje výslednou kvalitu výrobku. Je tedy na něj kladeno hned několik požadavků. Některé parametry prášku ovlivňuje uživatel svým zacházením s práškem. Jiné parametry jsou dány výrobní technologií a kvalitou výroby.

Prvním požadavkem na prášek je kvalita jeho výroby, respektive chemické složení a topologie zrn. Požadavek na stejné chemické složení materiálu je v celém objemu prášku. Zároveň jednotlivá zrna prášku musí splňovat geometrické a velikostní požadavky SLM procesu. Pro SLM je používán prášek s kulovým zrnem s velikostí 15–45 μm , dle typu materiálu. Pro dodržení chemické kvality a rozměrové kvality prášku je vhodné využít renomovaných dodavatelů. V našem případě je používán prášek od společnosti SLM Solutions Group. [33, 34]

Při procesu tisku může v okolí výrobku docházet k deformaci tvaru, či spékání více zrn do shluků. Pro odstranění takovýchto nevhodných zrn je prášek před každým použitím přesíván. K přesívání prášku je využívána přesívací stanice s inertní atmosférou argonu. Samotné přesívání probíhá na vibračním sítu. Argonová atmosféra z procesu odstraňuje riziko výbuchu při tření jemných reaktivních částic kovu. Přesívací stanice je popsána na obrázku 3.6. Do stanice je prášek zakládán manuálně v nerezové nádobě a po přesetí je manuálně v jiné vyjmut. Při používání různých druhů prášků je nutné pro každý materiál používat vlastní výměnné síto pro prevenci kontaminace materiálu. [28, 10]

Velice důležitým parametrem pro použití prášku je jeho relativní vlhkost. Jemné prášky jsou obecně značně hygroskopické materiály. Prášky mají tedy tendenci vyrovnávat svou vlhkost s okolím prostředím. Vlhkost v prášku může mít negativní účinky ve výrobě. Vlhký prášek během procesu pálení odpařuje vodní páry v komoře a negativně tak působí na vlastnosti výrobku. Pokud je prášek extrémně vlhký, může přestat být sypký a začít vytvářet hrudky, které brání v jeho správném roznášení po tiskové ploše. Pro dosažení kvalitní výroby je výrobcem stroje doporučená maximální vlhkost prášku 7 %. Z tohoto důvodu je prášek před použitím sušen v horkovzdušné sušárně. Sušení je prováděno při teplotě 50 °C po dobu minimálně 24 hodin. Následně je vlhkost prášku kontrolována. Po sušení se relativní vlhkost prášku před použitím pohybuje v rozmezí 2–5 %. [35, 34]

Před každým zahájením výroby je prášek přeset a vysušen na požadovanou vlhkost. Takto je vždy minimalizováno riziko nežádoucích vlivů na výrobu a mechanické vlastnosti dílů.



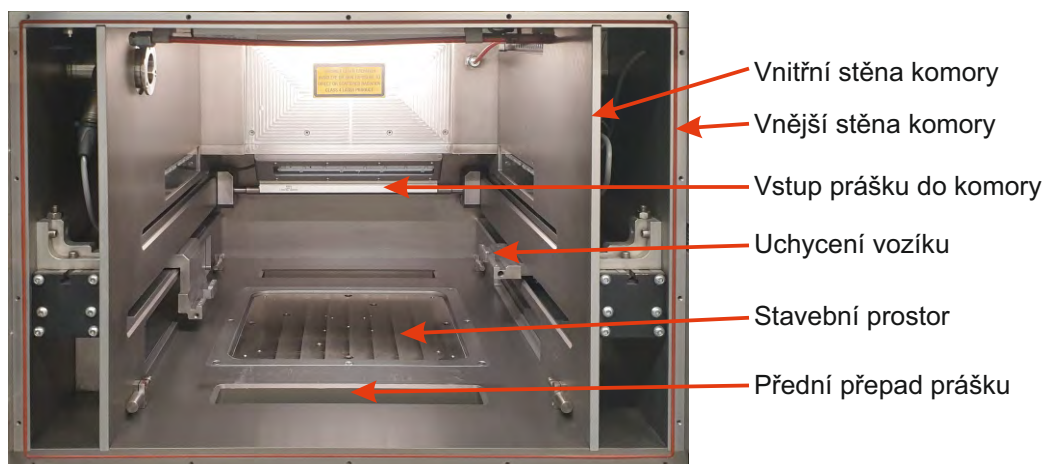
Obrázek 3.6: Přesívací stanice PMS100 se znázorněním cesty prášku a popisem hlavních komponent

Příprava tiskárny

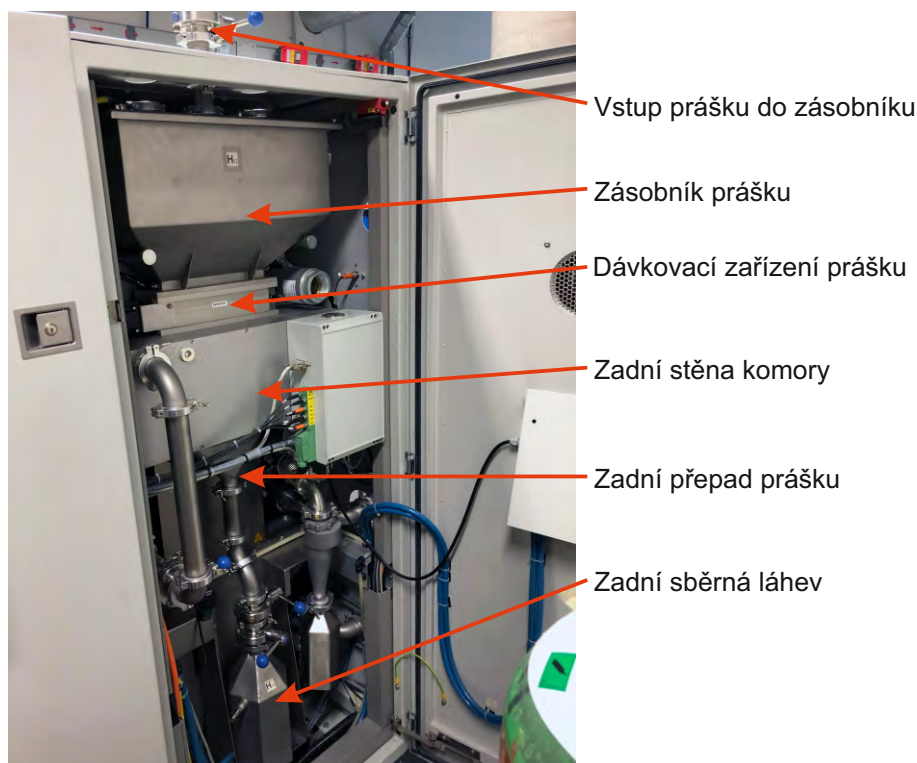
Je důležité dbát na čistotu pracovní komory tiskárny, a to jak při změně materiálu, tak při práci se shodným materiálem. Během procesu pálení vznikají zplodiny v podobě plynů o vysoké teplotě. Tyto zplodiny jsou proudící atmosférou z procesní komory odváděny do filtračního systému stroje. Nicméně malé procento zplodin kondenzuje a usazuje se v podobě sazí na stěnách komory a prostupu pro laser. Před každým započatím výroby je tak nutné usazené zplodiny ze stěn a zejména z prostupu laseru odstranit. Čištění stěn i prostupu laseru probíhá mechanicky za použití isopropylalkoholu a papírových ubrousků, či speciálních utěrek pro čištění citlivých optických prvků.

Pokud dochází ke změně zpracovávaného materiálu, je nutné provádět důkladnější čištění celé pracovní komory stroje. Čištění tak zahrnuje i demontáž vnitřních stěn komory a roznašejícího vozíku pro dokonalé vyčištění od zbytků předchozího materiálu. V rámci tohoto čištění je také čištěn systém přepadů prášku. Celé čištění pak trvá dvěma pracovníkům cca 5 hodin. Na obrázku 3.7 je ukázána procesní komora během čištění. Při změně materiálu musí být provedena výměna, nebo čištění celého zásobníku prášku, včetně systému dávkování prášku v zadní části stroje (obrázek 3.8). Zásobník prášku a dávkovací systém je možné celý vyjmout. Je tedy vhodné pro každý materiál mít samostatný zásobník prášku, případně je také možné měnit roznašecí vozík kus za kus. Pouhou výměnou těchto komponent se snižuje časová náročnost na čištění při změně materiálu. Čištění roznašecího vozíku

je mnohonásobně snazší, nežli čištění zadního zásobníku. Z tohoto důvodu je laboratoř vybavena několika zásobníky a pouze jedním vozíkem. Vozík je během čištění rozkrytován a vytřen isopropylalkoholem.



Obrázek 3.7: Pracovní komora SLM 280HL během čištění



Obrázek 3.8: Zadní prostor stroje se zásobníkem prášku

Po vyčištění tiskové komory je zapotřebí vložit vhodnou stavební desku. Stavební deska je vyrobená ze stejného materiálu jako je plánovaný výrobek, případně z materiálu chemicky velice podobného. Například pro tisk z nástrojové oceli je možné použít desku z oceli nerezové. Díl, respektive podpůrné struktury jsou v první

vrstvě protaveny do povrchu stavební desky. Je tedy nezbytné správně desku usadit a nastavit počáteční výšku (zasunutí) desky vůči roznašecímu vozíku. Tak vznikne při prvním nanesení prášku vrstva vhodné tloušťky a dochází k pevnému spojení stavební desky a výrobku.

Jakmile je stavební deska ustavena může se začít s přehřevem této desky na provozní teplotu. Dochází k uzavření pracovní komory a jejímu zaplavení ochrannou atmosférou. Ochranná atmosféra je pod tlakem přiváděna několika vstupními body do komory. Ve fázi plnění je prostor komory otevřen přes výfukový systém, aby nevznikal přetlak uvnitř komory, ale docházelo k vytlačování kyslíku. Po poklesu hladiny kyslíku pod 0,2% dochází k uzavření výfukového systému a natlakování komory na 500 mbar. Zároveň je spuštěna oběhová pumpa atmosféry, která přes filtrační systém cirkuluje ochrannou atmosféru. Od tohoto okamžiku je tlak řízen po celou dobu výroby automaticky a při jeho poklesu automaticky dorovnan. Přibližná spotřeba plynu je 2,5l/min.

3.1.3 Výrobní proces

Samotný výrobní proces probíhá v opakujícím se jednoduchém cyklu. Cyklus začíná nadávkováním práškového materiálu do roznašecího vozíku. Dávka odpovídá potřebnému prášku na dvě tiskové vrstvy. Ve vozíku je dávka mechanicky rozdělena do dvou komor (pro každou vrstvu jedna komora). Po dávkování materiálu je vozík přesouván do pozice roznášení směrem vpřed. Při pohybu vpřed je otevřeno dno první komory prášku v roznašecím vozíku a prášek je vysypán před silikonovou lištu na spodní straně vozíku. Přejezdem vozíku do přední polohy dojde tak k nanesení vrstvy prášku do stavebního prostoru. Po nanesení prášku dochází k zaparkování vozíku v přední poloze a vypálení daného průřezu vrstvy. Po dokončení pálení je stavební prostor posunut o tloušťku vrstvy níže v ose Z. Nyní je otevřeno dno druhého zásobníku ve vozíku a vysypán prášek za silikonovou lištu. Pohybem vozíku zpět do zadní pozice je tak nanesena nová vrstva prášku. Po přejezdu vozíku a jeho zaparkování následuje pálení průřezu druhé vrstvy v cyklu. Po dopálení vrstvy je opět stavební prostor posunut o výšku vrstvy níže a cyklus se tak může opakovat.

Během dávkování je dávkováno vyšší množství kovového prášku, nežli je nutné pro vytvoření vrstev. Prášek navíc je zde jako rezerva pro možné nepřesnosti v dávkování a roznášení. Přebytečný prášek je na konci pohybu vozíku setřen pomocí silikonové lišty do přepadového otvoru na spodní straně komory. Stroj má dva přepady na přední a na zadní straně komory. Prášek z těchto přepadů je sbírán do nádob. Pro každý přepad přísluší jedna nádoba. Během procesu je nutné tyto nádoby průběžně vyprazdňovat, aby nedošlo k jejich přeplnění. Prášek z přepadu je nutné prosít v přesívací stanici a následně je možné jej opět vsypat zpět do zásobníku materiálu ve stroji.

3.1.4 Vyjmutí výrobků z tiskárny

Po samotné výrobě zůstává výrobek zasypán práškem ve stavební komoře. U stroje SLM je odstranění prášku prováděno při zavřené komoře přes rukavice. Tak obsluha přichází do minimálního kontaktu s kovovým práškem. Odstranění prášku probíhá do přední přepadové nádoby. Nádoba má omezený objem a je nutné její obsah kontrolovat a postupně přesívat. Před samotným vymetáním nepoužitého prášku z okolí výrobku, je nutné odsát spálený a znehodnocený prášek v okolí nasávacího otvoru atmosféry. Prášek v této části stavební komory má totiž vysoký obsah usazenin ze zplodin a mohl by kontaminovat materiál. Toto odsání je provedeno příslušným externím vysavačem.

Samotné vymetání probíhá postupně za krokového vysouvání výrobku spolu s práškem z prostoru válce. Při každém posunutí je snaha o co největší odstranění okolního prášku za použití štětce či stěrky. Je zde i možnost vysunout celý výrobek najednou, ale dojde tak k rozsypaní volného prášku po celé komoře a jeho vniknutí i do systému cirkulace atmosféry a dalších nepřístupných částí komory. Při použití této možnosti je následné čištění komory pro další výrobu značně ztíženo. Je tak výhodnější proces provádět postupně, po krocích. Na obrázku 3.9 je vidět výrobek v procesu vyhrabávání z prášku.

Po odstranění veškerého prášku z prostoru je možné komoru otevřít. U některých výrobků může zůstat prášek uvězněný v podpurných strukturách, či v samotném výrobku, proto je vždy nutná opatrná manipulace s výrobkem. Výrobek je vyjmut z tiskové komory pevně přivařen na stavební desku, oddělení výrobku je prováděno externě mimo tiskárnu. U výrobků s nižší hmotností může vyjmutí probíhat ručně. Pro vyjmutí velkých těžkých výrobků je možno použít speciální vidlicový zvedák přesně zapadající do stavební platformy. V praxi je většina výrobků pro snazší manipulaci vyjímána z tiskárny ručně.



Obrázek 3.9: Táhová tělesa z materiálu AISI 316L při začátku odstraňování volného prášku z prostoru stroje

3.1.5 Očištění výrobků a další dokončení

Mezi základní dokončovací operace patří odstranění výrobku ze stavební desky a zčistění podpor. U některých typů materiálů probíhá před tímto krokem tepelné zpracování přímo na stavební desce za účelem uvolnění vnitřního pnutí.

Pro odstranění výrobků z desky existuje řada přístupů. Nejpresnější metoda je použití strojní řezání, například drátořez zejména u tvrdých materiálů jako jsou nástrojové oceli. Mezi další metody patří ruční odřezávání a odsekávání. Ruční přístup je volen i v laboratoři na oddělení vyráběných vzorků od desky. Vzorky byly odřezány ruční oscilační pilkou.

Po oddělení výrobku od stavební desky zůstává na výrobku většinou podpůrná konstrukce. Tyto části je možné odstranit ručně různým způsobem. Jednou z možností je podpůrné konstrukce odlámat, odsekat, odřezat ručně a následně kontaktní plochy ručně dočistit broušením opět různými nástroji dle možností. V případě vzorků bylo použito dobroušení pilníkem.

Druhou možností odstranění podpůrných struktur je volba obrábění pro dokončení. Zde je však vhodné při výrobě již s tímto krokem počítat a na výrobku vytvořit přídavek na stěně pro obrábění. I tato možnost byla zvolena pro výrobu vzorků které byly tištěné s 1 mm přídávkem na každou stěnu pro možnost obrobení a odstranění povrchových nedokonalostí. Obráběním je možné také odstranit rozměrové nepřesnosti výroby a dosáhnout tak vyššího stupně přesnosti a menší drsnosti povrchu.

4 Testy mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti charakterizují daný materiál, většinou jsou ale svázány s danou výrobní technologií. Například obráběné a tvářené díly mohou vykazovat značně odlišné mechanické vlastnosti. Není tomu jinak také u rozdílných technologií AM. Porovnání mechanických vlastností technologie SLM s technikou tisku FFF materiálu Ultrafuse 316LX je tak jedním z nejdůležitějších kritérií. Za tímto účelem byly vybrány dva typy zkoušek: statická tahem a dynamická rázem. Pro každou zkoušku byla vyrobena danou technologií sada vzorků. Celkem bylo vyrobeno pět sad. Dvě sady technologií SLM a tři sady z Ultrafuse 316LX. Na obrázku 4.1 jsou zobrazeny všechny zástupci těchto testovaných skupin.



Obrázek 4.1: Zástupci všech zkušebních sad pro test statickým tahem

První sada SLM vzorků byla přímo po tisku s minimem dokončováním. U těchto vzorků došlo pouze k odstranění podpůrných struktur. Druhá sada SLM vzorků byla tištěna s přídatkem 0,5 mm pro obrábění. Následným obráběním na přesný rozměr byl odstraněn hrubý povrch vzorku.

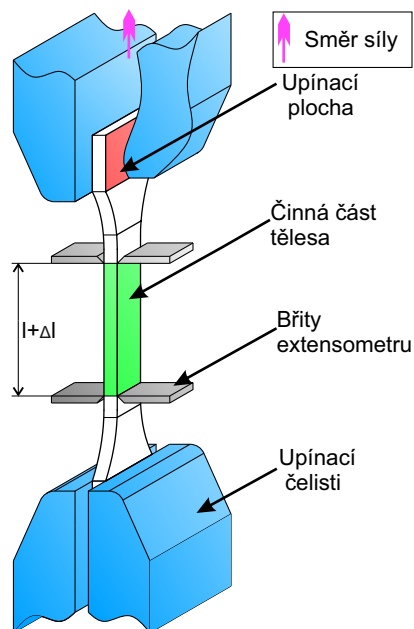
Všechny tři sady Ultrafuse 316LX vzorků byly tištěny se shodnými technologickými parametry v laboratoři detailní postup v kapitole 2. Následně tyto sady

prošly různým zpracováním. První sada vzorků byla odeslána do společnosti BASF v Německu na dokončovací zpracování. Druhá sada vzorků byla zpracována ve společnosti Vibrom s.r.o., která se standardně zabývá technologií MIM v ČR. Třetí sada byla kompletně zpracována v laboratoři. Vzorky zasláné do společnosti BASF slouží jako referenční vzorky, Společnost BASF provedla svůj předepsaný postup pro zpracování materiálu Ultrafuse 316LX. Ve společnosti Vibrom prošly vzorky standardním procesem pro zpracování oceli 316L technologií MIM. Tyto vzorky slouží k ověření možnosti rozšířit výrobu MIM o možnost FFF 3D tisku kovů.

4.1 Zkouška tahem

Zkouška statickým tahem v technické praxi poskytuje základní informace o chování materiálu. Výsledky z těchto zkoušek jsou používány při návrhu strojních součástí. Zkouška tahem je tedy první zkouškou mechanických vlastností materiálu. Výrobci obou materiálů (SLM Solutions Group a BASF) uvádějí ve svých materiálových listech nominální vlastnosti svých materiálů právě při zkouškách statickým tahem. Hodnoty uváděné výrobcem jsou v tabulce 4.1. Společnost BASF v materiálovém listu uvádí použitou normu DIN EN ISO 6892. Společnost SLM Solutions Group normu zkoušek neuvádí.

Zkouška tahem na zkušebních vzorcích není provedena přesně dle norem. Pro neobvyklou a nezkušenost s výrobní technologií je zkouška tahem upravena. Veškeré úpravy zkoušky zjednodušují zpracování testovaných těles. Celkem byly pro sestavení zkušebních těles a průběhu zkoušky použity dvě normy: ČSN EN ISO 6892 (Kovové materiály - Zkoušení tahem) a ISO 527 (Plasty - Stanovení tahových vlastností). Schéma tahové zkoušky je na obrázku 4.2 [36, 37, 38, 39]



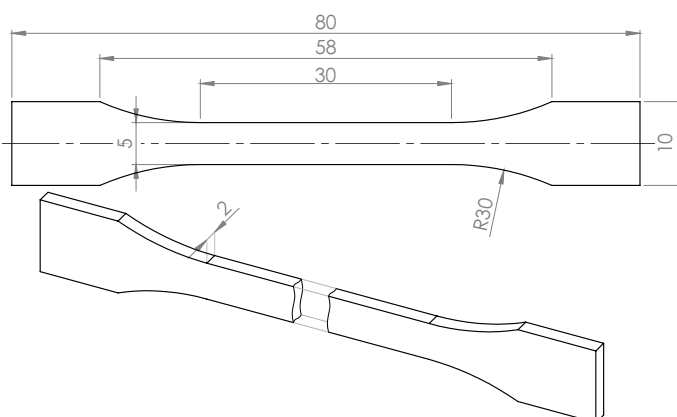
Obrázek 4.2: Schéma procesu tahové zkoušky [40]

Tabulka 4.1: Základní vlastnosti materiálů Ultrafuse 316LX od společnosti BASF a materiálu 316L od společnosti SLM Solutions Group

Materiál	Napětí na mezi pevnosti R_m [MPa]	Napětí na mezi kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A [%]
SLM 316L	620	505	43
Basf Ultrafuse 316LX	561	251	53

4.1.1 Zkušební tělesa

Zkouška statickým tahem kovových materiálu se řídí normou ČSN EN ISO 6892. Norma doporučuje používání zkušebních těles kruhového průřezu. Pro technologii FFF s materiálem Ultrafuse 316LX je však tento tvar těles obtížně výrobitelný. Pro snazší výrobu a zároveň také úsporu materiálu byl zvolen tvar a rozměr zkušební tělesa z normy ISO 527. Norma nabízí více typů těles dle výrobních možností. Pro technologii FFF v normě vyhovují tělesa značená 1A. Pro zvýšení úspory materiálu bylo ale vybráno těleso 1BA pro své malé rozměry. Jedná se o těleso s obdélníkovým průřezem zkušební části o rozměrech 5 mm × 2 mm a délkou činné části 30 mm ($L_0=15$ mm). Přesný tvar tělesa s rozměry je na obrázku 4.3. [38]



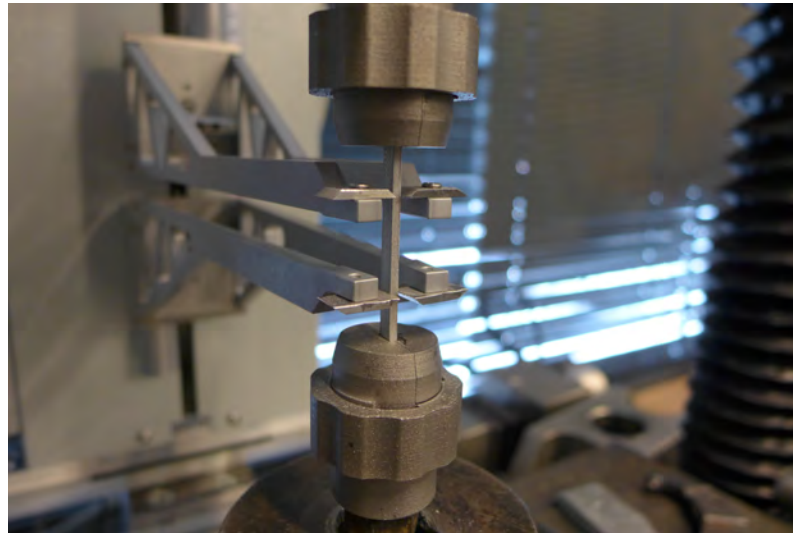
Obrázek 4.3: Zkušební těleso pro zkoušku tahem

4.1.2 Parametry zkoušky

Parametry zkoušky byly zvoleny dle normy ČSN EN ISO 6892. Rychlost zatěžování byla zvolena 1 mm/s do 2 % prodloužení. Nad 2 % prodloužení byla zkušební rychlost plynule zvyšována na 15 mm/s. Zkouška byla prováděna na univerzálním trhacím přístroji TiraTest se 100 kN snímačem síly a průtahoměrem MFL 800-B. Pro upínání vzorků byly vyrobeny speciální tvarové čelisti z nástrojové oceli DIN 1.2709. Čelisti jsou vidět na fotografii z průběhu zkoušky (obrázek 4.4). Tvarové čelisti zajišťují stabilní upnutí vzorku během zkoušky. Z měření průběhu zkoušky bylo plánováno vyhodnocovat smluvní mez kluzu a pevnosti, dále Youngův modul a tažnost materiálu. [39]

4.1.3 Měření tahových vlastností

U většiny měření bohužel docházelo při začátku testu ke klouzání čelistí průtahoměru po povrchu vzorku. Prokluz čelistí během začátku zatížil měření prodloužení chybou až 50 μm . Tudíž je nevhodné analyzovat smluvní mez kluzu a Youngův modul pružnosti pro jejich velké ovlivnění i takto malou chybou na začátku zkoušky. Celková tažnost je chybou prokluzu zatížena vzhledem ke své vysoké hodnotě méně. Tažnost, s touto chybou měření, lze tedy alespoň řádově v procentech porovnávat. Pouze mez pevnosti není závislá na prodloužení vzorku a tudíž není ovlivněna chybou při měření. Fotografie z prováděné zkoušky je na obrázku 4.4



Obrázek 4.4: Fotografie z průběhu zkoušky tahem na tělese Ultrafuse 316LX zpracované u BASF

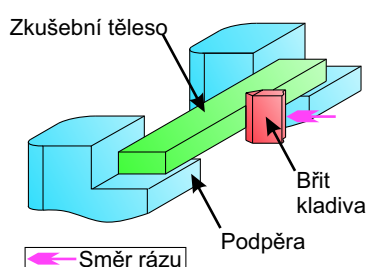
Pro možnost statistického vyhodnocení bylo testováno 5 vzorků z každé sady. Následně hodnoty měření byly průměrovány a stanoveny směrodatné odchylky. Výsledky jednotlivých měření včetně průběhů jsou uvedené v příloze A. V tabulce 4.2 jsou uvedené průměrné hodnoty z jednotlivých sad vzorků. Pro možnost porovnání s konvenčním materiálem byly vytvořeny další dvě sady vzorků z válcovaného plechu o tloušťce 2 mm. Tělesa z plechu byla vyřezána za použití laseru a vodního paprsku.

Tabulka 4.2: Výsledné měřené hodnoty tahové zkoušky

Série	Napětí na mezi pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A [%]
SLM 316L	586 ± 8	29 ± 5
SLM 316L Obrobené	655 ± 2	24 ± 2
Ultrafuse 316LX BASF	505 ± 4	73 ± 2
Ultrafuse 316LX Vibrom	499 ± 11	71 ± 6
Ultrafuse 316LX TUL	390 ± 30	32 ± 11
Plech Laser	616 ± 3	56 ± 1
Plech Voda	610 ± 5	56 ± 1

4.2 Zkouška rázem

U kovových materiálů je prováděna standardní zkouška rázem v ohybu dle normy ČSN ISO 148. Jedná se o zkoušku Charpyho kladivem na vzorcích s definovaným vrubem na protilehlé straně dopadu břitu kladiva. Výsledkem zkoušky je energie potřebná pro přeražení zkušební vzorku. Výsledná energie a topologie lomu charakterizuje zda se materiál chová křehce či houževnatě při dynamickém ději. Cílem zkoušky vzorků ze SLM 316L a Ultrafuse 316LX je zjištění, zda může dojít k inicializaci lomu v důsledku možných vad v povrchu po výrobě. Byla tedy zvolena zkouška rázem bez vrubu, kterou norma neprovádí. Pro snížení potřebné energie na přeražení byl průřez zkušebního tělesa snížen na 5×5mm. Při uváděné houževnatost materiálu 111 J/cm² by u takového vzorku měla být potřeba maximálně energie 50 J na jeho přeražení. Schéma prováděné zkoušky je na obrázku 4.5 [41]



Obrázek 4.5: Schéma procesu rázové zkoušky [40]

Při zkoušce s použitím 50 J i 450 J kladiva a vzdáleností pevných podpor 55 mm nedošlo k přeražení vzorku ani jedné série. Testovány byly pouze dva vzorky z každé série, protože nedocházelo k jejich přelomení. U všech sérií došlo k masivnímu průhybu vzorku a tím k jeho uvolnění a průletu mezi stacionárními břity Charpyho kladiva. Pro deformaci vzorků byla potřebná energie od 40–45 J. Deformované vzorky na svém povrchu nemají viditelné známky trhlin či prasklin. Lze tak usuzovat, že materiál z obou technologií je dostatečně houževnatý a povrchové nedokonalosti neinicializují praskání materiálu při rázu ani u jedné technologie. Na obrázku 4.6 je vidět masivní deformace všech těles.



Obrázek 4.6: Zkušební tělesa po rázové zkoušce

5 Hodnocení jakosti výroby

Jakost výroby lze hodnotit různými způsoby dle přání zákazníka a technických požadavků na výrobek. Mezi nejběžnější hodnocení poté patří rozměrová přesnost a spolehlivost výroby. Pro porovnání jakosti výroby u technologií byly proto zvoleny dva parametry. Jedním parametrem je zmiňovaná výrobní přesnost vůči vstupním datům. Druhým hodnoceným parametrem byla volena drsnost povrchu vzorků.

5.1 Rozměrová přesnost

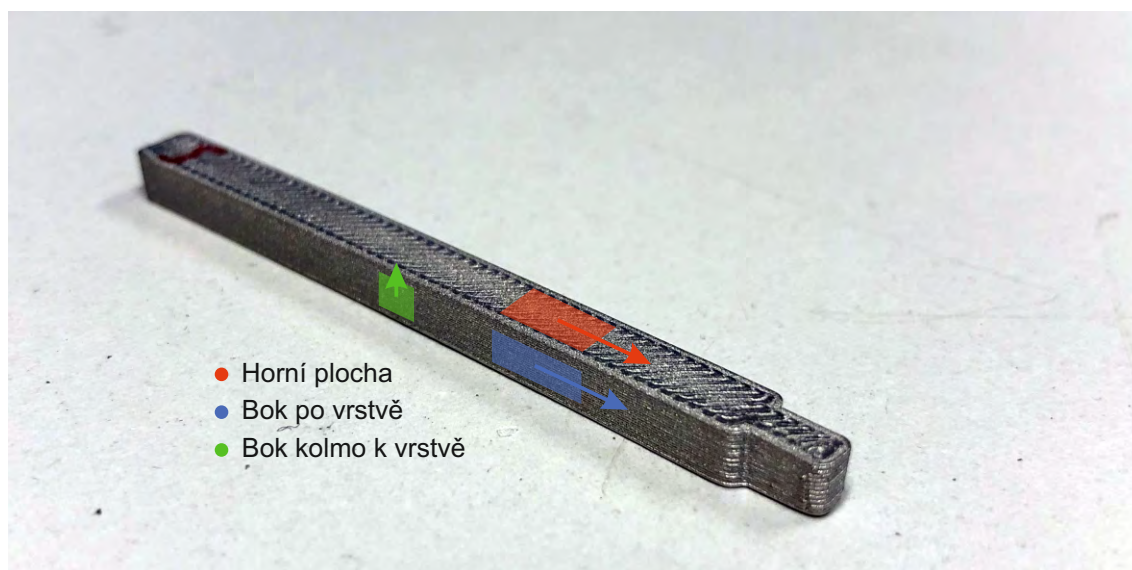
Rozměrová přesnost byla analyzována na vzorcích určených pro zkoušku tahem. Na tělesech byl měřen průřez funkční části. Funkční průřez má nominální rozměry $A=2\text{ mm}$ a $B=5\text{ mm}$. Měření probíhalo na pěti místech. Výsledné hodnoty průřezů jsou aritmetickými průměry těchto dílčích měření. Tyto hodnoty také byly zadány během měření tahových vlastností. Průměrné hodnoty jednotlivých těles jsou v tabulce 5.1. Pro možnost posoudit přesnost výroby je z měřených hodnot těles sestaven průměr a směrodatná odchylka pro danou sérii a rozměr. Při porovnávání technologií poté rozměr A představuje přesnost výroby v ose Z stroje a B v osách X a Y.

Tabulka 5.1: Měření rozměrové přesnosti průřezu tahových vzorků průměrné hodnoty šířky a tloušťky tělesa (rozměry uvedeny v mm)

Série	Rozměr	Vzorek číslo					Průměrná hodnota
		1	2	3	4	5	
SLM 316L	A	2,19	2,23	2,26	2,30	2,22	$2,24 \pm 0,04$
	B	4,98	4,96	4,94	4,96	4,96	$4,96 \pm 0,02$
SLM 316L Obrobena	A	2,00	2,00	2,00	2,01	2,01	$2,00 \pm 0,01$
	B	5,02	5,05	5,05	5,05	5,05	$5,04 \pm 0,02$
Ultrafuse 316LX BASF	A	2,02	2,03	2,00	2,00	1,98	$2,01 \pm 0,02$
	B	5,03	5,03	5,06	5,04	5,02	$5,04 \pm 0,02$
Ultrafuse 316LX Vibrom	A	2,03	2,05	2,06	2,12	2,04	$2,06 \pm 0,04$
	B	5,11	5,05	5,1	5,09	5,09	$5,09 \pm 0,03$
Ultrafuse 316LX TUL	A	2,06	1,98	2,04	2,00	1,85	$1,99 \pm 0,08$
	B	5,05	4,98	4,97	4,94	4,98	$4,98 \pm 0,04$

5.2 Drsnost povrchu

Měření drsnosti bylo provedeno na vzorcích pro zkoušku rázem a to celkem ve třech směrech. Směry měření jsou znázorněny na obrázku 5.1. Měření bylo provedeno drsnoměrem MarSurf PS1 (Mahr GmbH). Dráha měření byla 5,6 mm v případě horní plochy a boku po vrstvách. V případě měření boku kolmo na vrstvy bylo měřeno pouze na délce 1,75 mm pro nízkou výšku vzorku. Měření bylo provedeno vždy pouze jednou a v každém směru na jednom náhodně vybraném tělese. Měření neslouží ke stanovení přesné hodnoty drsnosti povrchů vyráběných danou technologií. Měření pouze objektivně posuzuje kvalitu povrchů testovacích těles vůči sobě. U aditivních technologií má vždy na kvalitu povrchu značný vliv geometrie výrobku a jeho orientace při tisku. Naměřené hodnoty drsnosti jsou uvedené v tabulce 5.2



Obrázek 5.1: Zobrazení měřených ploch a směrů měření drsnosti povrchu na zkušebním tělese

Tabulka 5.2: Drsnost povrchu testovacího tělesa Ra a Rz (drsnost uvedena v μm)

Série	Horní plocha		Bok po vrstvě		Bok kolmo k vrstvě	
	Ra	Rz	Ra	Rz	Ra	Rz
SLM 316L	10,87	68,5	6,79	34,2	6,30	26,1
SLM 316L Obrobené	0,30	1,9	0,35	2,3	0,19	1,1
Ultrafuse 316LX BASF	4,98	32,3	3,04	18,4	9,64	40,8
Ultrafuse 316LX Vibrom	6,52	50,4	4,05	24,4	9,29	45,6
Ultrafuse 316LX TUL	9,88	51,1	2,61	16,9	9,30	43,3

6 Hodnocení technologií

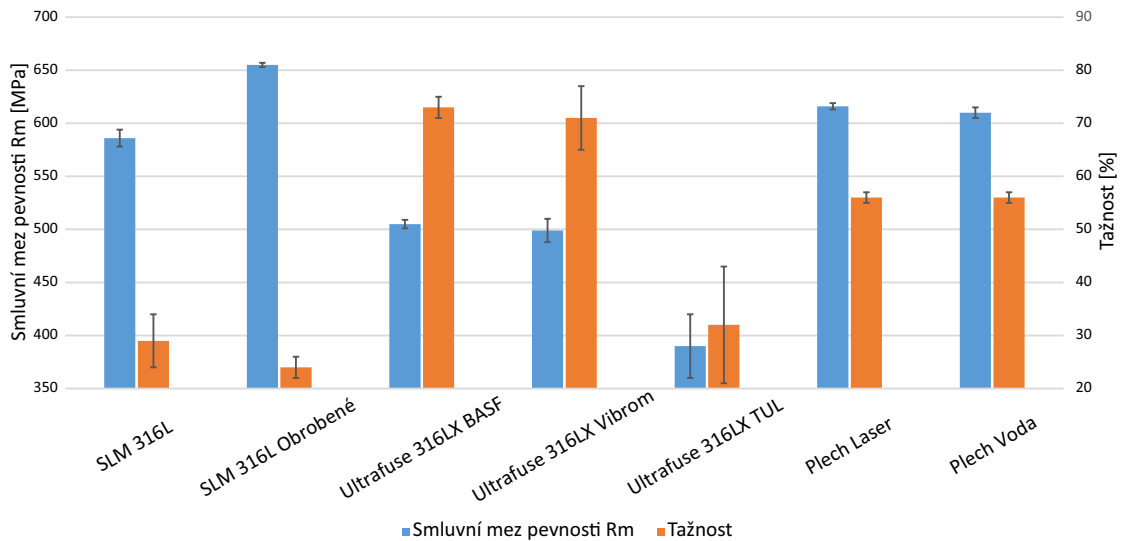
Výrobní technologie lze hodnotit a porovnávat za použití různorodých srovnávacích kritérií. Porovnávací kritéria lze rozdělit do dvou hlavních skupin. První skupinou jsou kritéria technicky měřitelná. Tato hodnotící kritéria lze považovat za objektivní. Druhou skupinou jsou kritéria neměřitelná, hodnocená uživatelem. Hodnocená kritéria jsou subjektivní a zatížená zkušeností a preferencemi uživatele (hodnotitele). Pro srovnání technologií SLM a FFF tisku kovů byly vybrány celkem tři oblasti hodnocení.

- Kvalita výrobků
 - Mechanické vlastnosti
 - Rozměrová přesnost
 - Povrchová jakost
- Uživatelská náročnost
- Finanční a časová náročnost procesu

6.1 Kvalita výroby

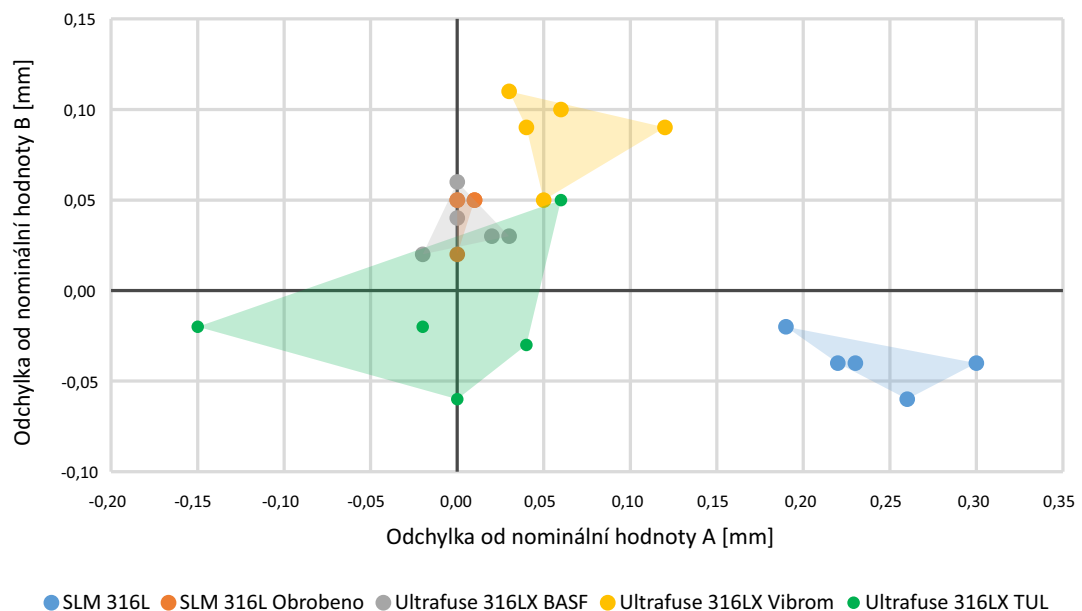
Jako hodnotící kritéria kvality výroby byly vybrány mechanické vlastnosti, rozměrová přesnost a jakost povrchu. Díky měření těchto vlastností je srovnání objektivní. Způsob stanovení hodnocených vlastností je v kapitolách 4 a 5. Porovnání měřených hodnot je provedeno graficky, za použití sloupcových grafů u hodnot vlastností v tahu (Obrázek 6.1) a drsnost povrchu (Obrázek 6.3). Pro lepší znázornění rozměrového rozptylu výroby jednotlivých technologií je vytvořeno grafické znázornění odchylek rozměrů měřených vzorků na obrázku 6.2.

Bohužel ani jeden z materiálů nesplnil výrobcem předkládané hodnoty tahových vlastností ihned po výrobě. Jediná sada obrobených vzorků z technologie SLM překročila deklarovanou pevnost 620 MPa o 35 MPa. Ostatní vzorky bez dalšího opracování nebyly schopny se ani přiblížit pevnostním hodnotám, uváděných výrobcí. Mezi technologií SLM a FFF tisku kovu je značný rozdíl ve výsledné tažnosti materiálu. Vzorky vyráběné v laboratoři na TUL, dosáhly nejnižší pevnosti. Tento rozdíl oproti deklarovaným hodnotám může být způsoben nevhodnou atmosférou při sintraci vzorků.



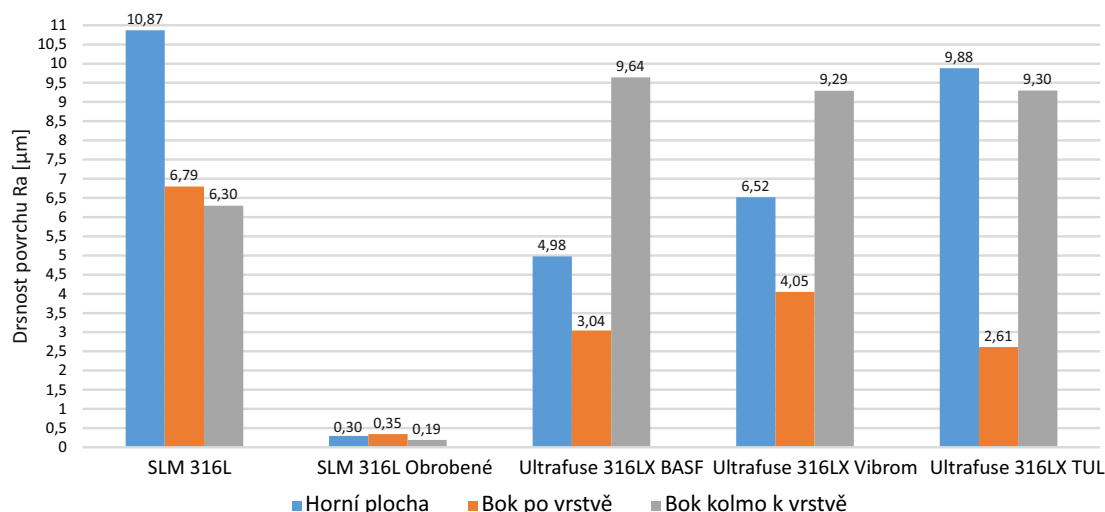
Obrázek 6.1: Odchyly měřených těles od nominálních hodnot

V rozměrové přesnosti výroby vzorků již nejsou značné rozdíly. Vzorky vyráběné oběma technologiemi dosahují přesnost výroby $\pm 0,2$ mm. Tato hodnota je standardně udávanou přesností výroby u většiny FFF tiskáren. Nejmenší odchyly od nominálních hodnot vykazovaly vzorky finálně zpracovávané u společnosti BASF z materiálu Ultrafuse 316LX. Odchylna v měřených rozměrech byla maximálně $\pm 0,05$ mm. Pro případné doobrobení na přesný rozměr vycházejí nejlépe vzorky zpracované u společnosti Vibrom. U těchto vzorků není žádný rozměr nižší nežli nominální, jsou tedy bez komplikací doobrobitelné na požadovaný rozměr.



Obrázek 6.2: Odchyly měřených těles od nominálních hodnot

Jakost a struktura povrchu dílů je u testovaných technologií značně rozdílná. Díly z technologie SLM jsou velice hrubé. Na svém horním povrchu dosahují nejvyšší drsnosti ze všech vzorků (R_a 10,87 μm). U technologie FFF je drsnost podstatně nižší a to v rozmezí od R_a 4,98 μm (vzorky BASF) do R_a 9,88 μm (vzorky dokončené v laboratoři na TUL). Drsnost vzorků z Ultrafuse 316LX je tedy závislá nejen na vlastním tisku, ale i dalších procesech následného zpracování. Na stěnách kolmých na vrstvu je drsnost u technologie SLM shodná ve všech směrech. U vzorků z Ultrafuse 316LX se značně do drsnosti promítá orientace vrstev, kde dochází k nárůstu drsnosti povrchu.



Obrázek 6.3: Odchytky měřených těles od nominálních hodnot

6.2 Uživatelská náročnost

Uživatelská náročnost výroby je obtížně hodnotitelné kritérium. Technologie SLM a FFF tisk kovu jsou dva odlišné, tudíž nesnadno porovnatelné procesy. Proces FFF tisk kovu z materiálu Ultrafuse 316LX je také možné zhotovit dvěma odlišnými způsoby. Procesy nemají téměř žádné společné činnosti či operace. Jedinou výjimku tvoří příprava tiskových dat, která je na srovnatelné náročnosti, i když se v obou případech používá rozdílný software. V obou případech je nutné provádět orientaci výrobku, vytvářet podpůrné struktury a další nezbytné kroky. Jedná se tak o operaci, která je u obou technologií srovnatelně náročná. Následné operace procesu jsou však zcela rozdílné.

SLM proces netrpí výraznou změnou rozměrů výrobku vůči vstupnímu modelu. Výsledný tvar výrobku je tedy přesný, ale velké objemné díly mohou podléhat teplotním deformacím či praskání povrchu. U FFF s Ultrafuse 316LX dochází k poměrně významné změně v rozměru výsledného výrobku od předlohy kvůli smrštění při sintračním procesu. Toto smrštění je možné u jednoduchých tvarů snadno predikovat. Odhad je 16 % v ose X;Y a 20 % v ose Z. U složitějších geometrií může však docházet k jiným nežádoucím deformacím. V některých případech tak může

dosažení žádaného tvaru a rozměru dílu představovat dlouhý a náročný proces. Pro porovnání na obrázku 6.4 je těleso z Ultrafuse 316LX po tisku (Zelený díl) a po sintraci (Hotový výrobek).



Obrázek 6.4: Tahové těleso tištěné z Ultrafuse 316LX, po tisku a po sintraci

SLM280HL vyžaduje před tiskem značnou přípravu materiálu a tiskárny. K těmto operacím je třeba mít speciálně proškolenou obsluhu. Oproti tomu FFF tiskárny vyžadují minimum přípravy před tiskem. Samotný proces tisku u FFF tiskáren může být však nestabilní a v některých případech značně zmetkovitý. U procesu SLM je proces stabilní a pravděpodobnost jeho selhání v průběhu výroby je mizivá.

SLM proces dále nevyžaduje komplexní dokončovací proces. Výsledkem SLM tisku je přímo kovový výrobek, na rozdíl od FFF tisku kovu. Zde se také přístup u Ultrafuse 316LX rozděluje. Zpracování vytištěných dílů je možné provádět zasláním výtisků na zpracování do společnosti BASF. Při zasílání na zpracování je tak celý proces na straně uživatele velice jednoduchý a nenáročný. Pokud však dochází ke zpracování uživatelem na místě, je proces zpracování náročnější a komplexnější nežli samotný tisk.

Z pohledu náročnosti na obsluhu technologií je tedy u procesů mnoho variant provedení. Nelze tak jednoznačně určit který proces je náročnější. Při zasílání Ultrafuse 316LX na zpracování do firmy BASF je proces extrémně jednoduchý a je možné jej provádět i v domácích podmínkách. Pokud jde ovšem o proces kompletní výroby kovového dílu, tak jednoduchost SLM procesu vítězí nad komplexním několikastupňovým zpracováním Ultrafuse 316LX.

6.3 Finanční a časová náročnost procesu

Pro porovnání finanční a časové náročnosti výroby byl zvolen výrobek krychle o rozměrech $20 \times 20 \times 20$ mm. Cenová a časová kalkulace byla provedena na třech sadách o počtu kusů 1, 10 a 50. Do ceny jsou započítány pouze přímé náklady na výrobu. Ostatní náklady na provoz do ceny výroby započítány nejsou. Pro SLM jsou přímým nákladem tedy pouze použitý prášek a tisková platforma. Pro Ultrafuse 316LX jsou tyto náklady materiál a náklady spojené se zpracováním výtisků ve společnosti BASF. Porovnání nákladů a časů na výrobu jsou uvedeny v tabulce 6.1. Pro

technologie FFF je nutné připočítat potřebný čas na proces u společnosti BASF. Do-
ba zpracování a doručení zpět činí cca 10 dní. Ostatní provozní a pořizovací náklady
nezapočítané v ceně dílu na technologii SLM jsou uvedené v tabulce 6.2 a na provoz
technologie FFF v tabulce 6.3.

Proces FFF je z hlediska přímých nákladů na tisk dvakrát dražší nežli proces
SLM. SLM proces je násobně dražší na pořízení a provoz stroje. Nejvyšší náklad na
provoz SLM je potřebný roční servis a roční poplatek za software Magics s podporou
SLM. Pořízení a provoz FFF tiskárny je ve srovnání se SLM finančně nenáročný.
FFF technologie na svou nízkou vstupní investici doplácí vysokou cenou plněného
materiálu a cenou náročného dokončovacího procesu.

Tabulka 6.1: Cenová kalkulace přímých nákladů na výrobu a vypočtený čas na tisk

Počet kusů	SLM		FFF	
	Cena	Čas	Cena	Čas
1	19 €	6h 40min	49 €	4h 40min
10	56 €	13h 30min	128 €	46h 10min
50	220 €	52h 10min	551 €	230h 55min

Tabulka 6.2: Provozní náklady SLM

Název	Popis	Cena
Filtr atmosféry	Filtrační vložka pro okruh atmosféry	200 €
Silikovová lišta	Lišta pro roznašecí vozík.	90 €
Provozní plyny	Argon v tlakových lahvích a stlačený vzduch.	N/A
Čištění	Čistící prostředky	N/A
Servis	Roční servisní prohlídka	6 460 €
Magics	Roční licence softwaru Magics	10 000 €
Stroj	Kupní cena SLM 280HL s příslušenstvím	590 000 €

Tabulka 6.3: Provozní náklady FFF

Název	Popis	Cena
Tisková hlava	Sestava celé tiskové hlavy	115 €
Tryska	Tisková ocelová tryska	25 €
Tisková fólie	Podkladová fólie	9 €
Čištění	Čistící prostředky	N/A
Simplify3D	Doživotní licence software Simplify3D	150 €
Stroj	Kupní cena Felix Tec4	1 500 €

7 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo ověření proveditelnosti výroby kovových dílů za použití technologie FFF s kovem plněným materiálem BASF Ultrafuse 316LX. Proces začíná 3D tiskem modelu z materiálu Ultrafuse 316LX s obsahem cca 80 % ocelového prášku. I přes toto množství kovového plniva je materiál velice snadno zpracovatelný a nechová se příliš odlišně od technických termoplastů použitých u této technologie. Pouze je nutné použití tiskárny s možností definování vlastních parametrů tisku. Proces zpracování materiálu Ultrafuse 316LX po tisku je již náročnější a vyžaduje komplexní postupový proces pro dosažení kovového dílu. Proces tedy vyžaduje značné technické zázemí pro dokončení výrobku po tisku. Proces je podrobně popsán v kapitole 2 BASF Ultrafuse 316LX.

I přes omezené možnosti laboratoře se však proces dokončení podařilo relativně úspěšně provést. Druhou možností dokončování je zaslání výtisků z materiálu Ultrafuse 316LX na zpracování do společnosti BASF. Společnost BASF tuto službu nabízí za cca 40 Eur na kilogram výtisku. Tato možnost se během zpracování ukázala jako velice výhodná. Zpracováním v laboratoři nebylo dosaženo shodných výsledků mechanických vlastností jako u dílu zpracovaných v BASF. I přes nedosažení shodných hodnot se zpracování v laboratoři dá považovat za úspěch a při další investici do procesu (např procesní plyny) je možné dosáhnout zlepšení výsledků.

Dalšími cíli práce bylo porovnání nové techniky kovového tisku FFF s technologií SLM. Technologie SLM je na TUL i na průmyslovém trhu již řadu let používanou technologií pro aditivní zpracování kovových prášku. Z tohoto důvodu bylo porovnání technologií zásadní pro rozhodnutí dalšího směru kovového 3D tisku v laboratoři TUL.

K porovnání technologií byly zvoleny vybrané vlastnosti výrobků (vzorků) a náročnost technologií. Mezi tyto vlastnosti patří mechanické vlastnosti v tahu, drsnost povrchu, rozměrová přesnost. Pro účely porovnání technologií byly vyrobeny sady vzorků z obou technologií. Vytisknuté vzorky z Ultrafuse 316LX byly rozděleny pro různé dokončovací zpracování. První část vzorků byla zaslána na dokončovací operace do společnosti BASF v Německu. Díky tomu byly získány referenční hodnoty, pro další vzorky. Další vzorky byly zaslány na zpracování do české společnosti Vibrom s.r.o. Společnost Vibrom se jako jediná v ČR zabývá technologií MIM, a je tedy schopna vzorky relevantně zpracovat. Poslední sada Ultrafuse 316LX vzorků byly zpracovány v laboratorních podmínkách na TUL.

V oblasti mechanických vlastností je technologie SLM nepřekonatelná se svou výslednou pevností tištěných vzorků cca 580MPa. Ultrafuse 316LX se však blíží s pevností cca 500 MPa a překonává SLM v tažnosti, kde dosahuje SLM cca 30 % a UL-

trafuse 316LX až 70 %. Tyto rozdíly jsou způsobeny rozdílným působením tepla na vzorky během výrobního procesu.

Rozměrová přesnost výroby je u obou technologií srovnatelná. U technologie SLM mohou nastat deformace a prohýbání až praskání dílů a to v důsledku vnitřního pnutí vznikajícího během procesu. Na druhou stranu materiál Ultrafuse 316LX během procesu dokončování prochází sintračním procesem, kde dochází ke značnému smrštění výrobku cca o 16-20 % z původní velikosti dílu. U obou technologií tak vznikají geometrické deformace (změny) výrobků. Tyto změny ovšem nebrání dosáhnout vysoké opakovatelnosti a rozměrové stability výrobků.

Z pohledu kvality povrchu již technologie srovnatelné nejsou. I přes vyšší výšku tiskových vrstev dosahuje Ultrafuse 316LX mnohem vyšší kvality povrchu nežli SLM. U SLM dosahuje drsnost povrchu Ra 6,3 μm až 10,9 μm . U materiálu Ultrafuse 316LX je drsnost povrchu 3,0 μm až 9,6 μm . Drsnost povrchu je značně ovlivněna směrem vrstev na výrobku. Kvalita povrchu je tak ovlivněna orientací dílu při tisku. Povrchová kvalita dílů je však snadno řešitelná dalšími operacemi. Jednou z nich může být obrábění či omílání pro zlepšení jakosti povrchu.

Posledním srovnáním je náročnost technologií. Porovnána byla náročnost na provedení výroby i finanční náročnost na provoz zařízení (technologií). Náročnost procesů je subjektivní, ale SLM proces je celkově méně náročný na obsluhu. Již jen z důvodu provádění výroby na jednom stroji. Proces zpracování Ultrafuse 316LX je postupový, komplexní a je tak náchylnější k chybám a poškození výrobků v průběhu zpracování. Finančně je pořízení procesu SLM několikanásobně nákladnější nežli FFF. Náklady na udržení zařízení SLM v provozu také převyšují FFF. Ovšem FFF technologie má násobně dražší vstupní materiál. Přímé porovnání nákladnosti procesu je uvedeno v kapitole 6 Hodnocení technologií v části 6.3 Finanční a časová náročnost procesu.

Tato diplomová práce se zabývala materiálem Ultrafuse 316LX od společnosti BASF. Bylo by přínosné se dále věnovat i materiálům od jiných výrobců například The Virtual Foundry, Inc. Tyto materiály mohou mít odlišný postup dokončovacího zpracování, které mohou vést k rozdílným výsledkům. Dalšími systémy, které nebyly zatím testovány jsou kompletně dodávaná řešení tisku kovů pomocí FFF od společností Markforged, Inc. a Desktop Metal, Inc. Zde je celý proces zpracování prováděn na jednoúčelových zařízeních přímo od výrobce. U obou tiskových řešení je možný potenciál na snížení ceny procesu a zjednodušení jeho náročnosti.

V rámci řešení této diplomové práce byla navázána spolupráce s dodavatelem zařízení Markforget, Inc. pro Českou republiku, který projevil zájem o prohloubení znalostí nabízených materiálů ve spolupráci s TUL.

Použitá literatura

- [1] WOHLERS, Terry; GORNET, Tim. History of additive manufacturing. *Wohlers report*. 2014, roč. 24, č. 2014, s. 118.
- [2] BÁRTOLO, Paulo Jorge; GIBSON, Ian. History of stereolithographic processes. In: *Stereolithography*. Springer, 2011, s. 37–56.
- [3] GIBSON, Ian; ROSEN, David W; STUCKER, Brent et al. *Additive manufacturing technologies*. Springer, 2014.
- [4] IAN GIBSON David Rosen, Brent Stucker. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer, 2015. ISBN: 9781493921126.
- [5] CHUA, Chee Kai; LEONG, Kah Fai; LIM, Chu Sing. *Rapid prototyping: principles and applications (with companion CD-ROM)*. World Scientific Publishing Company, 2010.
- [6] IANCU, Cătălin. ABOUT 3MF FILE FORMAT FOR 3D PRINTING. *Fiability & Durability/Fiabilitate si Durabilitate*. 2019, č. 1.
- [7] FRAZIER, William E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2014, roč. 23, č. 6, s. 1917–1928.
- [8] LEWANDOWSKI, John J; SEIFI, Mohsen. Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties. *Annual Review of Materials Research*. 2016, roč. 46, s. 151–186.
- [9] KRUTH, Jean-Pierre; FROYEN, Ludo; VAN VAERENBERGH, Jonas; MERCELIS, Peter; ROMBOUTS, Marleen; LAUWERS, Bert. Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of materials processing technology*. 2004, roč. 149, č. 1-3, s. 616–622.
- [10] YAP, Chor Yen; CHUA, Chee Kai; DONG, Zhi Li; LIU, Zhong Hong; ZHANG, Dan Qing; LOH, Loong Ee; SING, Swee Leong. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews*. 2015, roč. 2, č. 4, s. 041101.
- [11] GRIFFITH, ML; KEICHER, DM; ATWOOD, Clint L. *Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS {trademark})*. 1996. Technická zpráva. Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States).

- [12] ATWOOD, Clint; GRIFFITH, Michelle; HARWELL, Lane; SCHLIENGER, Eric; ENSZ, Mark; SMUGERESKY, John; ROMERO, Tony; GREENE, Don; RECKAWAY, Daryl. Laser engineered net shaping (LENS™): A tool for direct fabrication of metal parts. In: *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. 1998, sv. 1998, E1–E7. Č. 1.
- [13] *LASERTEC 65 3D hybrid*. 14.03.2020. Dostupné také z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/aditivni-vyroba/praskova-tryska/lasertec-65-3d-hybrid>. Online.
- [14] *Ultrafuse 316L 3D Printer Metal Filament: BASF Forward AM*. 6.02.2020. Dostupné také z: <https://www.forward-am.net/find-material/filaments/ultrafuse-316l/>. Online.
- [15] *Markforged Metal X*. 2.03.2020. Dostupné také z: <https://3dwiser.com/3d-tiskarny/3d-tisk-kovu/markforged-metal-x/>. Online.
- [16] METAL, Desktop. *Studio System™*. 2.03.2020. Dostupné také z: <https://www.desktopmetal.com/products/studio>. Online.
- [17] SCHMIDT, Bradley. *Markforged Releases 17-4 PH Stainless Steel Material Datasheet*. Rapid 3D, 20.04.2020. Dostupné také z: <https://www.rapid3d.co.za/markforged-releases-17-4-ph-stainless-steel-material-datasheet/>. Online.
- [18] *The Virtual Foundry: Complete 3D Printing Materials*. 6.02.2020. Dostupné také z: <https://www.thevirtualfoundry.com/>. Online.
- [19] THOMPSON, Yvonne; GONZALEZ-GUTIERREZ, Joamin; KUKLA, Christian; FELFER, Peter. Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel. *Additive Manufacturing*. 2019, roč. 30, s. 100861.
- [20] CHANG, Isaac; ZHAO, Yuyuan. *Advances in powder metallurgy: properties, processing and applications*. Elsevier, 2013.
- [21] HEANEY, Donald F. *Handbook of metal injection molding*. Woodhead Publishing, 2012.
- [22] STRATASYS. *Materials for FDM process* [<http://www.stratasys.com/materials/search?sortIndex=0>]. 6.02.2020. Online.
- [23] FELIXPRINTERS. *Felix Tec4* [<https://www.felixprinters.com/shop/landing/index/view/felix-tec-series>]. 8.02.2020. Online.
- [24] MAJEWSKA-GLABUS, I; ZHUANG, L; VETTER, R; DUSZCZYK, J. Thermal debinding of Fe 3 Al-X metal powder compacts. *Journal of materials science*. 1995, roč. 30, č. 24, s. 6209–6217.
- [25] OMAR, MA; IBRAHIM, R; SIDIK, MI; MUSTAPHA, M; MOHAMAD, M. Rapid debinding of 316L stainless steel injection moulded component. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, roč. 140, č. 1-3, s. 397–400.
- [26] LI, D.-X; HUANG, B.-Y; QU, Xuanhui; LI, Y.-M; LIN, Jianliang; FENG, Y.-L. Catalytic debinding of metal injection molding. 2002, roč. 9, s. 256–258.

- [27] GONG, Haijun; CRATER, Cameron; ORDONEZ, Ana; WARD, Craig; WALLER, Madison; GINN, Charles. Material Properties and Shrinkage of 3D Printing Parts using Ultrafuse Stainless Steel 316LX Filament. In: *MATEC Web of Conferences*. 2018, sv. 249, s. 01001.
- [28] OLAKANMI, Eytayo Olatunde; COCHRANE, RF; DALGARNO, KW. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*. 2015, roč. 74, s. 401–477.
- [29] SEABRA, Miguel; AZEVEDO, José; ARAÚJO, Aurélio; REIS, Luís; PINTO, Elodie; ALVES, Nuno; SANTOS, Rui; MORTÁGUA, João Pedro. Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace components. *Procedia Structural Integrity*. 2016, roč. 1, s. 289–296.
- [30] XIAO, Zefeng; YANG, Yongqiang; XIAO, Ran; BAI, Yuchao; SONG, Changhui; WANG, Di. Evaluation of topology-optimized lattice structures manufactured via selective laser melting. *Materials & Design*. 2018, roč. 143, s. 27–37.
- [31] KRUTH, Jean-Pierre; DECKERS, Jan; YASA, Evren; WAUTHLÉ, Ruben. Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2012, roč. 226, č. 6, s. 980–991.
- [32] MAAMOUN, Ahmed H; XUE, Yi F; ELBESTAWI, Mohamed A; VELDHUIS, Stephen C. Effect of selective laser melting process parameters on the quality of al alloy parts: Powder characterization, density, surface roughness, and dimensional accuracy. *Materials*. 2018, roč. 11, č. 12, s. 2343.
- [33] SPIERINGS, Adriaan B; VOEGTLIN, Mark; BAUER, T; WEGENER, Konrad. Powder flowability characterisation methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*. 2016, roč. 1, č. 1-2, s. 9–20.
- [34] *SLM® Metal Powder*. 20.01.2020. Dostupné také z: <https://www.slm-solutions.com/en/products/accessories-consumables/slmr-metal-powder/>. Online.
- [35] GALY, Cassiopée; LE GUEN, Emilie; LACOSTE, Eric; ARVIEU, Corinne. Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences. *Additive Manufacturing*. 2018, roč. 22, s. 165–175.
- [36] REZAYAT, Hassan; ZHOU, W; SIRIRUK, Akawut; PENUMADU, D; BABU, SS. Structure--mechanical property relationship in fused deposition modelling. *Materials Science and Technology*. 2015, roč. 31, č. 8, s. 895–903.
- [37] ES-SAID, OS; FOYOS, J; NOORANI, R; MENDELSON, Mel; MARLOTH, R; PREGGER, BA. Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Materials and Manufacturing Processes*. 2000, roč. 15, č. 1, s. 107–122.

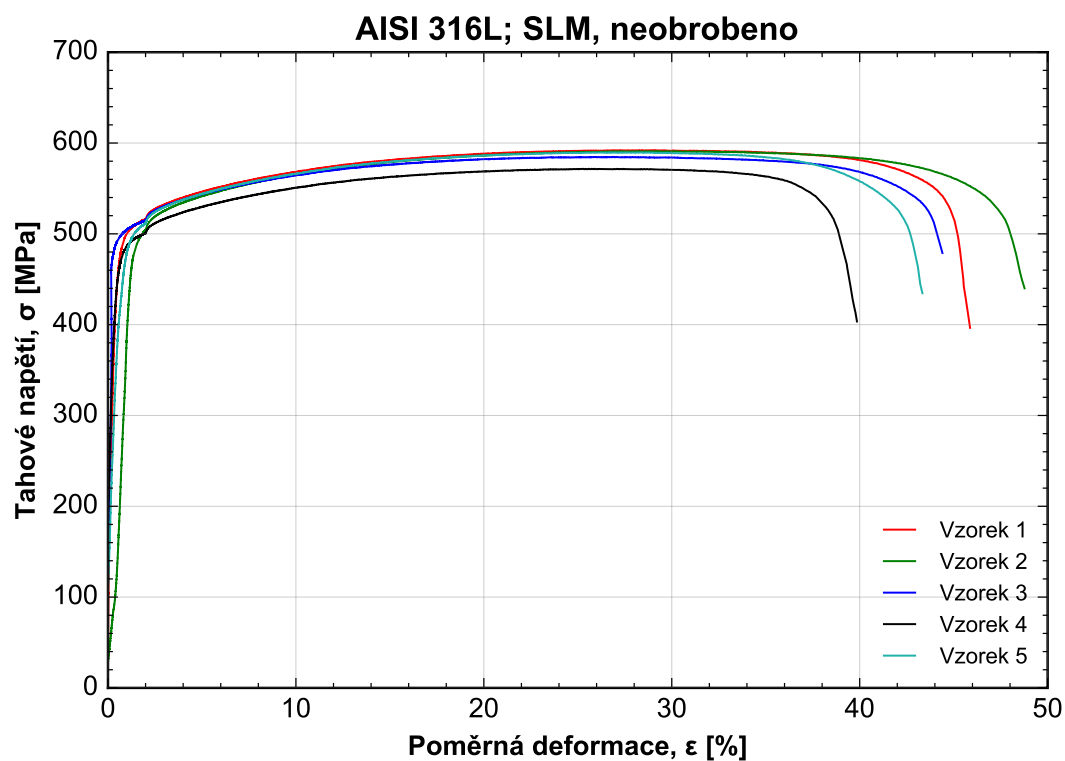
- [38] ISO. ISO 527, Plasty - Stanovení tahových vlastností. 2012.
- [39] ČSN. ČSN EN ISO 6892, Kovové materiály - Zkoušení tahem. 2011.
- [40] MACHÁČEK, Jakub. *Stanovení základních mechanických vlastností odlehčených dílů z technologie FFF*. 2017. Bakalářská práce, Technická univerzita v Liberci.
- [41] ČSN. ČSN ISO 148, Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy. 2017.

Přílohy

A Měření tahových vlastností

68

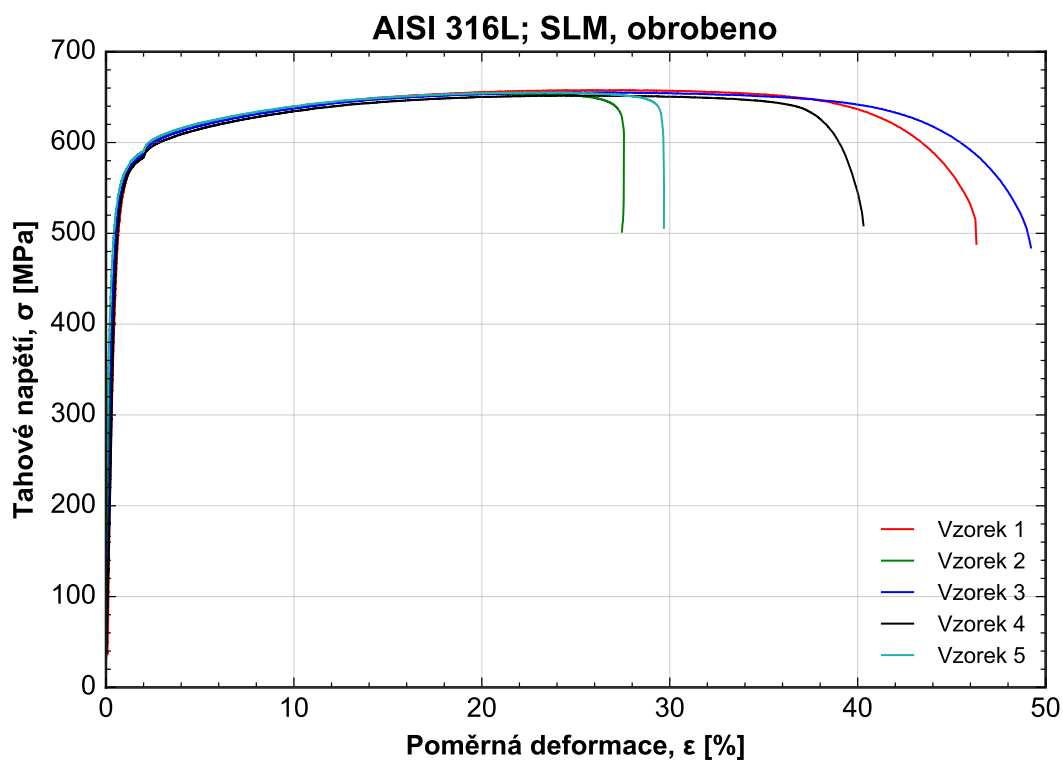
A Měření tahových vlastností



Obrázek A.1: Průběh napětí v závislosti na poměrném prodloužení neobrobených vzorků vyráběných technologií SLM

Tabulka A.1: Naměřené hodnoty neobrobených vzorků vyráběných technologií SLM

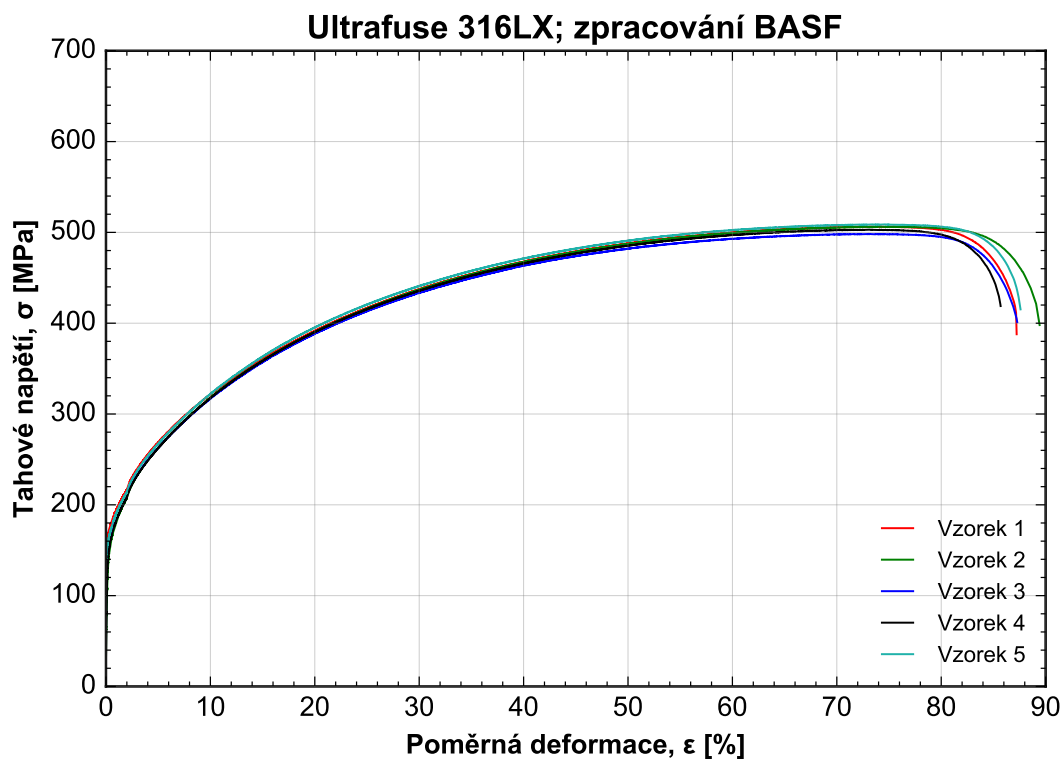
Č. vzorku	A [mm]	B [mm]	R _m [MPa]	A [%]
1	2,19	4,98	592,18	27,43
2	2,23	4,96	591,14	26,23
3	2,26	4,94	584,87	26,28
4	2,30	4,96	571,75	26,17
5	2,22	4,96	589,90	36,87



Obrázek A.2: Průběh napětí v závislosti na poměrném prodloužení obrobených vzorků vyráběných technologií SLM

Tabulka A.2: Naměřené hodnoty obrobených vzorků vyráběných technologií SLM

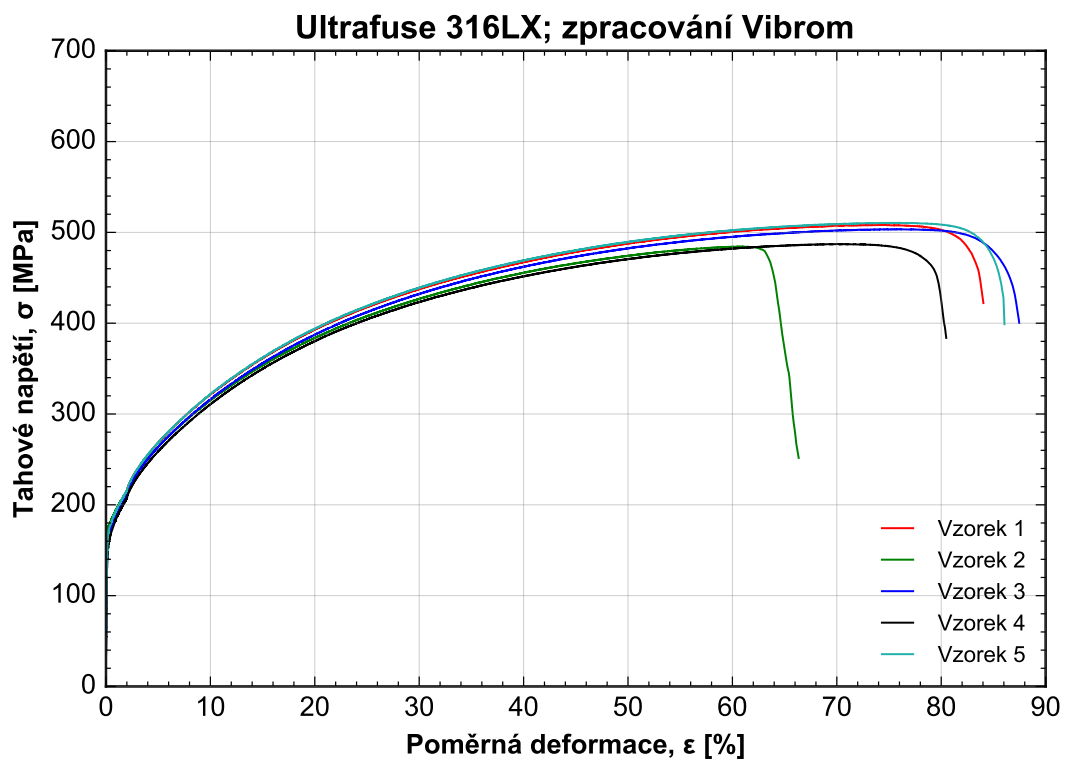
Č. vzorku	A [mm]	B [mm]	Rm [MPa]	A [%]
1	2,00	5,02	658,02	26,01
2	2,00	5,05	654,11	21,28
3	2,00	5,05	655,52	24,14
4	2,01	5,05	652,11	23,86
5	2,01	5,05	655,37	23,32



Obrázek A.3: Průběh napětí v závislosti na poměrném prodloužení vzorků z materiálu Ultrafuse 316LX zpracovaných ve společnosti BASF

Tabulka A.3: Naměřené hodnoty vzorků z materiálu Ultrafuse 316LX zpracovaných ve společnosti BASF

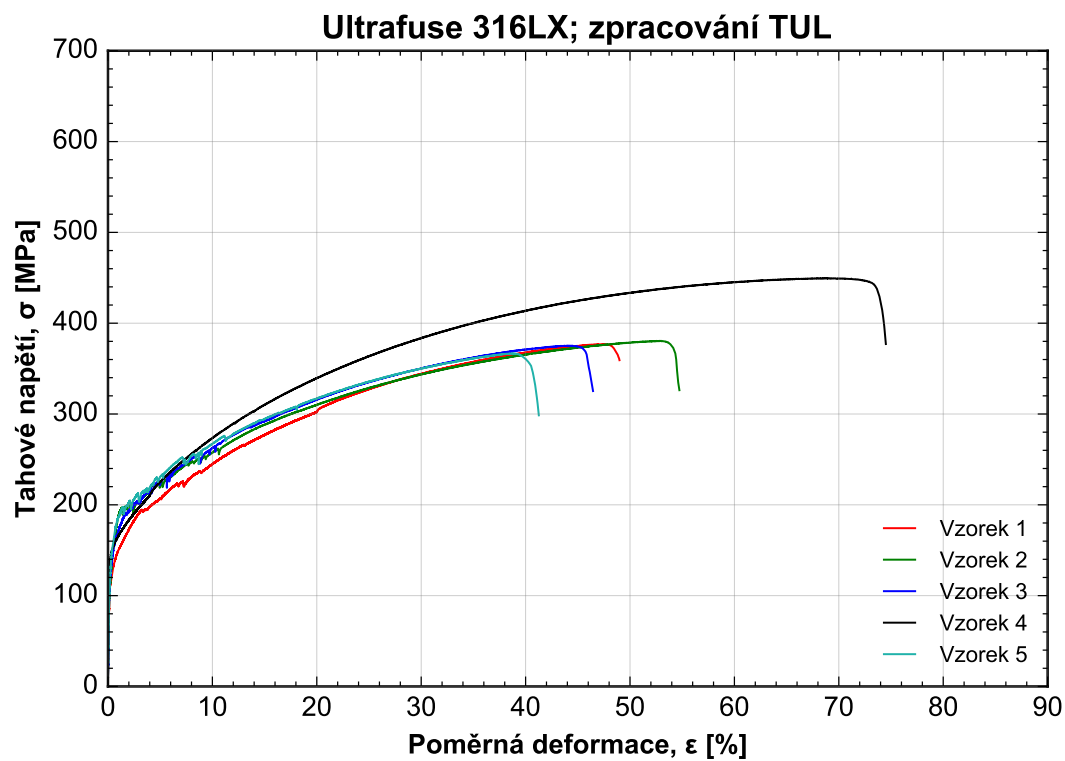
Č. vzorku	A [mm]	B [mm]	Rm [MPa]	A [%]
1	2,02	5,03	506,49	75,11
2	2,03	5,03	506,43	73,48
3	2,00	5,06	498,42	72,85
4	2,00	5,04	503,09	71,97
5	1,98	5,02	508,85	73,91



Obrázek A.4: Průběh napětí v závislosti na poměrném prodloužení vzorků z materiálu Ultrafuse 316LX zpracovaných ve společnosti Vibrom

Tabulka A.4: Naměřené hodnoty vzorků z materiálu Ultrafuse 316LX zpracovaných ve společnosti Vibrom

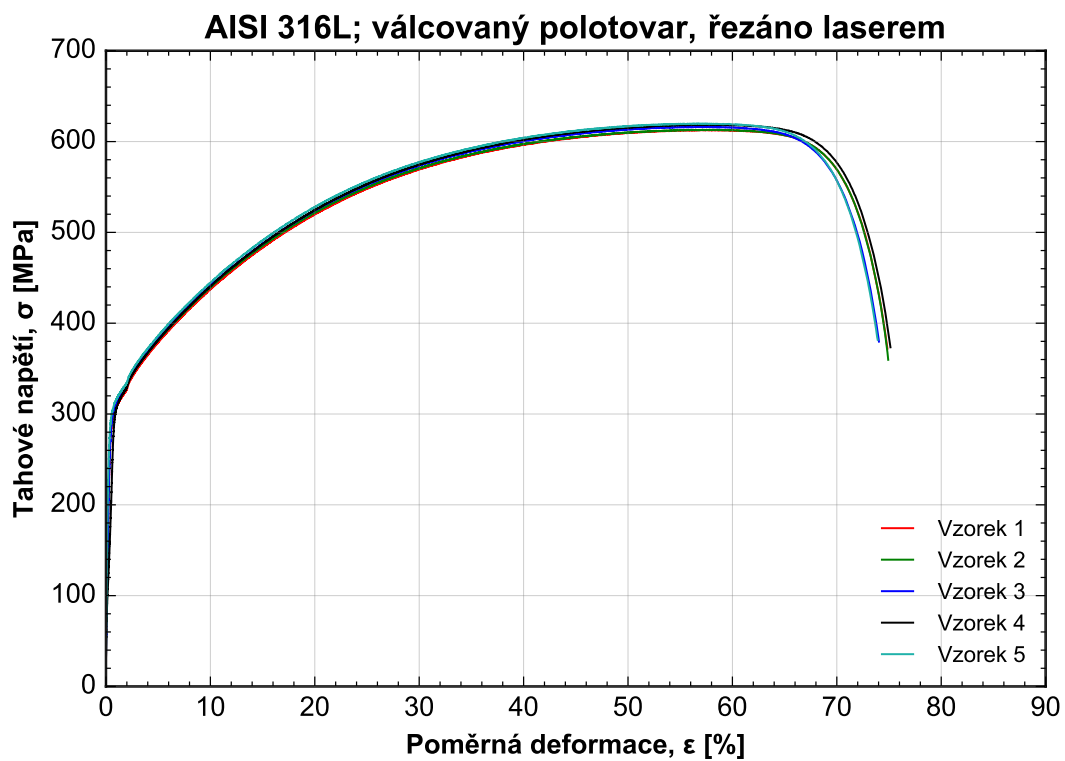
Č. vzorku	A [mm]	B [mm]	Rm [MPa]	A [%]
1	2,03	5,11	508,35	74,54
2	2,05	5,05	484,67	60,25
3	2,06	5,10	503,66	75,60
4	2,12	5,09	487,30	70,39
5	2,04	5,09	510,67	74,90



Obrázek A.5: Průběh napětí v závislosti na poměrném prodloužení vzorků z materiálu Ultrafuse 316LX zpracovaných v laboratoři na TUL

Tabulka A.5: Naměřené hodnoty vzorků z materiálu Ultrafuse 316LX zpracovaných v laboratoři na TUL

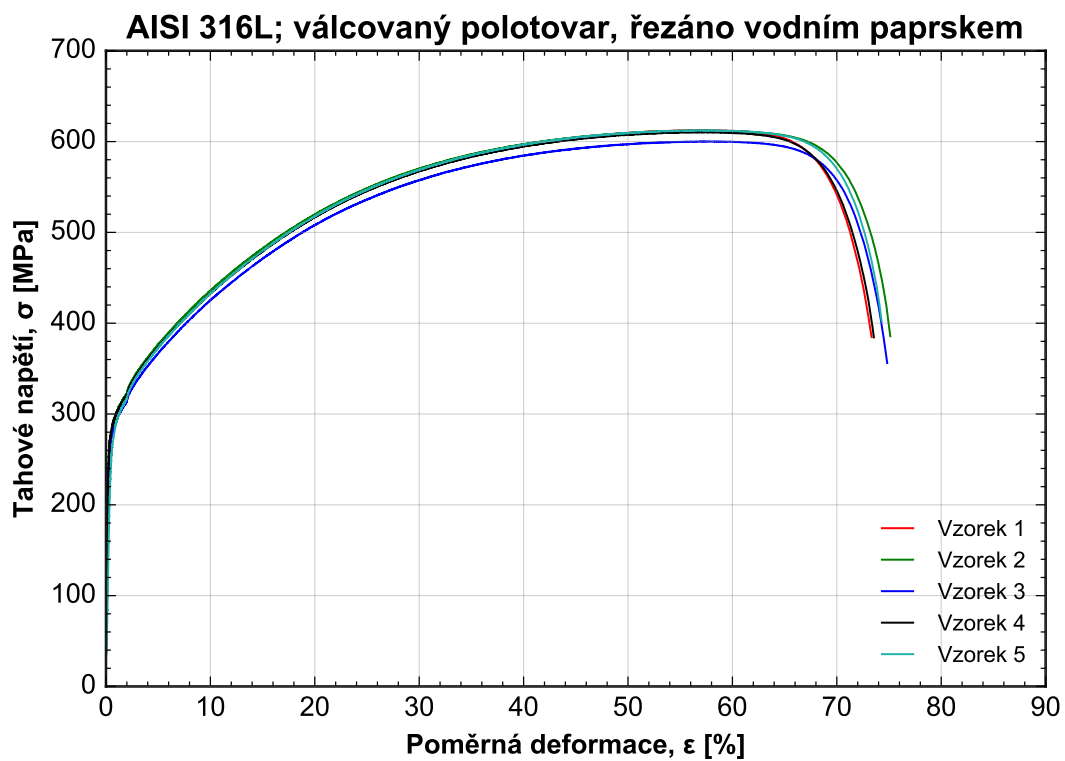
Č. vzorku	A [mm]	B [mm]	Rm [MPa]	A [%]
1	2,06	5,05	377,01	21,00
2	2,04	4,97	380,62	34,75
3	2,00	4,94	375,44	27,99
4	1,85	4,98	449,69	50,13
5	1,99	4,96	366,84	24,03



Obrázek A.6: Průběh napětí v závislosti na poměrném prodloužení vzorků z válcovaného plechu vzory řezané laserem

Tabulka A.6: Naměřené hodnoty vzorků z válcovaného plechu vzory řezané vodním paprskem

Č. vzorku	A [mm]	B [mm]	Rm [MPa]	A [%]
1	2,01	5,25	612,65	56,91
2	2,00	5,30	612,34	56,02
3	2,03	5,28	600,39	56,77
4	2,00	5,30	610,54	55,95
5	2,00	5,27	612,54	55,49



Obrázek A.7: Průběh napětí v závislosti na poměrném prodloužení vzorků z válcovaného plechu vzory řezané vodním paprskem

Tabulka A.7: Naměřené hodnoty vzorků z válcovaného plechu vzory řezané laserem

Č. vzorku	A [mm]	B [mm]	Rm [MPa]	A [%]
1	2,00	5,10	612,92	56,48
2	2,00	5,10	613,25	57,19
3	2,00	5,13	616,38	56,06
4	2,00	5,11	618,86	55,97
5	1,99	5,12	620,04	56,28