

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ,
PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

MOŽNOSTI POSTPROCESSINGU KOMPONENT VYRÁBĚNÝCH
ADITIVNÍMI TECHNOLOGIEMI

POSTPROCESSING POSSIBILITIES OF ADDITIVE
MANUFACTURING PARTS

AUTOR: Ivan Píta

STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Lukáš Pelikán

PRAHA 2022



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Píta** Jméno: **Ivan** Osobní číslo: **476641**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Možnosti postprocessingu komponent vyráběných aditivními technologiemi

Název bakalářské práce anglicky:

Postprocessing possibilities of additive manufacturing parts

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do aditivních technologií
2. Postprocessing polymerních komponent
3. Postprocessing metalických komponent
4. Porovnání různých metod postprocessingu

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Pelikán ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **15.03.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Lukáš Pelikán
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

Bakalářská práce se v teoretické části zabývá nejprve aditivními technologiemi obecně. Následuje popis problematiky postprocessingu polymerních a metalických komponent vyrobených 3D tiskem. Praktická část se zabývá porovnáním různých metod postprocessingu aplikovaných na výtisky z PLA a ASA, které byly vyrobeny technologií Fused Deposition Modelling (FDM).

Klíčová slova:

Aditivní technologie, FDM, DMLS, postprocessing

Annotation

The theoretical part of the bachelor thesis first deals with additive technologies in general. The following is a description of the issue of postprocessing of polymer and metallic components produced by 3D printing. The practical part compares various postprocessing methods applied to PLA and ASA prints which were produced by Fused Deposition Modelling (FDM) technology.

Key words:

Additive technology, FDM, DMLS, postprocessing

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Lukáši Pelikánovi za věnovaný čas a odborné rady. Zároveň bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za veškerou podporu po celou dobu mého studia.

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Aditivní výroba, 3D tisk.....	9
3	Dělení dle technologií	10
3.1	FDM.....	10
3.2	DLP a SLA.....	12
3.3	SLS.....	14
3.4	DMLS/SLM.....	15
3.5	EBM.....	17
3.6	PolyJet a DOD	18
3.7	Binder Jetting.....	18
3.8	LOM.....	19
4	Materiály pro kovový 3D tisk	20
4.1	AlSi10Mg.....	20
4.2	AISI 316L	22
5	Postprocessing.....	24
6	Postprocessing kovových výtisků	25
6.1	Odstranění podpor.....	25
6.2	Tepelné zpracování	25
6.3	Povrchové úpravy	28
7	Postprocessing polymerních výtisků.....	37
7.1	Broušení plastů	37
7.2	Chemické vyhlazování.....	37
7.3	Tmelení	38
8	Praktická část	39
8.1	Návrh modelu	39
8.2	Tisk	42
8.3	Postprocessing	46
8.4	Vyhodnocení a diskuse výsledků.....	50
9	Závěr	57
10	Bibliografie.....	59

1 Úvod

3D tisk je rychle se rozvíjející obor, který umožňuje výrobu tvarově složitých součástí se širokou škálou využití. Význam aditivních technologií v posledních letech značně stoupá, a to především v letectví, automobilovém průmyslu a v lékařství.

3D tisk se krom možnosti výroby geometricky náročných dílů vyznačuje řadou dalších benefitů, jako je např. rychlé prototypování, a tedy zkrácení doby dodání výrobku na trh, nebo možnost změny designu v podstatě kdykoliv během výrobního procesu.

Na druhou stranu má 3D tisk i nevýhody, ať už je to omezený sortiment materiálů, nepřilíživá kvalita povrchu, nebo nižší pevnost v tahu. Realitou 3D tisku je, že drtivá většina výtisků vyžaduje určitý typ následného zpracování, tedy postprocessingu. Postprocessing v oblasti aditivní výroby hraje důležitou roli, jelikož s sebou přináší zlepšení mechanických vlastností, jakosti povrchu, korozní či teplotní odolnosti a dosažení pěkného vzhledu.

Bakalářská práce v rešerši nejprve bude pojednávat o aditivních technologiích obecně, přinese informace o jednotlivých metodách 3D tisku a používaných materiálech. Dále se teoretická část bude zabývat problematikou postprocessingu polymerních a metalických součástí vyrobených 3D tiskem. V praktické části bakalářské práce bude provedeno srovnání různých metod postprocessingu aplikovaných na výtisky z PLA a ASA, vyrobených technologií Fused Deposition Modelling (FDM). Cílem bude zjistit finanční a časovou náročnost broušení, omílání, tmelení, tryskání, kuličkování, vyhlazování resinem a vyhlazování v parách pro dosažení určité kvality povrchu na komponentech zhotovených technologií FDM. Součástí praktické části bude též zhodnocení dosažené kvality povrchu za pomoci fotografií z mikroskopu.

2 Aditivní výroba, 3D tisk

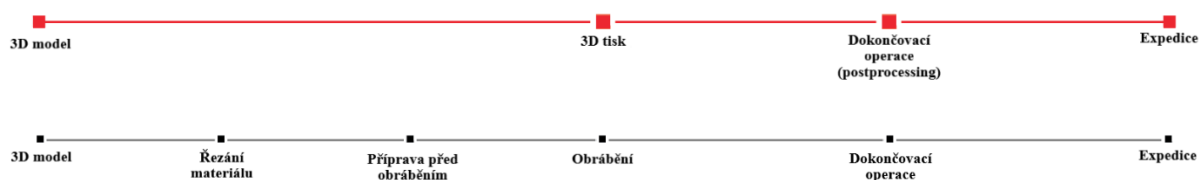
3D tisk patří do rodiny aditivní výroby, která spočívá ve vytváření objektů přidáváním materiálu vrstvu po vrstvě. Jde tedy o opak konvenční subtraktivní výroby, kdy je materiál odebírán. [1]

3D tisk využívá počítačové programy (CAD) nebo skenování objektů. Vytvořený 3D model je převeden do souboru STL, který k popisu modelů používá polygony. Poté je STL importován do tzv. sliceru, kde se nastaví tiskové parametry jako orientace, perimetry, rychlost, výplň apod., a dojde k exportu do G-kódu. G-kód je programovací jazyk, který si tiskárna „přečte“ a postupně vrstvu po vrstvě vytváří požadovaný objekt. [2] [3]



Obrázek 1 - Postup 3D tisku

3D tisk oproti konvenčním metodám výroby přináší řadu výhod. Asi největším benefitem je, že díky 3D tisku můžeme vyrábět tvarově složité součásti, které by konvenčními způsoby buď vůbec nebylo možné vyrobit, anebo by to bylo příliš ekonomicky a časově náročné. Dalším plusem aditivních technologií je možnost personalizace produktů dle požadavků zákazníka a také možnost změny designu součásti de facto kdykoli v průběhu výrobního procesu. [4] [5]



Obrázek 2 - Porovnání výroby 3D tiskem a konvenčními metodami - upraveno [6]

3D tisk má však i několik nevýhod. Sortiment materiálů není vyčerpávající, např. ne všechny plasty a kovy mohou být dostatečně temperovány, aby byl 3D tisk možný. Některé materiály navíc nejsou tzv. „food safe“, tedy potravinově nezávadné. Dalším limitem je omezená velikost tiskových komor a z toho vyplývající omezení velikosti výtisků. Větší součásti je tak třeba tisknout po částech a poté spojit, což může zvýšit

náklady. Do jisté míry je i minusem skutečnost, že většina 3D tištěných dílů vyžaduje postprocessing (odstranění podpor, tryskání, broušení aj.), který prodlužuje čas výroby a zvyšuje náklady. [7]

3 Dělení dle technologií

Aditivní technologie lze rozdělit z hlediska použitého materiálu na 3D tisk plastů, kovů, keramických pojiv, vosků a kompozitů. [8]

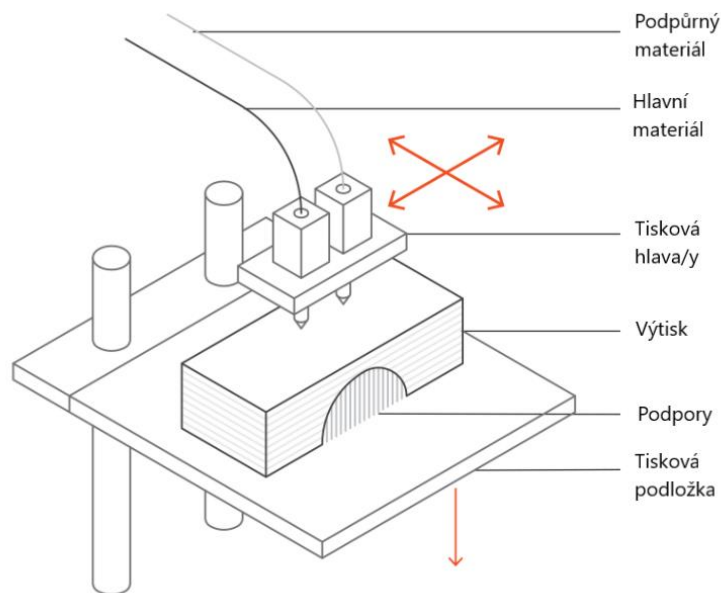
Z hlediska principu metody tisku rozlišujeme extruzi polymerního vlákna (FDM), fotopolymerizaci (SLA, DLP), spékání prášku (SLS, SLM/DMLS, EBM), tryskání kapiček materiálu (PolyJet, DOD), tryskání pojiva na práškový materiál (BJ) a spojování tenkých fólií materiálu (LOM). Pro větší přehlednost je rozdělení technologií 3D tisku z hlediska principu zobrazeno v tabulce (Tabulka 1).

Tabulka 1 - Rozdělení technologií 3D tisku

Zkratka technologie	Anglický název	Princip technologie
FDM	Fused Deposition Modelling	Extruze polymerního vlákna
SLA, DLP	Stereolithography, Digital Light Processing	Fotopolymerizace
SLS	Selective Laser Sintering	Spékání polymerního prášku laserovým paprskem
SLM / DLMS	Selective Laser Melting / Direct Metal Laser Sintering	Spékání metalického prášku laserovým paprskem
PolyJet, DOD	PolyJet, Drop On Demand	Tryskání kapiček materiálu
BJ	Binder Jetting	Tryskání pojiva na práškový materiál
EBM	Electron Beam Melting	Spékání metalického prášku elektronovým paprskem
LOM	Laminated Object Manufacturing	Spojování tenkých fólií materiálu

3.1 FDM

FDM (Fused Deposition Modelling) je aditivní technologie, která využívá tavení pevného plastového materiálu ve formě vlákna. Vlákno je zavedeno do tiskové hlavy, kde dojde k jeho roztavení a následné extruzi na tiskovou podložku. Takto jsou postupně nanášeny nové vrstvy, až je dosaženo požadovaného tvaru. Existují tiskárny s jednou nebo více tiskovými hlavami. Další tiskové hlavy lze využít pro extruzi podpurného materiálu, popř. pro materiál jiné barvy.



Obrázek 3 - Schéma FDM tiskárny se dvěma tiskovými hlavami [9]

FDM je nejrozšířenější metodou 3D tisku. Její výhodou oproti ostatním aditivním technologiím jsou nižší náklady. Další výhodou FDM spočívá v krátké dodací lhůtě, která je dána především širokou dostupností této technologie. [10]

Mezi nevýhody technologie FDM patří nižší rozměrová přesnost a detailnost výtisku. Minusem je také nutnost dalšího opracování, aby bylo dosaženo hladšího povrchu. [10]

3.1.1 Materiály pro FDM

Níže uvádím výčet nejpoužívanějších materiálů pro technologii FDM a jejich vlastnosti.

PLA (Polyactic Acid) je nejrozšířenějším materiálem, a to zejména pro jeho tiskovou nenáročnost a nižší cenu oproti jiným materiálům. PLA je vhodný pro tisk malých, detailních dílů, ale lze z něj tisknout i velké objekty. PLA má ve srovnání s ostatními materiály malou teplotní roztažnost, a tak díly nemají tendenci se kroutit a odlepovat se od podložky. Nevýhodou tohoto materiálu je poměrně vysoká křehkost a nízká teplotní odolnost. [10] [11]

PETG (Glykol Modified Polyethylene Terephthalate) je stejně jako PLA oblíbený materiál pro nízkou cenu a snadnou tisknutelnost. PETG se vyznačuje dobrou houževnatostí a tepelnou odolností, a proto je využíván pro tisk mechanických dílů (držáky, svěrky, komponenty 3D tiskáren). Stejně jako PLA má dobrou přilnavost k podložce a jen velmi málo se kroucí. Oproti PLA má však PETG tendenci k tvorbě vlásků (tzv. stringování). Další nevýhodou je horší (náročnější) odstraňování podpor. [10] [11]

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) je materiál, vyznačující se vysokou houževnatostí a teplotní odolností, a proto je vhodný k tisku mechanicky odolných součástí. Nevýhodou ABS je silné kroucení a uvolňování toxických výparů během tisku. [10] [11]

O ASA (Acrylic Styrene Acrylonitrile) lze říct, že je nástupcem ABS. Jde o odolný materiál s vysokou tvrdostí a teplotní odolností. Ve srovnání s ABS má ASA vyšší UV odolnost, a proto je vhodný i pro venkovní aplikace. Hlavní nevýhodou je stejně jako u ABS silné kroucení a uvolňování toxických výparů při tisku. [11]

PA (polyamid, nylon) je materiál vhodný pro technické aplikace, které požadují vysokou teplotní a mechanickou odolnost. Vzhledem k vysoké obtížnosti tisku je nylon vhodný především pro pokročilé uživatele. PA vyniká svou odolností vůči abrazi a vynikající adhezí mezi vrstvami. Při velkém objemu je extrémně mechanicky odolný, naopak v tenkých vrstvách velmi flexibilní. Nylon má nízký součinitel tření a vysokou teplotu tání. Nevýhodou je, že silně absorbuje vzdušnou vlhkost, a proto je nutné uchovávat ho ve vzduchotěsné nádobě. PA se též značně kroutí. [10] [11]

PC (Polycarbonate) je materiál s vysokou houževnatostí, pevností v tahu a teplotní odolností. PC se zároveň vyznačuje velmi dobrými izolačními vlastnostmi, a proto je hojně využíván pro výrobu krytů elektroniky. Čistý PC má velmi špatnou přilnavost k podložce, a tak není vhodný pro 3D tisk. Z tohoto důvodu jsou do PC přidávána aditiva, která zlepšují tiskové vlastnosti. I přesto patří polykarbonát mezi náročné tiskové materiály. Další nevýhodou je silná hygroskopičnost. [11]

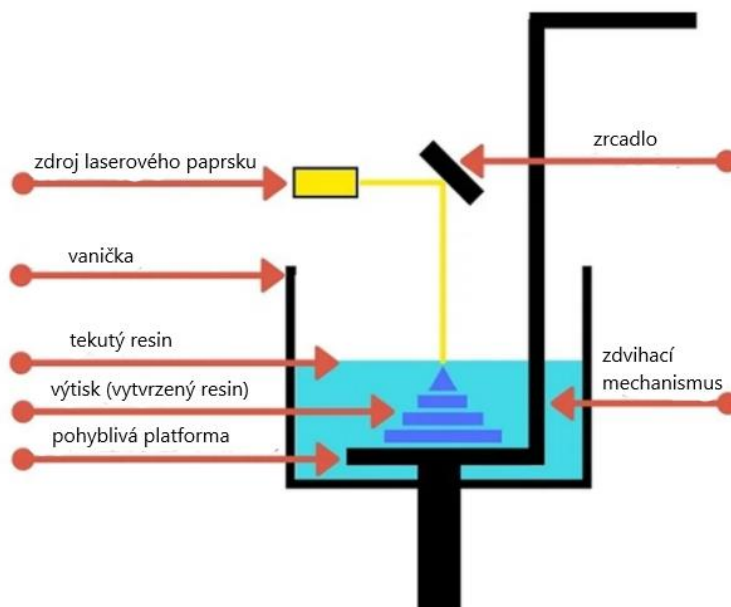
Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti polymerních materiálů pro 3D tisk [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18]

	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Tažnost do přetržení [%]	Rázová houževnatost [J/m²]	Teplota tavení [°C]
PLA	50	80	2	20	200-215
PETG	55	77	50	50	230-240
ABS/ASA	35-50	40-80	20	200-300	250-260
PA (nylon)	86	107	25	350-600	250
PC	65	93	110	100-200	260-270

3.2 DLP a SLA

DLP (Digital Light Processing) je alternativa dříve patentované stereolitografie (SLA). DLP vytváří objekt vytvrzováním tekutého fotopolymerního (resin) za působení světla z digitálního projektoru. Při této technologii projektor osvětluje najednou celou vrstvu. Plocha tak není vykreslována bod po bodu jako při SLA, kde je toto prováděno pomocí

laserového paprsku. Z tohoto důvodu je tisk metodou DLP rychlejší než její předchůdce SLA. Stěžejní úlohu má při tomto procesu tzv. DMD zařízení (Digital Micromirror Device), umístěné mezi projektořem a vaničkou s fotopolymerem. DMD je složeno z několika mikroskopických zrcadel, která jsou ovládána a aktivována jednotlivě. Jestliže jsou zrcadla aktivní, odrazí světlo z projektoru na fotopolymer ve vaničce, který je tímto způsobem vytvrzován. [19] [20]



Obrázek 4 - Schéma DLP/SLA tiskárny [21]

SLA (Stereolitography) je vůbec nejstarší technologií 3D tisku, v roce 1986 si ji nechal patentovat Chuck Hull. Stejně jako DLP funguje na principu fotopolymerizace, kdy je resin vytvrzován laserovým paprskem. Na rozdíl od DLP je však objekt vykreslován bodově, nikoliv v celé ploše, a proto je tento proces pomalejší. [21]

Technologie DLP a SLA nachází využití zejména pro výrobu malých detailních součástí (přesnost na jednotky mikrometrů) s hladkým povrchem. [21]

3.2.1 Materiály pro SLA a DLP

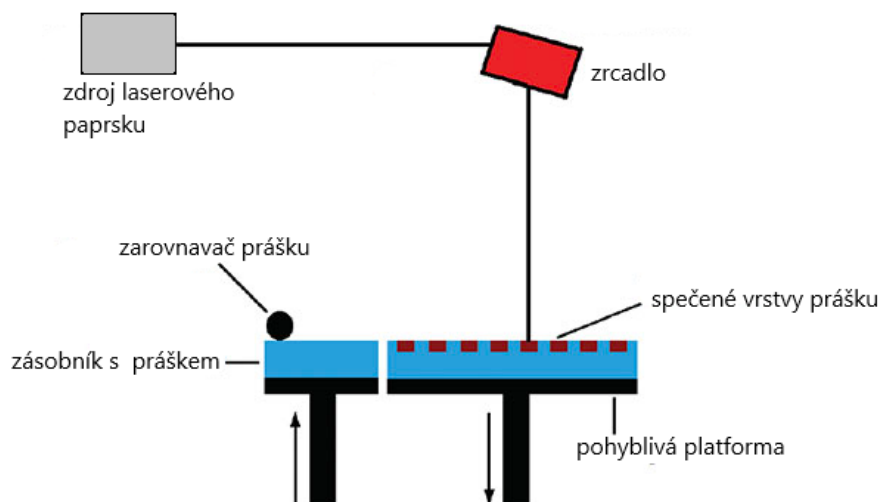
Materiály pro SLA a DLP se dodávají ve formě tekutých pryskyřic, které lze zvolit na základě požadovaných vlastností součásti (tepelná odolnost, hladký povrch, odolnost proti oděru aj.). V tabulce níže (Tabulka 3) jsou uvedeny vybrané resiny a jejich vlastnosti. [22]

Tabulka 3 - Materiály pro SLA/DLP a jejich vlastnosti [22]

Označení resinu	Vlastnosti výtisku
Standardní	hladký povrch křehkost
Vysoce detailní	vysoká rozměrová přesnost vyšší cena
Transparentní	průhledný nutný postprocessing
Vysokoteplotní	vysoká teplotní odolnost
Flexibilní	vysoká tažnost a pevnost v ohybu nižší rozměrová přesnost

3.3 SLS

SLS (Selective Laser Sintering) je aditivní technologie, jenž spočívá ve spékání polymerního prášku laserem. Na tiskovou platformu je nanesen a zarovnán polymerní prášek, který je topnými tělesy tiskárny zahřát na teplotu blízkou bodu tání daného materiálu. Laser skenuje plochu a spéká částice prášku. Když je naskenován celý průřez, platforma se posune dolů o tloušťku jedné vrstvy, dojde k opětovnému nanesení prášku a ke spékání další vrstvy. Proces se stále opakuje, až je docíleno finálního tvaru součásti. Technologie SLS nevyžaduje podpory, jelikož tištěný díl je obklopen nespečeným práškem. [21]



Obrázek 5 - Schéma SLS tiskárny [23]

3.3.1 Materiály pro SLS

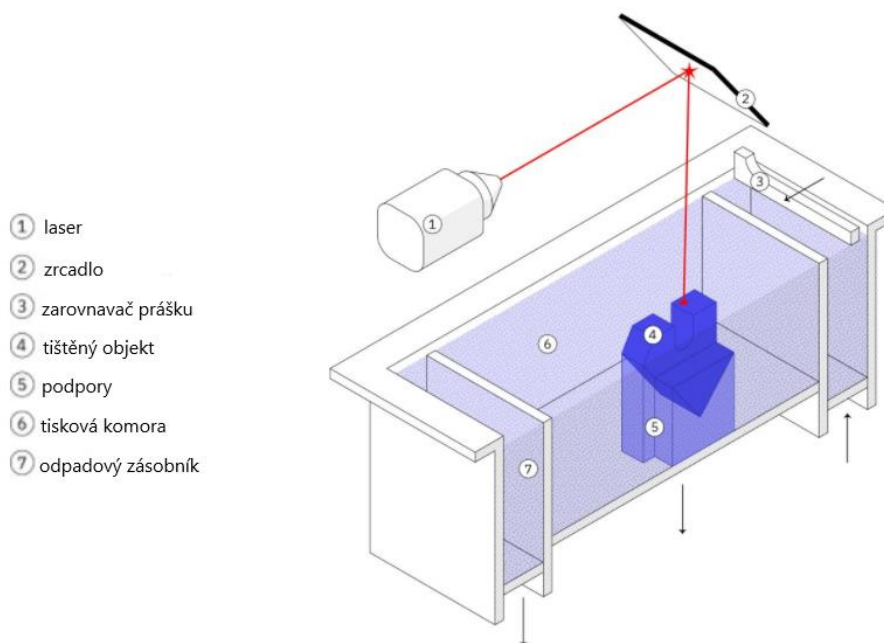
Nejběžnějším materiálem pro SLS je nylon (polyamid). Výtisky z nylonu jsou pevné, tuhé, odolné proti nárazu a opotřebení. Nylon je také odolný vůči UV záření, vlhkosti, rozpouštědlům a vysokým teplotám. Další výhodou je jeho biokompatibilita. Používá se pro tisk západek, spon, objímek nebo protetiky. V tabulce (Tabulka 4) jsou uvedeny mechanické vlastnosti nejpoužívanějších nylonových prášků. Nylon 11 je tažný, pevný a flexibilní materiál využívaný v případech, kdy je potřeba odolnost a výkon (panty, ortotika, protetika). Nylon 12 je univerzální materiál. Výtisky z něj se vyznačují vysokou detailností a velkou rozměrovou přesností. Nylon 12 GF obsahuje skelná vlákna, má vyšší tuhost a tepelnou stabilitu, a proto je vhodný pro náročné průmyslové aplikace. Mezi další materiály, které jsou při 3D tisku technologií SLS využívány, patří elastomery a polystyren. [24]

Tabulka 4 - Mechanické vlastnosti nylonu pro SLS [24]

	Nylon 11	Nylon 12	Nylon 12 GF
Pevnost v tahu [MPa]	49	50	38
Modul pružnosti v tahu [MPa]	1573	1850	2800
Tažnost [%]	40	8,5	3,5

3.4 DMLS/SLM

DMLS (Direct Metal Laser Sintering) a SLM (Selective Laser Melting) jsou shodné technologie 3D tisku, jejichž princip spočívá ve spékání kovového prášku. Zdrojem energie je laserový paprsek. Kovový prášek je rozprostřen v tenkých vrstvách na tiskovou platformu. Rovnoměrné rozprostření prášku je zajištěno zarovnávačem (rameno s břitem). Laserový paprsek způsobí roztavení prášku. Jelikož je prášek z kovu, má dobrou tepelnou vodivost, v důsledku čehož dochází k tepelnému ovlivnění zóny v blízkosti tavné lázně. Během tuhnutí tedy dochází ke spékání předchozí, ztuhlé vrstvy s novou roztavenou vrstvou. Následně se platforma posune dolů a proces se opakuje. [25] [26]



Obrázek 6 - Schéma DMLS/SLM tiskárny [27]

3.4.1 Materiály pro DMLS/SLM

Technologie DMLS/SLM používá slitiny kovů ve formě prášku. Mezi běžně používané materiály patří slitiny železa, hliníku, titanu a superslitiny niklu.

Slitiny železa

Slitiny železa (oceli) patří obecně mezi nejpoužívanější materiál ve strojní výrobě. Nejčastěji se setkáváme s oceli vysokopevnostními a nerezovými, jelikož díky své univerzálnosti je jejich možnost použití značně široká (letecký a automobilový průmysl, lékařství). Typickým zástupcem pro technologii DMLS/SLM je nerezová ocel AISI 316L, vyznačující se dobrou pevností, vysokou tvrdostí, korozivzdorností a teplotní odolností. Další výhodou je dobrá svařitelnost. Ocel AISI 316L je blíže popsána v kapitole 4. [26] [28]

Slitiny hliníku

Slitiny hliníku obecně nejsou v oblasti 3D tisku zdaleka tolik používané jako například oceli. Je to dáno skutečností, že hliník je lehký a dobře obráběný materiál, a tudíž náklady na výrobu hliníkových komponent konvenčními metodami nejsou vysoké. Na druhou stranu, pokud je třeba vyrobit tvarově složitou součást, dostává se 3D tisk do popředí, jelikož ušetří čas i materiál, a tím pádem i peníze. Mezi nejznámější hliníkové slitiny používané pro 3D tisk patří slitina AlSi10Mg, která spojuje dobré pevnostní a tepelné vlastnosti s nízkou hmotností a flexibilitou pro dodatečné opracování. Z těchto důvodů jde o často využívaný materiál v leteckém, automobilovém průmyslu a v oblasti automatizace. Slitina AlSi10Mg je blíže popsána v kapitole 4. [26] [28]

Titan, titanové slitiny

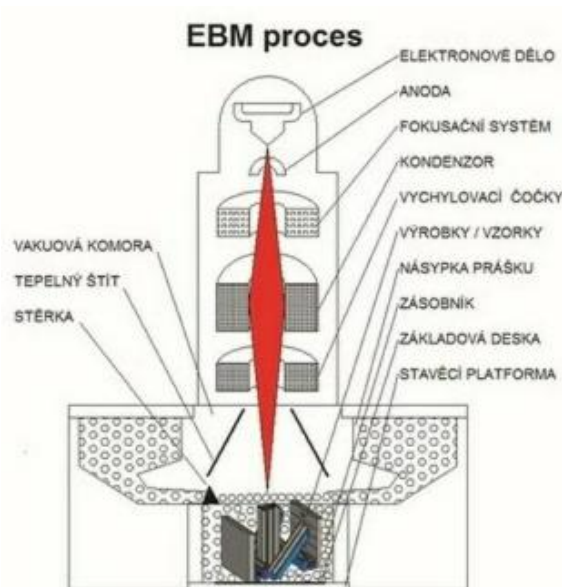
Vzhledem k tomu, že titanové slitiny patří mezi těžkoobrobitelné materiály, je konvenční výroba komponentů z tohoto materiálu velmi náročná jak technologicky, tak ekonomicky. Právě proto jsou titan a jeho slitiny velmi žádané pro výrobu součástí aditivními technologiemi. Ti6Al4V, jedna z nejznámějších slitin pro 3D tisk kovů, spojuje vynikající mechanické vlastnosti s velmi nízkou měrnou hmotností a dobrou korozní odolností. Hojně se využívá např. pro tisk leteckých dílů nebo lékařských přístrojů. [26] [28]

Superslitiny niklu

Superslitiny niklu se používají v aplikacích, kde je potřeba vysoká teplotní odolnost (turbíny, tepelné výměníky apod.). Příkladem je Inconel, který vykazuje teplotní odolnost až do 700 °C. [26] [28]

3.5 EBM

EBM (Electron Beam Melting) je technologie, při níž je kovový prášek spékán teplem vznikajícím přeměnou kinetické energie elektronů při jejich dopadu na povrch materiálu. Elektronový paprsek má oproti laseru mnohem větší energii (výkon dosahuje hodnot až 6 kW), díky čemuž je tato technologie oproti DMLS/SLM produktivnější. Elektronový paprsek je usměrňován elektromagnetickými čočkami. Tisková komora je vakuově utěsněna (0,01 Pa), což zajišťuje efektivní přenos energie (elektrony před dopadem na povrch kovu nemohou narazit do žádné částice a ztratit tak část své energie). Technologie EBM vyžaduje použití podpor, a to nejen pro podpírání vlastního výrobku, ale především pro odvod tepla. Komponenty zhotovené technologií EBM se vyznačují vysokou pevností a (téměř) absencí vnitřních pnutí a nachází největší uplatnění ve zdravotnictví (ortopedické implantáty). [29] [30]

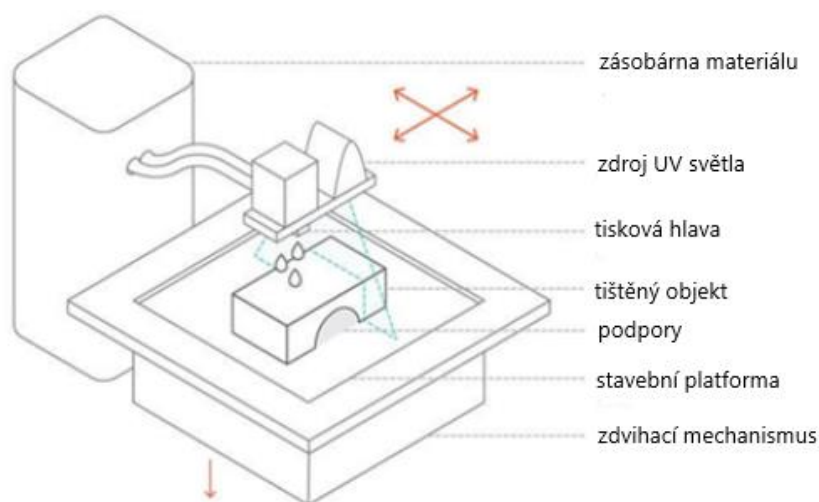


Obrázek 7 - Schéma EBM tiskárny [29]

3.6 PolyJet a DOD

PolyJet a DOD (Drop on Demand) jsou technologie 3D tisku spadající do kategorie Material Jetting. Spočívají v tryskání kapiček materiálu na tiskovou platformu a následném vytvrzování jednotlivých vrstev UV světlem nebo teplem.

Princip technologie PolyJet je následující: tekutá pryskyřice uvnitř nádoby se na začátku zahřívá, aby bylo dosaženo optimální viskozity. Tisková hlava tryská tisíce drobných kapiček fotopolymeru na platformu. Poté UV světlo vytvrzuje nanesený materiál a zpevňuje jej, aby se vytvořila vrstva. Jakmile je vrstva dokončena, stavební platforma se přesune dolů, aby se započala další vrstva. [31]

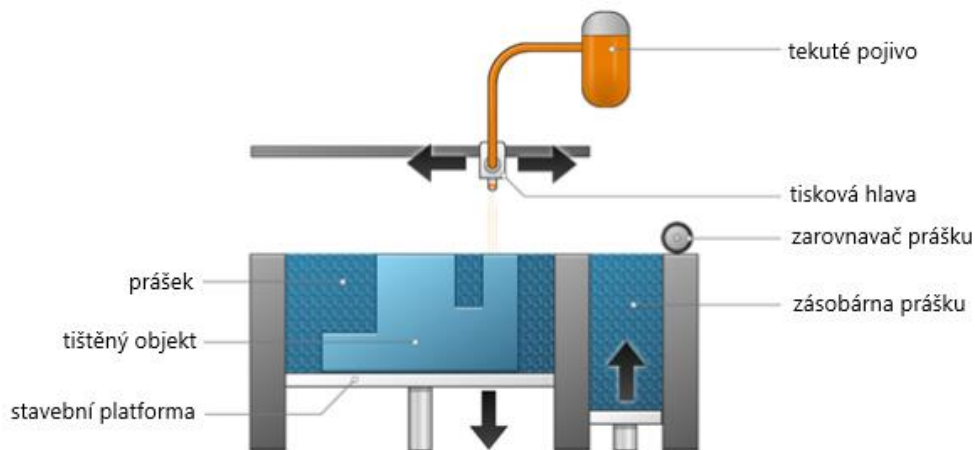


Obrázek 8 - Schéma PolyJet tiskárny [31]

Technologie DOD (Drop on Demand) ukládá na tiskovou plošinu v případě potřeby pouze malé tečky materiálu namísto souvislých linek a obvykle se používá pro viskózní tekuté materiály. DOD nachází využití ve šperkařství při výrobě voskových modelů. [31]

3.7 Binder Jetting

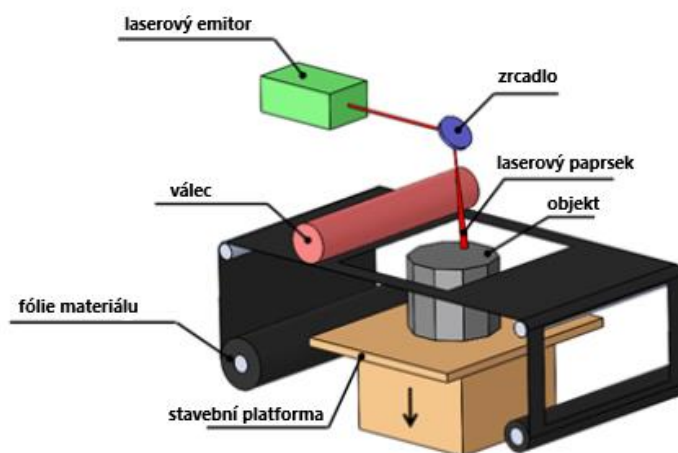
Binder Jetting spočívá v nanášení pojiva na tenké vrstvy práškového materiálu. Práškové materiály jsou buď na bázi keramiky (sklo, sádra), nebo kovu (nerezové oceli). Tisková hlava nanáší na stavební platformu s vrstvou prášku kapičky pojiva. Po dokončení vrstvy se platforma posune dolů a na stavební plochu se nanese nová vrstva prášku. Proces se opakuje, dokud vrstvy nevytvoří hotový výrobek. Výtisky vyžadují dodatečné zpracování, než budou připraveny k použití. Často se přidává infiltrační látka (kyanoakrylátové lepidlo v případě keramiky, nebo bronz v případě kovů) pro zlepšení mechanických vlastností. Ve srovnání s technologií Powder Bed Fusion (spékání prášku) má Binder Jetting tu výhodu, že během procesu výroby nevyužívá teplo, což zabraňuje vytváření zbytkových pnutí v dílech. [32]



Obrázek 9 - Schéma Binder Jetting tiskárny [32]

3.8 LOM

LOM (Laminated Object Manufacturing) je velmi rychlý a levný způsob 3D tisku objektů z několika druhů materiálů. Používá se hlavně pro výrobu prototypů. Při technologii LOM jsou tenké papírové, vinylové či laminátové fólie válcovány na stavební platformu. Obvykle je materiál potažen vrstvou lepidla a podávací válec se zahřívá, aby se lepidlo roztavilo. Laserový paprsek vyřezává obrysy vrstvy. Po dokončení dané vrstvy se platforma posune dolů. Proces se opakuje, až vznikne homogenní objekt. [33] [34]



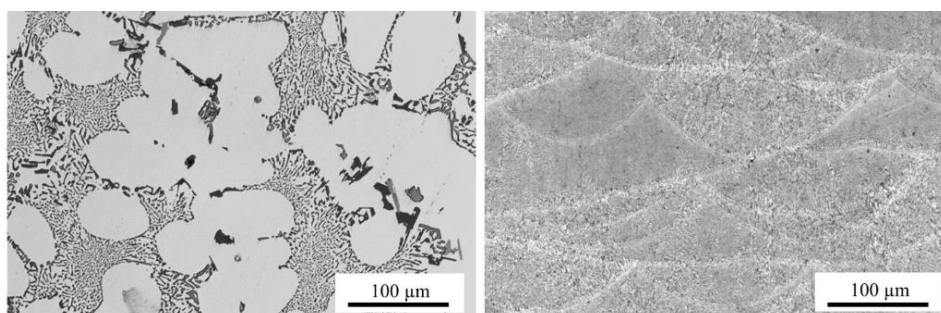
Obrázek 10 - Schéma LOM tiskárny [35]

4 Materiály pro kovový 3D tisk

Ve své práci se zaměřím na jedny z nejvíce používaných slitin pro kovový 3D tisk – AlSi10Mg a AISI 316L.

4.1 AlSi10Mg

Při výrobě materiálů vhodných k 3D tisku se vychází z materiálů již existujících a užívaných v konvenčních technologiích. Slitina AlSi10Mg se používá jak ve slévárenství, tak pro aplikace 3D tisku. Je ovšem potřeba pozměnit konvenční metody tepelného zpracování, protože součásti vyrobené metodou 3D tisku mají rozdílnou vnitřní strukturu v porovnání s odlitky. Tento rozdíl lze vidět na obrázku níže (Obrázek 11).



Obrázek 11 - Rozdíl mezi gravitačně odlitým AlSi10Mg (vlevo) a 3D tištěným (vpravo) [36]

4.1.1 Vlastnosti a složení

Charakteristickými vlastnostmi slitin hliníku s křemíkem jsou dobrá zabíhavost, malé smršťování a praskavost, a dále velmi dobrá tepelná vodivost. Přidáním hořčíku dojde ke zpevnění matrice a slitina je pak vhodná k vytvrzování. Hlavními legujícími prvky jsou křemík a hořčík. Podrobné chemické složení je uvedeno v tabulce (Tabulka 5). [37]

Tabulka 5 - Chemické složení AlSi10Mg [7]

Prvek	Chem. Značka	Procentuální podíl [%]
Hliník	Al	87,1 - 90,75
Měď	Cu	0 - 0,05
Hořčík	Mg	0,25 - 0,45
Křemík	Si	9–11
Železo	Fe	0 - 0,55
Mangan	Mn	0 - 0,45
Nikl	Ni	0 - 0,05
Zinek	Zn	0 - 0,1
Olovo	Pb	0 - 0,05
Cín	Sn	0 - 0,05
Titan	Ti	0 - 0,15

Slitina AlSi10Mg vyniká v aplikacích, kde je kladen důraz na nízkou hmotnost a zároveň dostatečnou pevnost a odolnost vůči vyššímu zatížení, tedy např. v letectví či automobilovém průmyslu. Tato slitina se využívá jak u konvenčních technologií, konkrétně u slévání, tak při výrobě metodou práškového 3D tisku. Výhodou 3D tištěných výrobků z této slitiny jsou lepší mechanické vlastnosti (vyšší mez pevnosti a mez kluzu) oproti odlitkům, jak dokazuje tabulka (Tabulka 6). Porovnávané vzorky nebyly podrobeny tepelnému zpracování. [38] [39]

Tabulka 6 - Porovnání mechanických vlastností odlitku a 3D výtisku z materiálu AlSi10Mg [40] [41]

	Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu R_{p0,2} [MPa]	Tažnost [%]
Výtisky	250-300	180-190	1-2
Odlitky	160-180	90-100	1-2

Další výhodou 3D tištěných dílů je obecně nižší cena oproti dílům vyrobeným konvenčními technologiemi, u nichž se s rostoucími požadavky na komplexnost součástí zvyšuje i jejich cena. Právě zde může pomoci 3D tisk, jelikož touto technologií lze danou soustavu vyrobit ze znatelně nižšího počtu dílů, což ve výsledku znamená méně materiálu, kratší výrobní čas, a tedy i nižší cenu.

4.1.2 Tepelné zpracování

Tepelné zpracování hliníkových slitin se provádí zejména kvůli zlepšení mechanických vlastností. Nejčastějším tepelným zpracováním hliníkových slitin je vytvrzování (stárnutí). Vytvrzováním dochází ke zvýšení tvrdosti, meze kluzu R_{p0,2} a meze pevnosti R_m. Naopak tažnost se snižuje. [42]

Kromě vytvrzování se u hliníkových slitin, avšak zdaleka ne tak často, používá žihání. Žiháním dosahujeme snížení vnitřního pnutí, stabilizace rozměrů a mechanických vlastností. [42]

Stav tepelného zpracování je u hliníkových slitin označován dle normy ČSN EN 515:

F – výrobky přímo z výroby, nejsou řízené tepelné podmínky nebo deformační zpevnění, nejsou specifikovány meze mechanických vlastností.

O – výrobky žíhané k získání stavu s nejnižší pevností

H – výrobky deformačně zpevněné

W – výrobky v nestabilním stavu po rozpouštěcím žihání, přirozené stárnutí při pokojové teplotě

T – výrobky tepelně zpracované, bez nebo s deformačním zpevněním k získání stabilního stavu

- T1 – ochlazení ze zvýšené teploty s následným přirozeným stárnutím
 - T2 – ochlazení ze zvýšené teploty, tváření za studena s následným přirozeným stárnutím
 - T3 – rozpouštěcí žíhání, tváření za studena a následné přirozené stárnutí
 - T4 – rozpouštěcí žíhání s následným přirozeným stárnutím
 - T5 – ochlazení ze zvýšené teploty s následným umělým stárnutím
 - T6 – rozpouštěcí žíhání s následným umělým stárnutím
 - T7 – rozpouštěcí žíhání s následným umělým přestárnutím
 - T8 – rozpouštěcí žíhání, tváření za studena a následné umělé stárnutí
- [43] [44]

4.2 AISI 316L

4.2.1 Vlastnosti a složení

Ocel AISI 316L je nestabilizovaná čistě austenitická korozivzdorná ocel s nízkým obsahem uhlíku (méně než 0,03 procentuálního hmotnostního podílu), což zlepšuje její obrobiteľnosť a svařitelnost. Jedná se o nemagnetickou ocel s vysokou odolností proti korozi a mezikrystalové korozi v kyselých prostředích. Chemické složení je uvedeno v tabulce (Tabulka 7) níže.

Tabulka 7 - Chemické složení AISI 316L [45]

Prvek	Chemická značka	Procentuální podíl [%]
Železo	Fe	65
Uhlík	C	0,03
Chrom	Cr	17
Mangan	Mn	2
Molybden	Mo	2,5
Nikl	Ni	12
Fosfor	P	0,045
Síra	S	0,03
Křemík	Si	1

Co se mechanických vlastností týče (Tabulka 8), jde o ocel s velmi dobrou tažností a lomovou houževnatostí. Mez kluzu je nižší než u standardní oceli AISI 316. AISI 316L je vhodná pro tváření lisováním, tažením a ohýbáním. Dále vykazuje velmi dobré vlastnosti v korozním prostředí i za zvýšených teplot, avšak v roztocích chlóru podléhá důlkové korozi. Pracovní teploty této oceli se pohybují v rozsahu 425 až 860 °C. [46]

Tabulka 8 - Vybrané mechanické vlastnosti AISI 316L [46]

Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost [%]
485	170	40

5 Postprocessing

3D tištěné součásti ve většině případů vyžadují další úpravy, aby byly provozuschopné nebo aby měly lepší vizuální vlastnosti. Tzv. postprocessingem, tedy dokončovacími operacemi, se snažíme u výtisků dosáhnout lepších mechanických (pevnost, tvrdost), chemických (odolnost vůči kyselinám) a dalších vlastností (korozní odolnost, odolnost proti otěru, odolnost proti vyšším teplotám nebo povětrnostním vlivům). Do postprocessingu řadíme operace jako odstraňování podpěrného materiálu, tepelné zpracování (vytvrzování, žihání, hipování) a povrchové úpravy (broušení, omílání, tryskání, kuličkování, elektrolytické leštění, povlakování, lakování). [47]

6 Postprocessing kovových výtisků

Tato kapitola pojednává o postprocessingu metalických komponent vyrobených 3D tiskem. Popisuje odstraňování podpurné konstrukce, druhy tepelného zpracování a povrchových úprav.

6.1 Odstranění podpor

Podpory výtisků lze odstraňovat dvojitým způsobem, a to mechanicky, nebo chemicky. Mechanickým odstraněním podpor se rozumí jejich odlámání za pomoci nástrojů jako kleště, pilka apod. Chemické odstranění se uplatňuje pouze tehdy, jsou-li podpory z materiálu odlišného od materiálu stavebního. Spočívá v rozpouštění podpurného materiálu působením chemikálie (rozpouštědla), např. louhu. Před rozpouštěním je však vhodné odlámat co nejvíce podpor mechanicky, aby rozpouštění netrvalo příliš dlouho.

6.2 Tepelné zpracování

Pojmem tepelné zpracování označujeme všechny postupy, při kterých materiál v tuhém stavu cíleně ohříváme a ochlazujeme za účelem zlepšení mechanických vlastností (pevnost, tvrdost, tažnost, houževnatost) nebo odolnosti vůči opotřebení. Zároveň při procesech tepelného zpracování dochází ke změně struktury materiálu. [48]

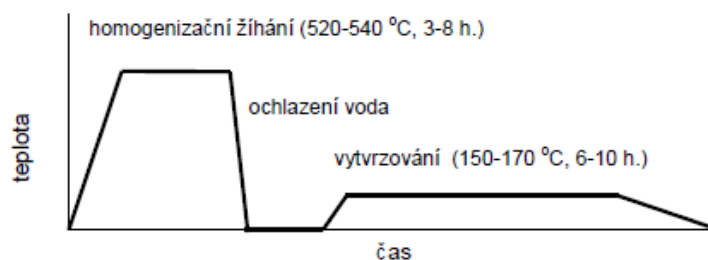
6.2.1 Vytvrzování

Jak jsem již uvedl v kapitole 4, vytvrzování má za cíl zvýšení tvrdosti, meze kluzu a meze pevnosti hliníkových slitin.

Podmínkou vytvrditelnosti slitiny je přítomnost přísadového prvku (v případě AlSi10Mg je to hořčík), který má výraznou změnu rozpustnosti v tuhém roztoku $\alpha(\text{Al})$.

Vytvrzování lze rozdělit na 3 úseky:

- rozpouštěcí žihání
- rychlé ochlazení
- precipitační vytvrzování



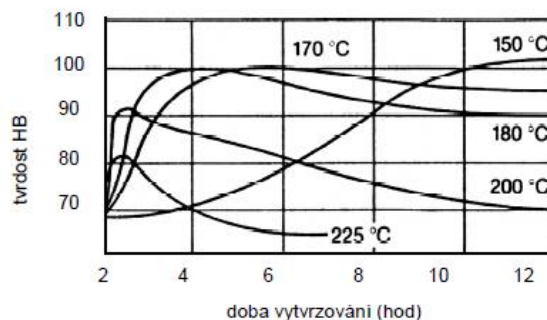
Graf 1 - Diagram tepelného zpracování při vytvrzování za tepla (hodnoty jsou orientační)

Rozpouštěcím žháním rozumíme ohřev na teploty nad křivkou změny rozpustnosti, což bývá 10 až 15 °C pod eutektickou teplotou. Dochází k rozpuštění intermetalických fází a zisku homogenního tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$. [42]

Rychlé ochlazení má za cíl eliminovat vyloučení intermetalické fáze přísadového prvku (hořčíku). Tím dochází k vytvoření přesyceného tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$, který se vyznačuje měkkou a tvárnou strukturou, proto není náchylná ke vzniku napěťových prasklin. [42]

Při precipitačním vytvrzování se přesycený tuhý roztok $\alpha(\text{Al})$ postupně rozpadá a dochází ke vzniku koherentních precipitátů, označovaných jako Guiner – Prestonovy zóny. Koherentní precipitáty jsou součástí krystalové mřížky tuhého roztoku, kterou deformují. Deformací mřížky tuhého roztoku vzniká vnitřní pnutí, které má za následek zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny. Teplota nesmí být příliš vysoká a doba vytvrzování příliš dlouhá, jinak dojde ke ztrátě koherence, a tedy ke snížení pevnosti a tvrdosti, což je označováno jako přestárnutí. [42]

Stárnutí může probíhat za normálních teplot (tzv. stárnutí za studena, popř. přirozené stárnutí), nebo za zvýšených teplot (stárnutí za tepla, popř. umělé stárnutí). Slitina AlSi10Mg se vytvrzuje za tepla, vytvrzovací teploty se pohybují mezi 140-180 °C a doba vytvrzování bývá 3 až 8 hodin. Na následujícím grafu (Graf 2) můžeme vidět, jak volba vytvrzovací teploty a doby trvání procesu ovlivňuje výslednou tvrdost slitiny AlSi10Mg (pro vysoké teploty je tvrdost nižší). [42]



Graf 2 - Závislost tvrdosti AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [42]

6.2.2 Žhání

Žhání spočívá v pomalém ohřevu, výdrží na žhací teplotě a pomalým chladnutím součásti na vzduchu či v peci. [49]

Pro tepelné zpracování hliníkových slitin se používají následující druhy žhání:

- žhání na odstranění vnitřního pnutí
- stabilizační žhání
- žhání na měkko

Žihání na odstranění vnitřního pnutí má za cíl co nejvíce omezit vnitřní pnutí vzniklé smršťováním součástí v důsledku nestejnomyšného ochlazování jejich jednotlivých průřezů.

Proces probíhá za teplotního rozmezí 200-250 °C u hliníkových slitin, pro ocele je to 600-630 °C, doba trvání bývá 6 až 8 hodin. Následuje pomalé chladnutí na vzduchu nebo v peci. [42] [49]

Cílem stabilizačního žihání je dosažení stabilizace rozměrů součástí, popř. i jejich mechanických vlastností. Teplota se pohybuje v rozmezí 240-350 °C, následuje chladnutí na vzduchu. [42]

Žihání na měkko se používá pro znovudosažení rovnovážného stavu u slitin, které byly předtím vytvrzeny. Hliníková součást je zahřata na teplotu v rozmezí 350-450 °C, ocel na 650-720 °C. Následně je součást pomalu ochlazována v peci alespoň na 200 °C a dále se chladí na vzduchu. [42] [49]

6.2.3 HIP

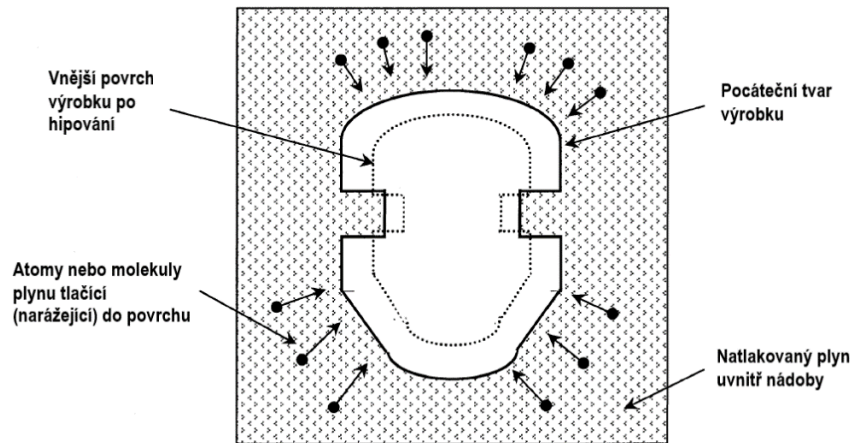
Technologie HIP (z anglického Hot Isostatic Presing – HIP), též nazývaná hipování, se dá zjednodušeně formulovat jako stlačování výrobku za vysoké teploty a tlaku. Jedná se o metodu tepelného zpracování, která se využívá u ocelí a hliníkových slitin. HIP má za cíl zlepšit určité vlastnosti výrobku prostřednictvím odstranění pórů na výrobku.

Proces hipování probíhá následovně: výrobek je umístěn do uzavřené nádoby, jejíž atmosféra je tvořena inertním plynem, nejčastěji argonem. Inertní plyn zajišťuje neměnnost chemického složení povrchu výrobku vlivem vysoké teploty. Nádoba je tlakována kompresorem na předem definovanou hodnotu tlaku a je do ní přiváděno teplo. Hipovací teplota a tlak se liší podle materiálu výrobku, konkrétní příklady jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 9).

Tabulka 9 - Parametry hipování pro vybrané materiály a jejich slitiny [50]

Materiál	Teplota tavení [°C]	Teplota hipování [°C]	Hipovací tlak [MPa]
Hliník a jeho slitiny	660 (Al)	500	100
Měď a její slitiny	1083 (Cu)	800 až 950	100
Oceli	1536 (Fe)	950 až 1160	100
Titan a jeho slitiny	1670 (Ti)	920	100

Při aplikování technologie HIP je třeba počítat se změnou rozměrů výrobku. Výrobek se působením vysokého tlaku zmenší, což je schematicky znázorněno na obrázku (Obrázek 12).



Obrázek 12 - Princip hipování s naznačenou změnou rozměrů [50]

6.3 Povrchové úpravy

Všechny materiály jsou povrchově namáhány fyzikálními, chemickými a elektrochemickými vlivy jako jsou např. koroze nebo abrazivní opotřebení. Snížit negativní vliv okolního prostředí, a tím zvýšit životnost součástí, lze povrchovými úpravami. [51]

6.3.1 Broušení

Přestože jsme 3D tiskem schopni dosáhnout výtisků o vysoké kvalitě a detailnosti, často lze na povrchu výtisku rozeznat jednotlivé vrstvy, což by mohl být problém u okrasných dílů nebo funkčních ploch. Zde je kladen důraz buď na estetiku, nebo na vysokou přesnost. Z těchto důvodů přichází na řadu broušení. Jedná se o nejrozšířenější povrchovou úpravu výtisků, především proto, že jde o osvědčený, efektivní a zároveň finančně nenáročný proces. Broušení je vhodné pro kusovou nebo malosériovou výrobu, protože zejména u větších dílů by bylo časově velmi náročné. Brousit lze ručně použitím smirkového papíru nebo pásových brusek, anebo strojově na obráběcích (brousících) centrech.

Mezi nejpoužívanější brusné nástroje patří brousící kotouče, brousící tělíška, brousící kmeny, brusné pásy, brusné segmenty, brusná plátna a papíry, honovací a superfinišovací brusné kameny. V případě brusných a leštících past je nástroj nahrazen zpravidla textilním nebo pryžovým kotoučem. [52]

Níže uvádím nejdůležitější charakteristiky brusných kotoučů:

- Typ kotouče
- Druh brousícího materiálu (korund, nitrid bóru, karbid křemíku, diamant)
- Tvrdost (maximálně měkké, velmi měkké, měkké, střední, tvrdé, velmi tvrdé, maximálně tvrdé)
- Zrnitost (hrubá, střední, jemná, velmi jemná)
- Druh pojiva (keramické, z umělých pryskyřic, kovové, galvanické, gumové)
- Pórovitost
- Průměr kotouče a s tím související maximální řezná rychlost.

Pro broušení ocelí se jako brousící materiál používá růžový korund, pro kalené nástroje obvykle bílý korund.

Kotouče s hrubší zrnitostí se používají, když je třeba odebrat větší množství materiálu, nebo když brousíme materiál, který má větší sklon k mazavosti. Jemnější zrna se používají pro materiály citlivé na tepelné změny. Zrna brusného kotouče jsou spojena pojivem. Nejobvyklejší je keramické pojivo, méně častá jsou pojiva z pryskyřice. Pro leštění se používají kotouče s gumovým pojivem.

Pórovitost udává podíl póru v kotouči. Čím je podíl pórů větší, tím větší je schopnost chlazení. Standardně se pórovitost pohybuje v rozmezí hodnot 8 až 9. [53]

6.3.2 Tryskání

Technologie tryskání patří mezi nejpoužívanější mechanické úpravy povrchu 3D tištěných dílů. Tryskáním vzniká hladký a matný povrch. Výtisk je „ostřelován“ proudem tryskacího media za pomoci stlačeného vzduchu, metacího kola nebo kombinací tlaku vzduchu a vody.

Díky široké škále druhů materiálů, velikosti a geometrii abraziv je možné docílit přesných drsností povrchů. Na rozdíl od broušení je tryskání rychlejší a lze jím upravovat povrch i u malých součástí. Velikost upravovaného dílu je omezena pouze vnitřními rozměry tryskací komory. [52] [54]

Abraziva pro tryskání

Abraziva můžeme popsat jako suché, sypké materiály, které mají různé chemické složení a fyzikální vlastnosti (nejdůležitější jsou tvrdost a ostrost). Využívají se především pro tryskání drobných součástí (optika, jemná mechanika).

Abraziva můžeme rozdělit do tří skupin:

- Organická
- Minerální
- Kovová.

Do skupiny organických abraziv patří abraziva získávaná přírodně (např. kukuřičný granulát, ořechové skořápky) či synteticky (plastový granulát). Organická abraziva mají kulatý nebo ostrohranný tvar.

Minerální abraziva mají oválný nebo ostrohranný tvar. Mohou být získávána přírodně (granát, křemík) i synteticky (korund). Používají se pro drobné i velké součásti.

Kovová abraziva dělíme na oxidující (železo), které jsou vhodné zejména pro tryskání hutních materiálů, a neoxidující (chrom, slitiny chromu a niklu). Obecně lze říct, že kovová abraziva používáme pro vysoce efektivní tryskání velkých součástí (svařence, odlitky). [55] [56]

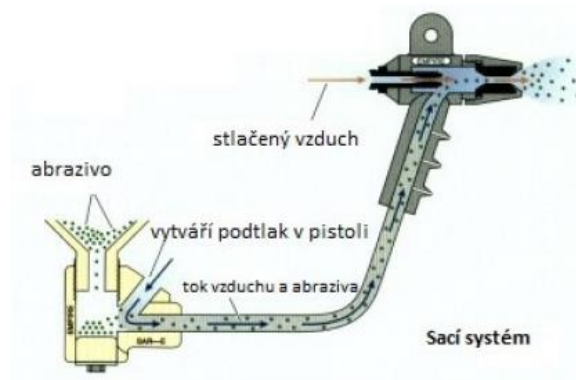
Tryskání můžeme rozdělit na dva druhy – pneumatické a mechanické.

Pneumatické tryskání

Při pneumatickém tryskání jsou tryskou vrhány abrazivní částice na povrch tryskaného materiálu za pomoci stlačeného vzduchu. Hodnoty tlaku vzduchu se pohybují v rozmezí 0,2 až 0,8 MPa. Směs abrazivních částic a vzduchu je vrhána na povrch otryskávaného materiálu pomocí trysky. Hlavní výhodou pneumatického tryskání je možnost tryskat těžko dostupná místa, proto je vhodné i pro opracovávání povrchů tvarově velmi složitých dílů. [54] [57]

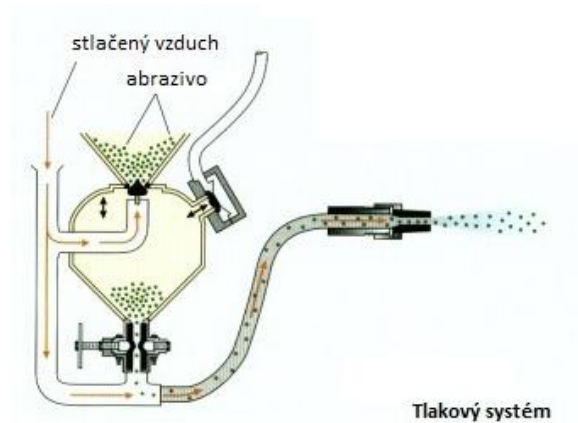
Pneumatické tryskání se dále dělí na injektorové a tlakové.

Princip injektorového způsobu tryskání spočívá v tom, že je do tryskací pistole přiváděn stlačený vzduch, což má za následek vznik podtlaku ve vzduchové komoře s abrazivním materiálem. Abrazivum je tak pod tlakem nasáváno do tryskací pistole, kde je míseno se stlačeným vzduchem. Tato směs je pak skrze trysku tryskána na opracováváný povrch. Injektorové tryskání se používá především pro menší pracovní objemy. [54] [58]



Obrázek 13 - Injektorové tryskání [58]

Při tlakovém způsobu tryskání je abrazivum smícháno se stlačeným vzduchem již v tlakové nádobě, která slouží jako zásobník abraziva. Do tlakové nádoby je přiváděn stlačený vzduch, který pak ve směšovací komoře urychlí abrazivní materiál. Skrze ventil v dolní části nádoby jde tato směs do trysky, kde expanzí vzduchu dochází k urychlení abraziva. Tlakové tryskání je až 4x účinnější než injektorové. Využívá se k odstraňování mechanických nečistot, okují a koroze. [54] [58]



Obrázek 14 - Tlakové tryskání

Mechanické tryskání

Při mechanickém tryskání jsou abrazivní částice na povrch tryskaného materiálu vrhány pomocí lopatek metacích kol. Mechanické tryskače využívají kinetickou energii rotujícího metacího kola. Na lopatky kola je přiváděno abrazivum, které je posouváno vlivem odstředivé síly na jejich kraj až „vyletí“ vysokou rychlostí (75 až 100 m/s) proti povrchu tryskaného materiálu. Velikost rychlosti, kterou je abrazivum vrženo, je dána součtem odstředivé a obvodové rychlosti. Oproti pneumatickému tryskání je dosaženo značně vyššího výkonu. Mechanické tryskání se nejčastěji používá pro čištění odlitků před povrchovou úpravou, např. před lakováním. [59] [60] [61]

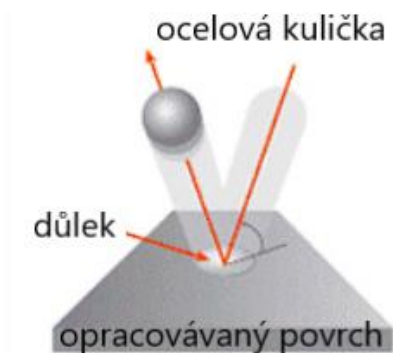


Obrázek 15 - Mechanické tryskání [62]

6.3.3 Kuličkování

Kuličkování (Shot Peening) je dokončovací operace sloužící ke zvýšení pevnosti povrchu namáhaných součástí. Typickými příklady takových součástí jsou ozubená kola, hřídele, ojnice, pružiny, lopatky turbín nebo různé komponenty pro letectví. Zpevnění povrchu součásti se provádí tryskáním kuliček z různých materiálů. Jednou z hlavních předností kuličkování je, že jeho pomocí lze zpevňovat i tvarově složité součásti. V závislosti na faktorech, jako je kvalita tryskacího média, intenzita a pokrytí, může kuličkování zvýšit únavovou životnost součásti až o 1000 %. Nevýhodou kuličkování je, že zvyšuje drsnost povrchu (čím menší jsou rozměry tryskacího média, tím vyšší jsou hodnoty drsnosti). [63] [64]

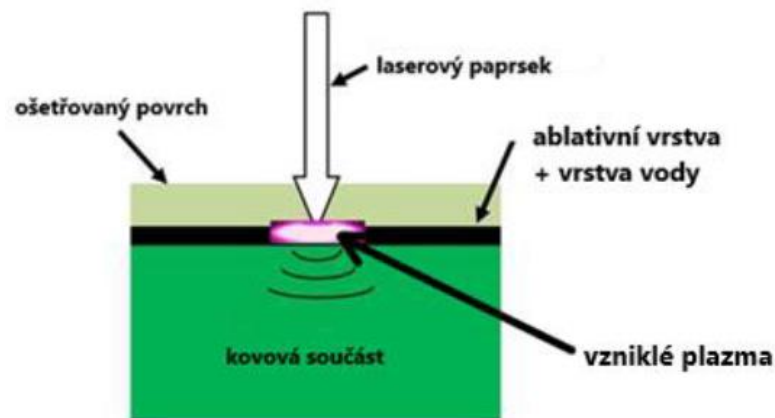
Princip technologie kuličkování spočívá v ostřelování povrchu součásti kuličkami. Kuličky dopadají na povrch s velkou rychlostí (až 150 m/s) a vyvíjejí tak na povrch tlak. V důsledku tlakového působení vznikají v povrchové vrstvě plastické deformace za studena, které vedou k mechanickému zpevnění povrchu, zvýšení jeho jakosti povrchu a k dosažení větší rozměrové přesnosti. Dá se říct, že jde o specifické tváření za studena. Každá dopadající kulička působí jako malé kladívko a vytvoří v povrchu součásti důlek. Reakcí na plastickou deformaci je vznik zbytkových napětí, která zvyšují mez únavy, odolnost proti opotřebení a korozi. Stejně jako u tryskání, rozlišujeme kuličkování pneumatické (injektorové a tlakové) a mechanické. Jako tryskací média se pro technologii kuličkování používají tělíška kulového tvaru z oceli, keramiky nebo skla. [57] [65] [66]



Obrázek 16 - Princip kuličkování [67]

Důležitými parametry při kuličkování jsou úhel dopadu (50-80 stupňů) a dopadová rychlost kuliček, jejich tvrdost, hmotnost, průměr, doba otryskávání a míra pokrytí (nesmí být méně než 100 %). Míra pokrytí znamená velikost původní plochy povrchu, která je po kuličkování pokryta důlky. Dopadová rychlost závisí na velikosti tlaku (tlaková a injektorová zařízení), resp. odstředivé síly (metací zařízení). Tvrdost kuliček je dána materiálem, ze kterého jsou zhotoveny. [64] [68] [69]

Moderní metodou kuličkování je tzv. Laser Peening, tedy kuličkování, které na místo „klasického“ tryskacího média využívá nanosekundové laserové pulzy. Působením laseru na součást se opařuje část ablativní vrstvy, čímž vzniká plazma. Vzniklé plazma expanduje a má za následek vznik silné kompresní rázové vlny, která vytváří zbytková napětí až do hloubky 12 mm (oproti tomu při „klasickém“ kuličkování vznikají napětí do hloubky max. 0,25 mm). Únavová pevnost je tak při Laser Peeningu ve srovnání s konvenčními metodami kuličkování cca desetkrát větší. Další výhodou je možnost přesného zvolení ošetřované oblasti (můžeme zvolit třeba jen malou část komponenty, na kterou chceme technologii aplikovat). Kuličkování laserem se používá pro ošetření jak ocelí, tak slitin titanu, niklu a hliníku. [70] [71]



Obrázek 17 - Princip technologie Laser Peening [72]

6.3.4 Omílání

Omíláním se dosahuje úpravy povrchu vlivem otírání omílacích prostředků o výrobek. Omílání se uplatňuje při vyhlazování povrchu před pokovením, odstraňování ostřin, zaoblování hran, odstraňování okují, leštění a zpevňování povrchu nebo vyhlazení třecích ploch. [73]

Omílací zařízení je tvořeno ocelovým bubnem, zvnitřku pokrytého pryží či plastem. Buben mohou mít tvar válce, kuželu nebo hranolu. Buben buď rotuje kolem své osy, nebo vibruje, a podle toho rozdělujeme omílání na rotační a vibrační. Rotační omílání se uplatňuje především u menších dílů vyráběných ve velkých sériích. Oproti vibračnímu omílání je při tomto způsobu omílání dosahováno nižších výkonů. [73]



Obrázek 18 - Rotační omílací zařízení [74]

Omílací prostředky lze rozdělit na přírodní a umělé. Mezi přírodní omílací prostředky patří např. dřevěné piliny nebo drcená žula. Umělé omílací prostředky se vyznačují vyšší životností oproti přírodním. Do této skupiny patří např. oxid hlinitý, karbid křemíku nebo kuličky z kalené oceli. [73]

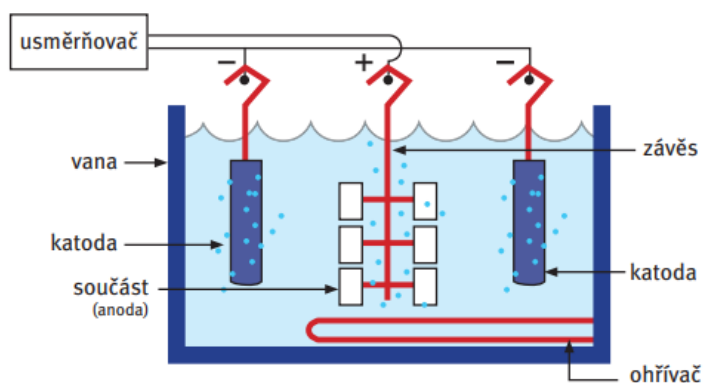
Omílání může probíhat buď za sucha, nebo v kapalině s chemicky aktivní látkou (chlorid sodný, popř. nitrid sodný) v případě, že chceme vytvořit pasivační vrstvu pro zabránění koroze. Výsledná jakost povrchu součásti je dána délkou omílání (typicky 2 až 6 hodin), druhem omílacího prostředku, materiálem a tvarem součásti. [73]

Omílání se provádí především pro velký objem materiálu (do bubnu omílačky se vloží velký počet součástí).

6.3.5 Elektrolytické leštění

Elektrolytické leštění je úprava povrchu součásti pomocí elektrického proudu. Cílem této dokončovací operace je snížení mikrodrsnoty povrchu, aby na něm neulpávaly nečistoty. Z tohoto důvodu se nachází využití především ve farmaceutickém, potravinářském a elektrotechnickém průmyslu. Elektrolytické leštění též zlepšuje odolnost proti korozi a žáruvzdornost, a naopak snižuje tření. [75]

Součást je ponořena do elektrolytu (roztok kyseliny sírové, popř. ortofosforečné) v plastové vaně, přičemž je z jejího povrchu působením elektrického proudu odebírán kov a ve formě iontů přechází do roztoku. Do vany jsou umístěny desky z mědi, olova nebo korozivzdorné oceli, připojené na záporný pól zdroje (katoda). Součást, která má být leštěna, je připevněna na měděné, olověné nebo titanové závěsy, které jsou připojeny na kladný pól zdroje (anoda). Střídavý elektrický proud ze zdroje je usměrněn na stejnosměrný, přičemž proudová hustota bývá v rozmezí 5 až 25 A/dm². Množství odebíraného kovu je dáno proudovou hustotou, dobou trvání procesu (obvykle 2 až 20 minut) a koncentrací elektrolytu. [76] [77]



Obrázek 19 - Princip elektrolytického leštění [76]

6.3.6 Povlakování

Povlakováním dosahujeme u součásti lepšího vzhledu, mechanických vlastností a odolnosti proti působení chemikálií a vysokých teplot. [78]

Chemické pokovování

Chemické pokovování se provádí bez vnějšího zdroje elektrického proudu. Na povrchu součásti (méně ušlechtilý kov) se vlivem rozdílu potenciálů vyloučí ušlechtlejší kov. Běžně se k chemickému pokovování využívají měď, cín, nikl, chrom, stříbro, zlato. Chemickým pokovováním lze docílit rovnoměrné tloušťky pokovení s vysokou hloubkovou účinností (cca 10 mikrometrů). Nevýhodou je relativně pomalé vylučování kovu. [79]

Galvanické pokovování

Galvanické pokovování probíhá za působení stejnosměrného elektrického proudu. Součást, již chceme pokovit, je zapojena jako záporná elektroda (katoda). Kladná elektroda (anoda, např. měď) je z kovu, kterým se pokovuje. Obě elektrody jsou ponořeny do elektrolytu, kterým může být např. síran měďnatý. Po připojení ke zdroji dochází na anodě k oxidaci, měďnaté kationty přechází do roztoku a na katodě probíhá jejich redukce na měď. [79] [80]

Pokovování ve vakuu

Pokovování ve vakuu spočívá v napařování, popř. napařování kovů (typicky hliník) na povrch součásti při nízkém tlaku za teplot, při kterých dochází k vypařování kovu. Hodnoty tlaku se pohybují v rozmezí 10^{-5} až 10^{-3} Pa. Tloušťka nanesené vrstvy dosahuje hodnot od 0,1 do 1 mm. [79]

6.3.7 Lakování

Výtisky se lakují za účelem ochrany (vůči kyselinám, slunečnímu záření, povětrnostním podmínkám) nebo dosažení lepšího vzhledu. Nanesením nátěrové hmoty vzniká na povrchu součásti film, který je po zaschnutí velmi pevný. Povrch součásti musí být nejprve odmaštěn a pak se na něj stříká nátěrová hmota v několika vrstvách o konečné tloušťce cca 30-40 mikronů. Před nanesením další vrstvy se díl suší při teplotě cca 80 °C. [78]

7 Postprocessing polymerních výtisků

Postprocessing polymerních výtisků se do jisté míry shoduje s postprocessingem výtisků kovových. Stejně jako u kovových dílů lze povrch plastových výtisků ošetřit broušením, omíláním a tryskáním. Z povlaků je využíváno pokovování chemické a galvanické nebo pokovování ve vakuu. Samozřejmě je i lakování a odstraňování podpor (mechanicky i chemicky).

7.1 Broušení plastů

Polymerní výtisky brousíme především proto, abychom odstranili zbylé kousky podpůrné konstrukce. Dalším cílem broušení je vyhlazení vrstev, aby byly méně viditelné, což zlepší výsledný estetický dojem. Nejvíce rozšířené je ruční broušení smirkovým papírem. Hrubost (zrnitost) smirkového papíru volíme s ohledem na výšku vrstvy a výskyt vad. Větší vady a nerovnosti nejprve obrousíme nahrubo papírem s nižší zrnitostí. Pro následné zabroušení a vyhlazení použijeme jemnější papír. Většinou se používá metoda broušení za mokra, protože se tím eliminuje hromadění tepla v důsledku tření ploch o sebe a zároveň nedochází k tak výraznému ulpívání brusných zrn na povrchu výtisku. [81]

7.2 Chemické vyhlazování

U polymerních výtisků jsou však používány i další specifické metody pro úpravu povrchu. 3D díly z plastu jsou v praxi vyhlazovány působením chemikálií, případně jejich parami. Princip spočívá v naleptání součásti, čímž je dosaženo hladšího a lesklejšího povrchu. Použitá chemikálie se liší dle materiálu, ze kterého byla součást vytisknuta. [82]

Pro vyhlazení výtisků z ABS a ASA se využívá aceton. Lze to udělat vícero způsoby. Jednu z možností je vložit součást do uzavíratelné nádoby a obklopit ji ubrousky/látkovými kapesníky, které jsou napuštěné acetonem. Aceton se postupně vypařuje a páry naleptávají povrch součásti. Proces vypařování lze urychlit zahříváním nádoby. S teplotou a dobou vyhlazování je třeba experimentovat, obojí se odvíjí od velikosti výtisku. Je také možné součást přímo namáčet do acetonu nebo aceton na její povrch nanášet např. štětečkem. [82] [83]

3D tištěné díly z PETG se nejčastěji vyhlazují pomocí dichlormetanu (CH_2Cl_2), který je na povrch součásti aplikován štětečkem. Obdobně jako u acetonu, lze využít i dichlormetanové páry. Je třeba dbát zvýšené bezpečnosti při práci (mít rukavice, brýle a adekvátní ochranu dýchacích cest), jelikož dichlormetan je velmi toxický a jeho inhalování je zdraví škodlivé. [82]

Chemické vyhlazení PLA je problematictější, jelikož po aplikaci většiny volně dostupných rozpouštědel rychle dochází k degradaci výtisků. Stejně jako u PETG je možné na výtisky z PLA nanášet štětečkem dichlormetan, popř. nechat působit jeho páry. Pokud se chceme vyhnout riziku degradace výtisku, je vhodnější pro vyhlazení součástí z PLA použít resin, který na povrch součástí nanese štětečkem. Resin dodává výtiskům lesklý povrch, vyplní póry a také zvyšuje únavovou pevnost výtisků. Resin je po nanesení každé vrstvy nutné vytvrdit UV světlem. Během práce s resinem je vhodné používat rukavice. [84] [85]

7.3 Tmelení

Tmelení je dokončovací operace spočívající v nanášení tmelícího materiálu na bázi akrylu či silikonu za účelem vyplnění pórů a vyhlazení nerovností výtisku. Materiál tedy není odebírán, nýbrž přidáván, čímž je ve výsledku dosaženo hladkého povrchu. Tmel se po nanesení nechá zatvrdnout a poté se případně zbrousí. Pokud je potřeba, nanese se další vrstva a proces se opakuje. [86] [87]

8 Praktická část

Praktická část bakalářské práce je věnována návrhu a tisku plastové komponenty. Začátek se bude zabývat tvorbou jednoduchého 3D modelu v programu Autodesk Inventor Professional 2022 a následným tiskem, včetně nastavení vhodných tiskových parametrů. Následovat bude několik metod postprocessingu. Sledovaným parametrem bude kvalita povrchu a čas potřebný k jejímu dosažení.

8.1 Návrh modelu

Obecně je nutno při tvorbě každého modelu sledovat několik základních pravidel.

Tloušťky stěn

Aby byly zachovány mechanické vlastnosti stěn modelu, měla by tloušťka stěny odpovídat alespoň dvojnásobku průměru trysky. V opačném případě hrozí nedostatečné propojení na sebe položených vrstev, což se projeví jak nízkou pevností, tak nekvalitním povrchem, nebo dokonce zhroucením celé stěny. Pokud je takováto stěna potřeba, je vhodné ji při tisku zesílit a následně zesílenou část odstranit. [88]

Výčnělky, špičky a ostré přechody

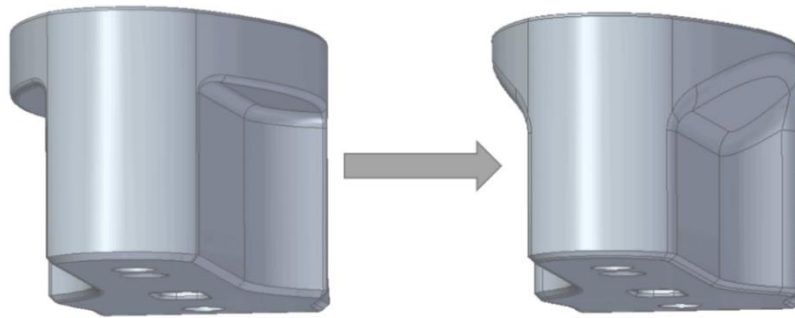
Je vhodné se vyvarovat velkým výčnělkům vystupujících z modelu. Kvůli jejich orientaci v prostoru nebudou schopny plnit svůj účel a s velkou pravděpodobností se i při malém zatížení ulomí. Takovéto prvky je vhodné tisknout zvlášť a do modelu následně dolepit. Stranová vůle by měla odpovídat alespoň polovině průměru trysky (v tomto případě záleží na kvalitě kalibrace tiskárny). [88]

Dalším problémovým místem jsou špičky, na kterých může docházet ke špatnému spojení vrstev a jejich následnému praskání. Zde je opět možnost místo lokálně zesílit a po tisku zesílení odstranit. [88]

Při tvorbě modelu je vhodné se vyhnout ostrým přechodům. Tyto přechody jsou koncentrátory napětí a může v nich docházet k porušení modelu. V takovém případě je vhodné ostrou hranu zaoblit. [88]

Převisy

Je třeba počítat, že tisk převisů má své limity. Obecně, za předpokladu tisku bez podpor, nelze tisknout převis větší než 45°, protože by došlo ke zhroucení konstrukce. Pokud je to možné, je vhodné se převisu vyhnout už při tvorbě modelu v CADu. Za předpokladu, že je převis v modelu nutný, je vhodné, aby byl postupný. [88]



Obrázek 20 - Varianta úpravy převisu [88]

Problém s převisy se dá řešit i orientací modelu při samotném tisku, popřípadě přidáním podpor, které však zhorší kvalitu povrchu modelu a prodlouží tiskový čas.

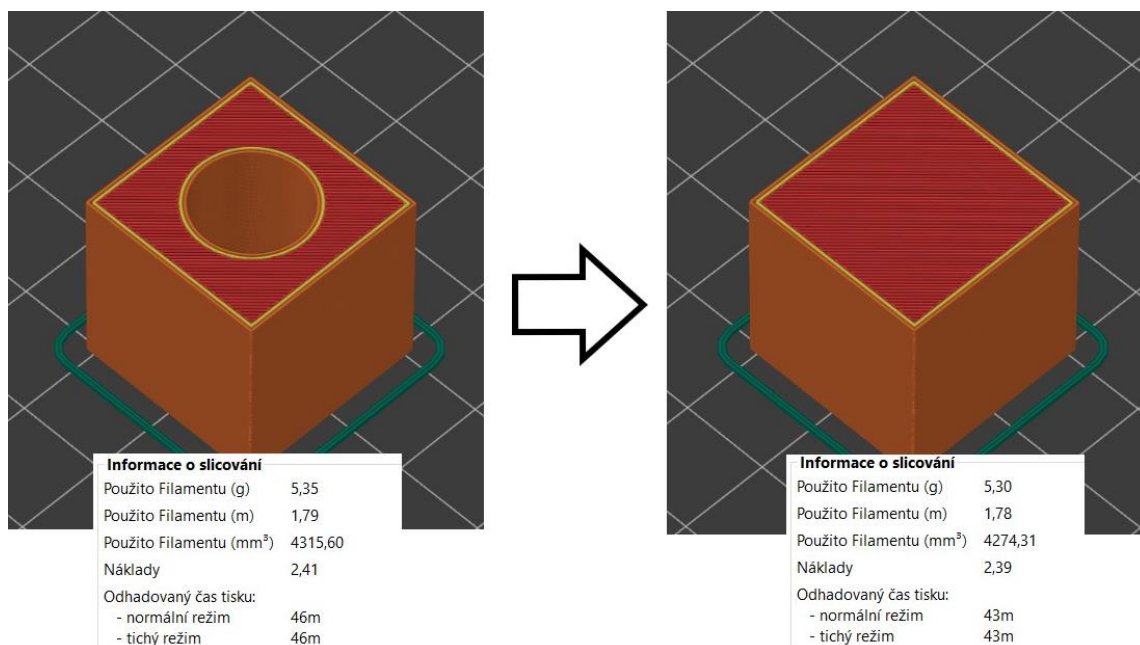
Tolerance geometrie a rozměrů

Rozměrová a geometrická tolerance vždy závisí na kvalitě dané tiskárny a úrovni její kalibrace. V případě geometrické tolerance se otvory ve vodorovném směru mají tendenci deformovat a tím vznikají elipsy. Co se týče rozměrů dílu je třeba počítat s teplotní roztažností materiálu. Například pro trysku o průměru 0,4 mm bude mít extrudované vlákno průměr cca 0,45 mm. Proto, pokud chceme tisknout krychli o rozměru hrany a , je třeba vytvořit model, který má hranu o 0,1 až 0,2 mm kratší. V případě, že spojujeme dva a více dílů k sobě, musíme též počítat s touto tolerancí. U pohyblivých spojů je to ještě o něco více, zpravidla 0,3 mm. [88]

Vliv geometrie na tiskový čas

Samozřejmě už při tvorbě modelu musíme myslet na to, jak jeho geometrie ovlivní dobu tisku. Velkou část doby tisku tvoří podpory, proto se jim již při navrhování modelu snažíme vyhnout. Nicméně další nezanedbatelný vliv mají velké dutiny a žebrování, které se typicky objevují u vstříkovaných dílů. Důvodem je, že vnější stěny se obvykle tisknou pomaleji než vnitřní výplň. Tudíž místo použití dutin a žeber je vhodnější nahradit je plným dílem. Spotřeba materiálu se nebude příliš razantně odlišovat, pokud tiskneme s nějakým rozumným procentem vnitřní výplně (do cca 20 %). [88]

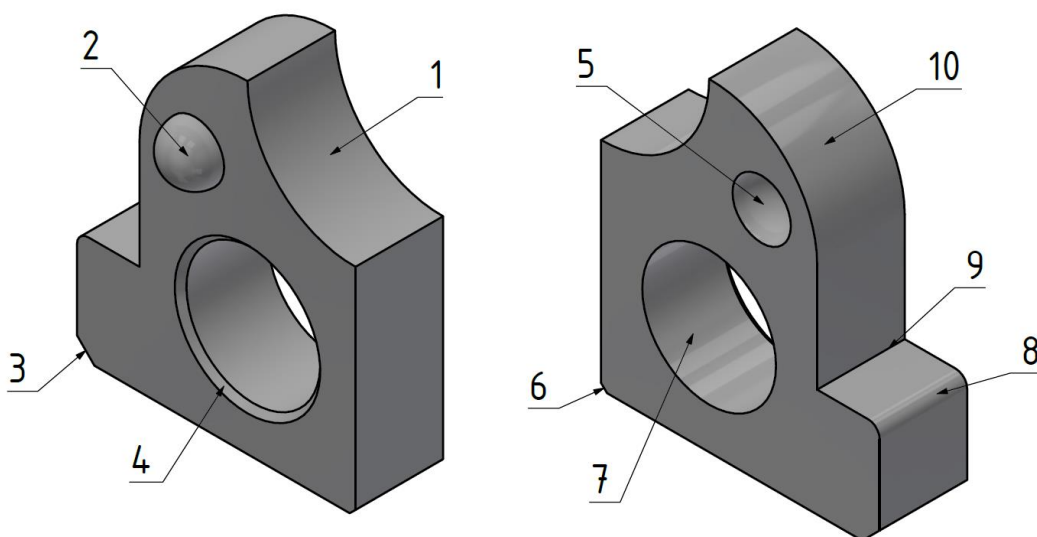
Jak je jasně vidět na obrázku níže (Obrázek 21), odebráním dutiny z krychle o velikosti hrany 22 mm, jsme ušetřili jak 3 minuty tiskového času, tak v tomto případě dokonce i trochu materiálu (0,05 g). Úspora se nemusí zdát nějak výrazná, ale při tisku více kusů, případně při tisku rozměrnějšího modelu, se bude jednat o výrazný rozdíl.



Obrázek 21 - Rozdíl doby tisku modelu s dutinou a plného modelu

Tvorba modelu se řídila výše uvedenými pravidly. Model byl navržen tak, aby obsahoval několik různých prvků (např. zkosení, kruhová díra, zaoblení, prohlubeň), na nichž se následně bude hodnotit, jak na nich konkrétní metoda postprocessingu zafungovala, popř. do jaké míry změnila jejich geometrii.

Výsledný model, vytvořený v Autodesk Inventor Professional 2022, ukazuje obrázek níže (Obrázek 22).



Obrázek 22 - Výsledný model

Prvky, na kterých bude sledován vliv různých metod postprocessingu, jsou označeny číselně:

1. Konvexní oblouk velký
2. Polokoule vypouklá (vnější)
3. Zkosení velké
4. Zkosení na díře
5. Polokoule vydutá (vnitřní)
6. Zkosení malé
7. Kruhová díra
8. Konkávní oblouk malý
9. Vnitřní hrana
10. Konkávní oblouk velký

8.2 Tisk

Kvalita výtisku je též dána správným nastavením tiskových parametrů. Samozřejmostí je mít správně kalibrovanou tiskárnu (stranově, výškově, posuv materiálu). Kvalitu výsledného tištěného dílu nejvíce ovlivňuje orientace, výška vrstvy, hustota výplně, počet perimetrů, teplota a rychlost tisku.

Orientace

Orientace modelu má vliv na mechanické vlastnosti součásti, dobu tisku a případný postprocessing. Abychom optimalizovali mechanické vlastnosti (především pevnost a houževnatost), snažíme se díl orientovat tak, aby se napětí při zatížení součásti přenášelo po vrstvách. Vhodnou orientací se též snažíme eliminovat použití podpor, které zhoršují kvalitu povrchu součásti, prodlužují tiskový čas a následný postprocessing. [88]

Kvalita povrchu

Obecně je kvalita povrchu nejlepší na svislých stěnách, naopak nejhorší je povrch v případě ploch s velkým převisem. Kvalitu povrchu ovlivňují již zmíněné podpory, ale mnohem větší vliv má průměr trysky, a s tím spojená výška vrstev. Čím menší trysku zvolíme, tím menší výšku vrstvy můžeme použít, což bude v důsledku znamenat dosažení hladšího a přesnějšího povrchu, avšak za cenu prodloužení doby tisku. Naopak při použití velké trysky a velké výšky vrstvy se doba tisku výrazně zkrátí, nicméně povrch bude hrubší a bude vyžadovat více postprocessingu. Jako optimální kompromis, se kterým se v praxi nejvíce setkáváme, se jeví tryska o průměru 0,4 mm a výška vrstvy 0,2 mm. [88] [89]

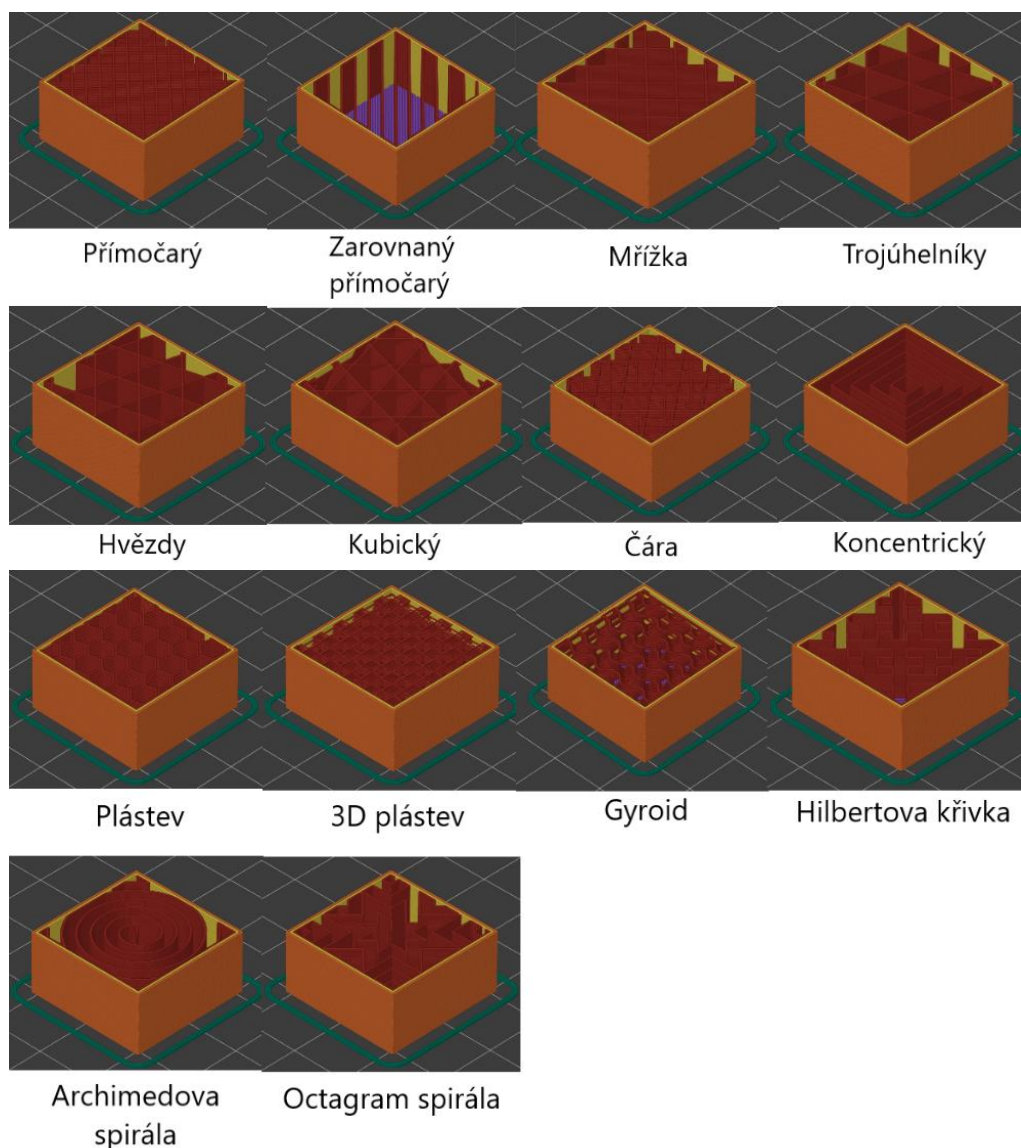
Perimetry a výplň

Perimetry a vnitřní výplň mají vliv na mechanické vlastnosti (především pevnost) výtisku. Počet perimetrů udává, kolikrát objede tryska vnější hranu modelu, a tudíž jak bude tlustá stěna modelu. Jednoduše se dá říct, že čím více perimetrů nastavíme, tím bude

stěna tlustší a bude mít vyšší pevnost. Pro běžnou praxi se používají 3 perimetry. [89] [90]

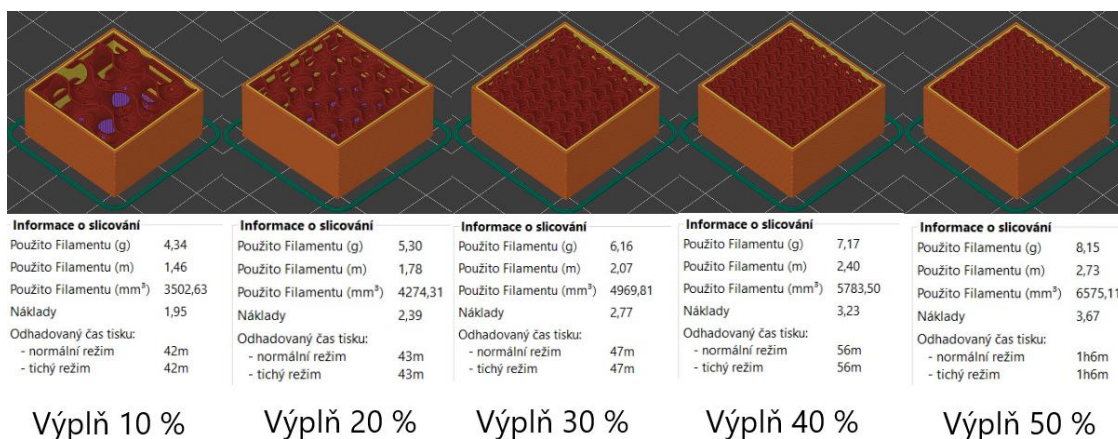
Výplň je struktura, která tvoří vnitřek modelu. Jednotlivé struktury se od sebe odlišují tvarem a svými mechanickými vlastnostmi. [91]

Program na slicování modelů Prusaslicer rozeznává až 16 druhů vnitřních výplní. Na obrázku níže (Obrázek 23) je ukázka 14 druhů výplní – zbylé 2 výplně jsou pouze adaptací kubické výplně (na obrázku nelze rozeznat rozdíl).



Obrázek 23 - Ukázka výplní z Prusaslicer 2.4.1

Klíčovým parametrem výplně je její hustota, která se udává jako procentuální vyplnění vnitřního prostoru modelu. Se zvětšujícím se procentem vnitřní výplně dosáhneme lepších mechanických vlastností, ale prudce roste spotřeba tiskového materiálu a tiskový čas. Jako optimální procento výplně se uvádí 20 až 30 %. [91]



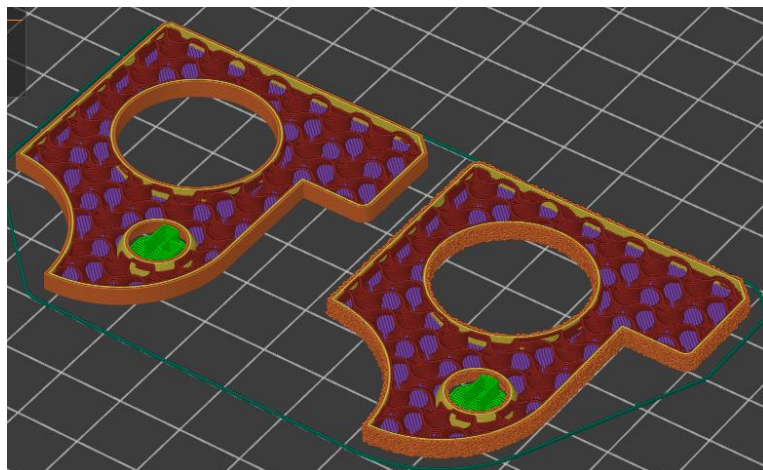
Obrázek 24 - Porovnání spotřeby materiálu a tiskového času pro různé procentuální hustoty výplně

Teplota a rychlost tisku

Teplota tisku se skládá z teploty trysky a teploty podložky. Platí, že teplota trysky je vždy vyšší nebo rovna teplotě tavení tiskového materiálu. Jde o důležitý parametr, jehož nedodržení má za následek nekvalitní výtisk, a to nejen z pohledu vizuálních, ale především mechanických vlastností. Nejnižší teploty trysky, bereme-li v úvahu nejpoužívanější materiály pro technologii FDM, jsou u PLA, a to v rozmezí 210 až 215 °C (záleží na konkrétní značce), nejvyšší naopak u PC, kolem 275 °C. Podložka se zahřívá, z důvodu lepšího přichycení první vrstvy modelu (u PLA to však není nezbytně nutné). Jednotliví výrobci pro své materiály udávají doporučené teplotní rozmezí trysky a podložky. [92]

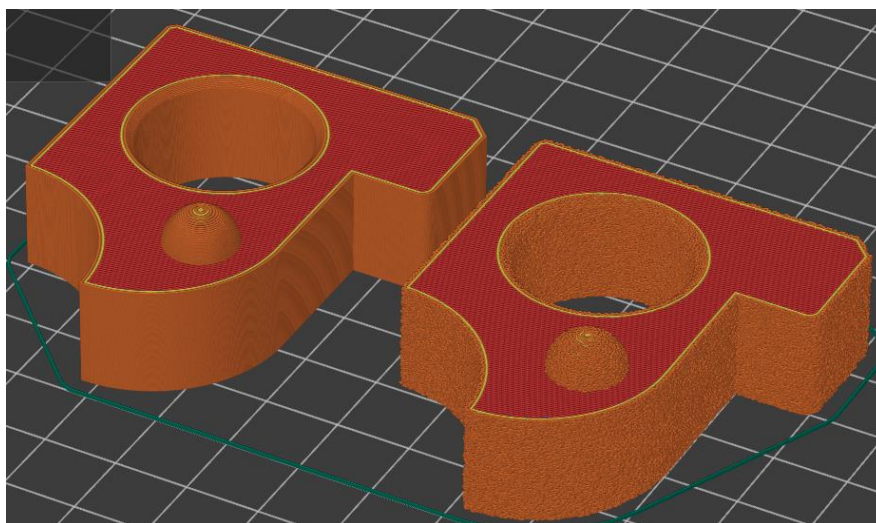
Rychlost, s jakou se model tiskne, je svázána s tiskovou teplotou trysky. Při vyšších rychlostech tisku je nutné nahřát trysku na vyšší teplotu, jelikož materiál musí být podáván rychleji a zároveň mít optimální tekutost. [92]

Tiskové parametry modelu byly nastavovány v programu PrusaSlicer (verze 2.4.1). Model byl orientován „na plocho“ s ručně nakreslenými podporami v místě 5 - polokoule vydutá (vnitřní), aby při tisku nedošlo k její deformaci nebo případnému zhroutilí.



Obrázek 25 - Ručně nakreslené podpory v místě 5

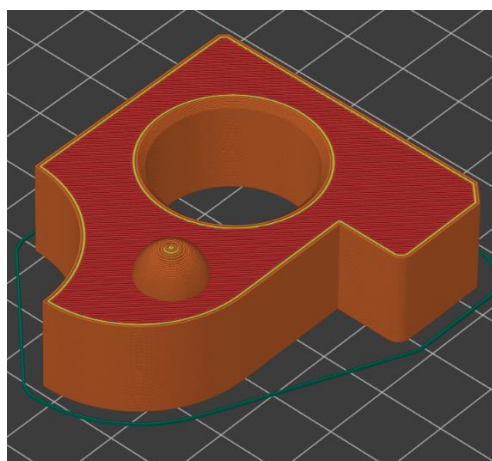
Navržené těleso bylo tištěno v celkovém počtu osmnácti kusů ve dvou sériích, devět hladkých a devět členitých, z PLA a z materiálu ASA byly vytištěny čtyři členité. V první sérii z PLA byl u modelů ponechán standardní povrch. Ve druhé sérii z PLA byla u nastavení modelů použita funkce „členitý povrch“, která způsobila drsnější povrch oproti výtiskům z první série.



Obrázek 26 - Porovnání povrchu modelů první a druhé série

Obě série byly tištěny tryskou o průměru 0,4 mm. Tato velikost trysky byla zvolena jako optimální kompromis mezi kvalitou povrchu a rychlostí tisku. Modely byly tištěny na dva perimetry, protože se nejedná o funkční díly. Hlavní sledovanou metrikou je kvalita povrchu, a tak nebylo potřeba více perimetrů. Hustota výplně byla 15 % a jako typ výplně byl zvolen gyroid z důvodu, že optimálně přenáší napětí ve všech směrech. [91]

Devět párů (9 hladkých a 9 členitých) modelů bylo tištěno z materiálu PLA, čtyři členité vzorky byly zhotoveny z ASA. Tisková teplota u PLA byla na trysce 210 °C, teplota podložky byla nastavena na 60 °C. Teplota trysky pro modely z ASA byla 260 °C, podložka byla vyhřívána na 110 °C.



Použito filamentu (g): 11,27
Tiskový čas: 1h 27min

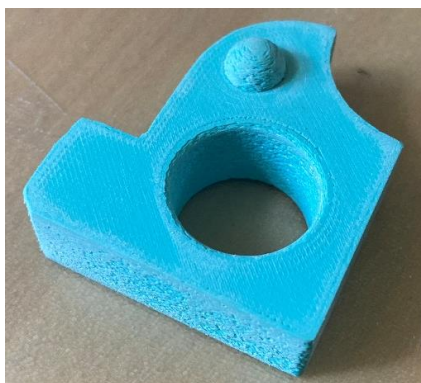
Obrázek 27 - Doba tisku a spotřeba materiálu na jeden model – první série

8.3 Postprocessing

Na výtisky z PLA bylo aplikováno ruční broušení, omílání, tmelení, vyhlazování resinem, tryskání a kuličkování. Výtisky z ASA byly vyhlazovány acetonovými parami. Jeden pár výtisků z PLA a jeden vzorek z ASA sloužily jako referenční.

8.3.1 Broušení

Broušení výtisků z PLA probíhalo za mokra, jako brusivo byl použit smirkový papír. Hladké výtisky byly broušeny papírem se zrnitostí F200 po dobu 20 minut. Na výtisky s členitým povrchem byl použit smirkový papír F120, čas broušení činil 10 minut. Členité výtisky byly broušeny hrubším papírem po kratší čas, aby zcela nedošlo k odstranění členitostí (hrbolků), které byly úmyslně vytvořeny.



Obrázek 28 - Členitý vzorek po broušení

8.3.2 Omílání

K omílání byla použita omílačka vlastní výroby, sestávající z 3D tištěného rámu, 12 V motoru a zavařovací sklenice. Točivý moment je z motoru přenášen na sklenici pomocí páru ozubených kol, které jsou též vyrobeny 3D tiskem. Jako omílací médium byl použit karbid křemičitý SiC100. Omílány byly dva páry PLA výtisků – jeden pár 2 hodiny a druhý pár 4 hodiny. Před samotným omíláním byly výtisky broušeny (viz. kapitola 8.3.1).



Obrázek 29 - Hladký vzorek po broušení (hnědé skvrny) a omílání (tmavé hrany vzorku)



Obrázek 30 - Omílačka vlastní výroby

8.3.3 Tmelení (sprej)

Na jeden pár součástek (jednu hladkou a jednu členitou) z PLA byl nanesen tmele ve spreji (Dupli-Color). U hladkého výtisku byly nanесeny 2 vrstvy, u členitého 5. Každá vrstva byla vytvrzována (sušena) 3 hodiny volně na vzduchu. Po vytvrzení byla každá vrstva broušena za mokra smirkovým papírem F600 pro odstranění přebytečného tmelu a následně cca 30 minut usychala na vzduchu. Před samotným tmelením byly výtisky broušeny (viz. kapitola 8.3.1).



Obrázek 31 – Vzorek s hladkým povrchem po aplikaci tmelu ve spreji

8.3.4 Tmelení dvousložkovým tmelem

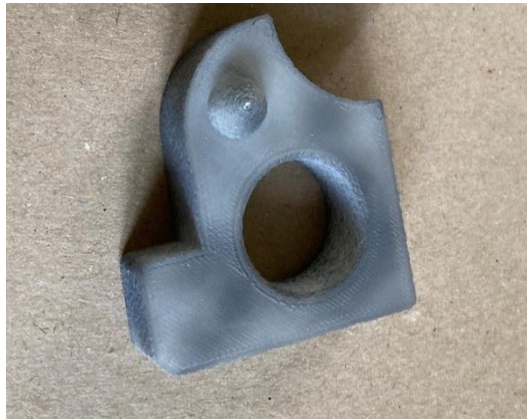
Dvousložkový tmel se obecně skládá z tmelící složky a tvrdidla (2 až 4 % směsi). Byl použit tmel Presto 2K. Na hladkou i členitou součást z PLA byl nanášen v jedné vrstvě špachtlí. Při nanášení tmelu bylo nutné pracovat rychle, jelikož tmel značně ztvrdne už po cca minutě. Nanesená vrstva tvrdla 25 minut a následně bylo provedeno obroušení přebytečného tmelu smirkovým papírem F200 za mokra. Po broušení byla součást opláchnuta vodou a nechala se volně sušit cca 30 minut. Před samotným tmelením byly výtisky broušeny (viz. kapitola 8.3.1).



Obrázek 32 – Členitý vzorek po aplikaci dvousložkového tmelu (před obroušením)

8.3.5 Tryskání

Na jeden pár PLA bylo aplikováno pneumatické tryskání. Hladká i členitá součást byly tryskány 15 minut. Jako abrazivo byl použit korund (30-70 μm). Díly před aplikací tryskání byly broušeny smirkovým papírem (viz kapitola 8.3.1).



Obrázek 33 - Členitý vzorek po tryskání

8.3.6 Kuličkování

Jeden pár PLA výtisků byl ošetřován kuličkováním po dobu 15 minut. Byl použit pneumatický stroj a abrazivo bylo tvořeno ocelovými kuličkami (400 μm). Díly před aplikací tryskání byly broušeny smirkovým papírem (viz kapitola 8.3.1).

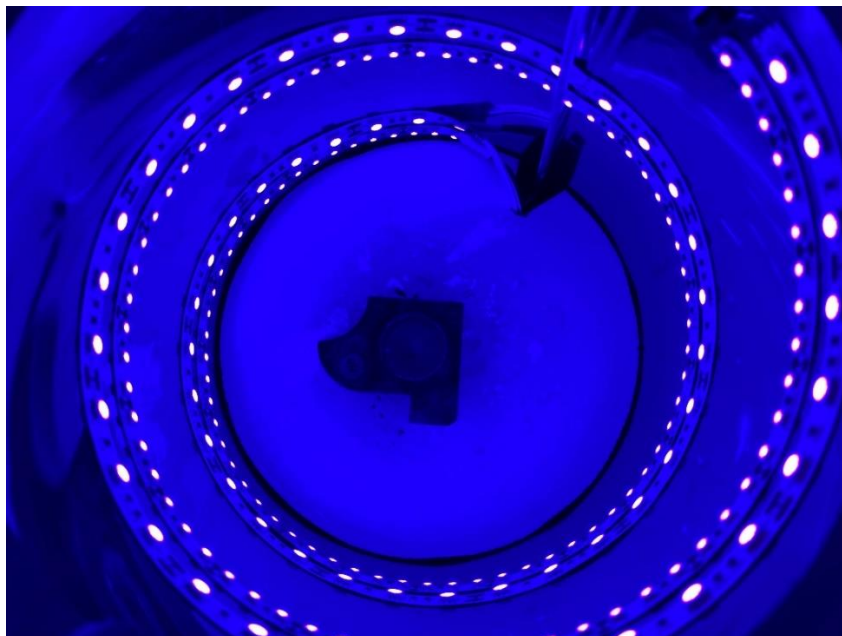


Obrázek 34 – Vzorok (členitý vlevo a hladký vpravo) po kuličkování

8.3.7 Vyhlazování resinem

Vzhledem k tomu, že chemické vyhlazování PLA v parách je na rozdíl od ABS či ASA problematické kvůli degradaci výtisků, byl k vyhlazení výtisků z PLA použit resin. Tekutý resin (CREALITY – 3D Printer Curable Standard Resin) byl na hladký i členitý díl nanášen pomocí štětečku v jedné vrstvě. Ihned po nanesení vrstvy byl resin

vytvřován po dobu 1 minuty UV světlem, aby došlo k jeho povrchovému zatvrdnutí. Jelikož resin obsahuje mastnoty, byly součásti po vytvření propláchnuty v isopropylalkoholu. Následně byly výtisky opětovně vloženy pod zdroj UV světla a vytvřovány 10 minut, aby resin zatvrdl i do hloubky (v pórech apod.). Před samotnou aplikací resinu byly výtisky broušeny (viz. kapitola 8.3.1).



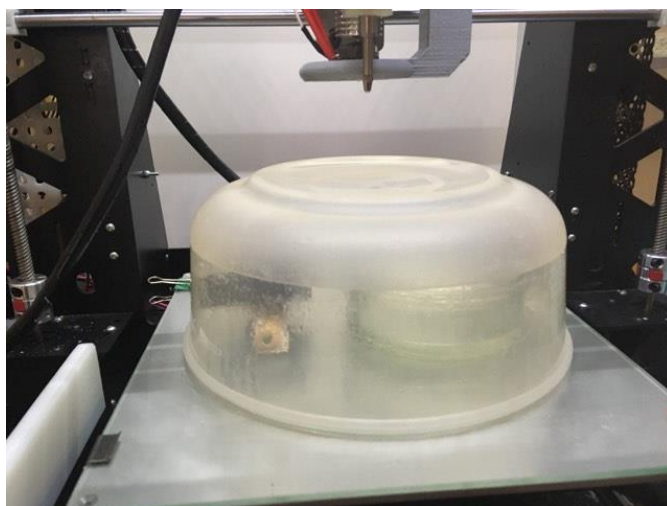
Obrázek 35 - Ukázka vytvřování vzorku po aplikaci resinu

8.3.8 Vyhlazování v acetonových parách

Chemické vyhlazování v parách acetonu bylo aplikováno na tři vzorky z ASA, jeden vzorek byl ponechán jako referenční. Pro vyhlazování v acetonových parách byl zvolen model s členitým povrchem, aby byl efekt vyhlazování více patrný. První model byl vyhlazován 30 minut ve vyhlazovačce Fakulty strojní. Druhý a třetí model byly vyhlazovány v domácích podmínkách za použití vyhřívané podložky z FDM 3D tiskárny a plastové mísy, která sloužila jako víko. Podložka byla zahřáta na 50 °C. Druhý model byl za těchto podmínek vyhlazován 90 minut, třetí 180 minut. Díly nebyly (krom odstranění podpor) před aplikací acetonových par nijak ošetřovány.



Obrázek 36 - Vzorek před vyhlazením v parách (vlevo) a po vyhlazení (vpravo)



Obrázek 37 - Vyhlazování součásti z ASA v parách acetonu

8.4 Vyhodnocení a diskuse výsledků

Tato kapitola přináší srovnání uvedených metod postprocessingu z hlediska časové a finanční náročnosti. Dále je zhodnocen výsledný efekt použitých metod postprocessingu na jednotlivé vzorky za pomoci fotografií z mikroskopu.

Srovnání použitých metod postprocessingu je pro lepší přehlednost zobrazeno v tabulce (Tabulka 10). Je důležité rozlišit čas aplikace a technologický čas. Čas aplikace znamená dobu, kterou jsem strávil prací na vzorku (broušení smirkovým papírem, nanášení tmelu). Technologickým časem se rozumí doba, po kterou jsem na vzorku přímo nepracoval, ale např. schnul tmel, působily páry acetonu apod. Jak můžeme vidět v tabulce (Tabulka 10), z hlediska času aplikace je nejnáročnější broušení (hladký vzorek z PLA 20 minut, členitý 10 minut). Co se týče technologického času, nejnáročnější je tmelení sprejem, jelikož sprej usychá poměrně dlouhou dobu (3 hodiny). Naopak nejlepší metodou postprocessingu z hlediska času aplikace je omílání (čas aplikace je takřka nulový).

Tabulka 10 - Srovnání použitých metod postprocessingu

Metoda postprocessingu	Typ modelu	Čas aplikace [min]	Technologický čas [min]	Celkový čas [min]	Přibližná pořizovací cena [kč]
Broušení	Hladký	20	0	20	15
	Členitý	10	0	10	
Tmelení sprejem	Hladký	2x 3	2x 180	366	254
	Členitý	5x 3	5x 180	915	
Tmelení dvousložkovým tmelem	Hladký	5	25	30	204
	Členitý	5	25	30	
Vyhlazování resinem	Hladký	7	15	22	1 165
	Členitý	7	15	22	
Omílání 120 min	Hladký	0	120	120	320
	Členitý	0	120	120	
Omílání 240 min	Hladký	0	240	240	320
	Členitý	0	240	240	
Tryskání	Hladký	12	0	12	100 000
	Členitý	12	0	12	
Kuličkování	Hladký	12	0	12	100 000
	Členitý	12	0	12	
Vyhlazování v acetonových parách 30 min	Hladký	x	x	x	119
	Členitý	5	30	35	
Vyhlazování v acetonových parách 90 min	Hladký	x	x	x	119
	Členitý	5	90	95	
Vyhlazování v acetonových parách 180 min	Hladký	x	x	x	119
	Členitý	5	180	185	

Součástí vyhodnocení použitých metod postprocessingu je také vyhotovení fotografií povrchu vzorků. Fotografie byly zhotoveny na mikroskopu Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie Fakulty strojní.

Na obrázcích níže (Obrázek 38, Obrázek 39) jsou pro porovnání zobrazeny povrchy referenčních vzorků, tj. vzorků, na kterých nebyl prováděn žádný postprocessing.



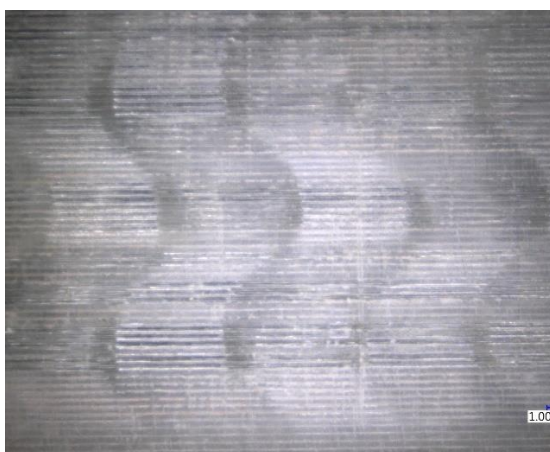
Obrázek 38 - Referenční hladký vzorek



Obrázek 39 - Referenční členitý vzorek

Broušení

Z pohledu vynaložených nákladů se ruční broušení jeví jako nejvýhodnější, jelikož je k němu zapotřebí pouze brusný papír, jehož cena činí cca 15 Kč (velikost A4). Na druhou stranu jde o metodu časově (z hlediska času aplikace) a fyzicky nejnáročnější. Naopak technologický čas je nulový.



Obrázek 40 - Povrch hladkého vzorku po broušení



Obrázek 41 - Povrch členitého vzorku po broušení

Tmelení sprejem

Z pohledu času, je tmelení sprejem nejnáročnější, protože technologický čas je velmi dlouhý, doba usychání jedné vrstvy spreje je 3 hodiny. Nicméně samotná aplikace trvá pouze několik minut. Metoda není nijak finančně nákladná, sprej lze zakoupit v řádu nižších stovek Kč (použitý sprej stál 240 Kč), brusný papír za cca 15 Kč.



Obrázek 42 - Vzorek hladký po tmelení sprejem



Obrázek 43 - Vzorek členitý po tmelení sprejem

Tmelení dvousložkovým tmelem

Opětně se jedná o finančně méně nákladnou formu postprocessingu, dvousložkový tmel se dá pořídit za necelých 200 Kč, plus cena 15 Kč za brusný papír. Avšak je třeba počítat se skutečností, že jde o „špinavější“ práci. Vzhledem k rychlému zasychání tmelu dochází k tvoření hrudek, které se na všechno lepí a jejich následné odstranění je náročné. Nicméně k dosažení kvalitního povrchu stačí nanést pouze jednu vrstvu.



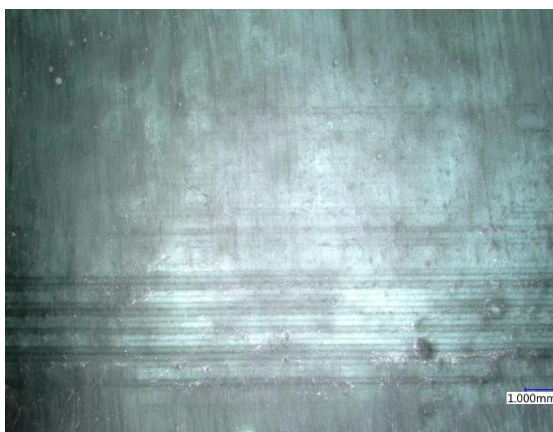
Obrázek 44 - Hladký vzorek po tmelení dvousložkovým tmelem



Obrázek 45 - Členitý vzorek po tmelení dvousložkovým tmelem

Vyhlazování resinem

Práce s resinem je „špinavá“ - resin je mastná tekutá pryskyřice s charakteristickým zápachem, je vhodné použít rukavice a ochranu dýchacích cest. Samotná aplikace štětečkem je rychlá. Ani technologický čas není dlouhý, vytvrzení trvá cca 15 minut. Na druhou stranu se jedná o finančně nákladnější metodu postprocessingu, jelikož cena za litr resinu činí 650 Kč. Navíc je potřeba započítat náklady na vytvrzovací stanici (v mém případě kovová nádoba s pásem UV LED - cca 500 Kč).



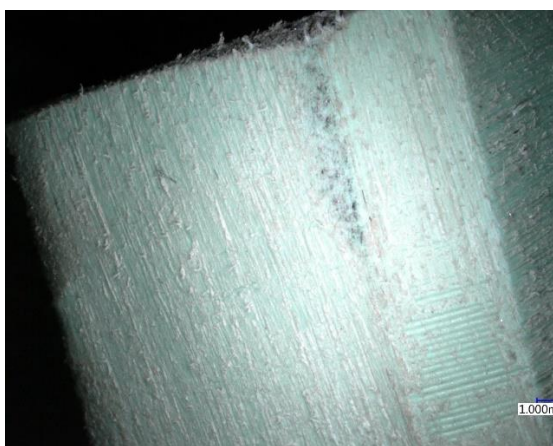
Obrázek 46 - Hladký vzorek po aplikaci resinu



Obrázek 47 - Členitý vzorek po aplikaci resinu

Omílání

Většinu nákladů tvoří cena komponentů omílačky, v mém případě 12 V motor (250 Kč). Druhou položkou, kterou je třeba do nákladů započítat, je abrazivo (cca 70 Kč). Čas aplikace je takřka nulový. Z pohledu technologického času jde o náročnější metodu, omílání trvalo 2 hodiny pro jeden pár vzorků a 4 hodiny pro druhý pár vzorků.



Obrázek 48 - Hladký vzorek po omílání (2 hodiny)



Obrázek 49 - Členitý vzorek po omílání (2 hodiny)

Tryskání a kuličkování

Vzhledem k tomu, že tryskání i kuličkování bylo prováděno na specializovaných strojích na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie, jejichž pořizovací cena se pohybuje okolo 100 000 Kč, byly tyto metody finančně nejnákladnější. Čas aplikace byl u obou metod 12 minut, šlo v souhrnu o časově i fyzicky nenáročnou práci.

Je pravda, že tryskání a kuličkování by bylo možné provést i levněji, a to za pomoci dostatečně výkonného kompresoru a pískovací pistole. Nevýhodou výše zmíněného postupu je nemožnost opakovaného použití tryskacího média. Při této metodě nejsme schopni abrazivo efektivně zachytávat, aby mohlo být znovu použito.



Obrázek 50 - Hladký vzorek po kuličkování



Obrázek 51 - Členitý vzorek po kuličkování



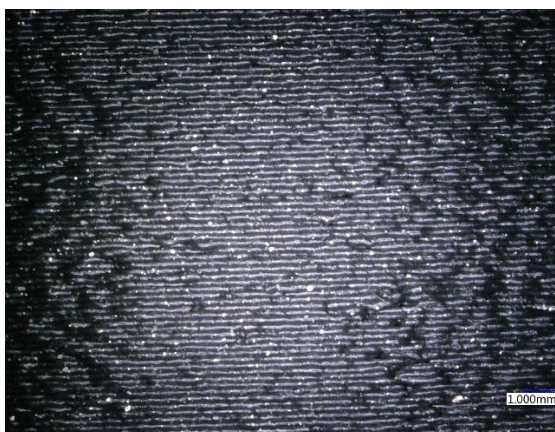
Obrázek 52 - Hladký vzorek po tryskání



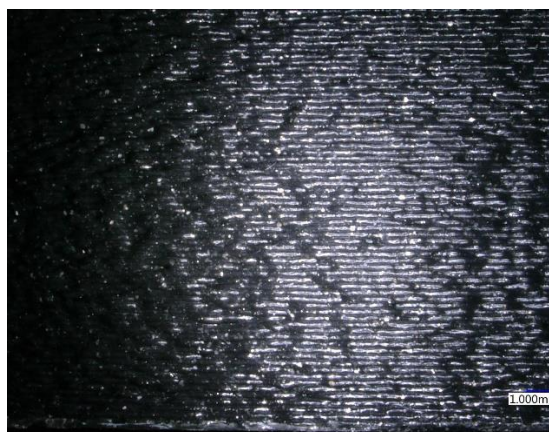
Obrázek 53 - Členitý vzorek po tryskání

Vyhlazování v acetonových parách

Vyhlazování v acetonových parách není finančně nákladné, stačí pouze aceton (120 Kč/700 ml) a topné těleso (v mém případě byla použita vyhřívaná podložka FDM 3D tiskárny). Čas aplikace je v podstatě zanedbatelný (nalití acetonu do misky a zakrytí). Technologický čas byl ovšem poměrně dlouhý, a to 30 minut, 90 minut a 180 minut.



Obrázek 54 - Členitý vzorek bez působení par (porovnávací)



Obrázek 55 - Členitý vzorek po 30 minutách v parách acetonu



Obrázek 56 - Členitý vzorek po 90 minutách v parách acetonu



Obrázek 57 - Členitý vzorek po 180 minutách v parách acetonu

Vyhodnocení

Z obrázků z mikroskopu vyplývá, že nejlepšího povrchu bylo v obou případech (hladký i členitý vzorek) dosaženo při aplikaci dvousložkového tmelu. To bylo patrně způsobeno vysokou plnivostí tmelu. Velmi podobných výsledků bylo dosaženo při aplikaci resinu. Naopak jednoho z nejhorších výsledků bylo dle fotografií dosaženo omíláním, protože efekt na sledovanou plochu byl prakticky nulový. Došlo pouze k zaoblení hran a tento rozdíl byl o maličko více patrný u vzorků, které byly omílány 4 hodiny. Další metodou, která neposkytla očekávané výsledky, bylo tmelení sprejem. Jak vyplývá z fotografií, ani po aplikaci dvou vrstev tmelu u hladkého vzorku, a pěti vrstev v případě vzorku členitého, nebylo dosaženo požadovaného hladkého povrchu. Toto by se dalo zlepšit použitím tmelícího spreje s lepší plnivostí. Broušení se dle fotografií povrchu ukázalo jako dobrý kompromis mezi pracností a výsledným efektem. Fotografie dále ukazují, že tryskání a kuličkování nemělo na vzorky zásadní vliv, došlo pouze k nepatrnému vyhlazení a ke změně barvy vzorků. Dále můžeme z fotografií vidět, že při vyhlazování v parách acetonu velice záleží na čase, po který je vzorek parám vystaven. Třicet minut se na vzorku nijak výrazně neprojevovalo, naopak při 180 minutách vzorek přišel o některé detaily a došlo ke změně některých rozměrů. Jako optimální se jeví čas mezi 90 a 120 minutami.

9 Závěr

Teoretickou část bakalářská práce tvořila rešerše pojednávající o aditivních technologiích. Informovala o jednotlivých metodách 3D tisku a používaných materiálech. Dále se rešerše zabývala problematikou postprocessingu polymerních a metalických součástí vyrobených 3D tiskem.

U metalických komponentů jsou z hlediska postprocessingu důležité zejména tepelné zpracování a povrchové úpravy, které zlepšují mechanické vlastnosti a zvyšují životnost. Bylo uvedeno, že pro ocele a hliníkové slitiny se v oblasti tepelného zpracování provádí žíhání, hipování a vytvrzování (pouze hliníkové slitiny). Co se týká povrchových úprav kovových výtisků, existuje jich celá řada – rešerše zmiňuje broušení, omílání, tryskání, kuličkování, elektrolytické leštění, povlakování a lakování. Broušení je nejrozšířenější povrchovou úpravou. Důvodem je především fakt, že se jedná o osvědčený, efektivní a zároveň finančně nenáročný proces. Broušení je vhodné zejména pro kusovou nebo malosériovou výrobu. Další rozšířenou technologií povrchových úprav je tryskání, kterým lze docílit hladkého a matného povrchu výtisku. Díky širokému sortimentu materiálů a tvarů tryskacích médií je možné docílit přesných drsností povrchů. Ve srovnání s broušením je tryskání rychlejší, ale finančně náročnější. Omíláním dosahujeme hladšího povrchu vlivem otírání omílacích prostředků o tištěnou součást. Výsledná jakost povrchu se odvíjí od času omílání, druhu omílacího prostředku, materiálu a geometrie součásti. Kuličkováním dosahujeme zvýšení pevnosti povrchu a meze únavy. Provádí se zejména u velmi namáhaných součástí, jako jsou ozubená kola, ojnice nebo lopatky turbín. Jednou z hlavních předností kuličkování je, že jeho pomocí lze zpevnovat i tvarově složité součásti. Nevýhodou je, že zároveň dochází ke zvýšení drsnosti povrchu. Mimo klasické kuličkování (tělíška kulového tvaru z oceli, keramiky nebo skla) se v současné době stále více používá Laser Peening, tzn. kuličkování za pomoci nanosekundových laserových pulzů. Laser Peeningem lze ve srovnání s klasickým kuličkováním dosáhnout cca desetinásobné únavové pevnosti. Výhodou je i možnost aplikace pouze na určitou část komponentu. Elektrolytické leštění snižuje mikrodrsnost povrchu a tím zabraňuje ulpívání nečistot. Dále zlepšuje odolnost proti korozi a žáruvzdornost, a naopak snižuje tření. Povlakováním u kovových výtisků zlepšujeme mechanické vlastnosti, odolnost vůči chemikáliím a vysokým teplotám. Častou a zároveň finančně nenákladnou povrchovou úpravou je lakování, které pomáhá součásti chránit před působením okolní atmosféry.

Postprocessing polymerních výtisků se do jisté míry shoduje s postprocessingem metalických výtisků. Stejně jako u metalických komponentů lze povrch polymerních výtisků ošetřit broušením, omíláním, tryskáním, povlakováním. Samozřejmostí je i lakování a odstraňování podpor. Vedle výše uvedeného se na polymerní výtisky aplikuje chemické vyhlazování a tmelení, které mají za cíl zlepšit kvalitu a vzhled povrchu. Tmelení spočívá v nanášení materiálu na bázi akrylu či silikonu na povrch výtisku, za účelem vyplnění pórů a vyhlazení nerovností. Po nanesení vrstvy se tmel nechá zatvrdnout a poté se případně zbrousí. Chemické vyhlazování spočívá v naleptání

povrchu součásti působením rozpouštědel nebo jejich par, v důsledku čehož dojde ke vzniku hladkého a lesklého povrchu. Použitá chemikálie se liší dle materiálu, ze kterého byla součást vytisknuta. Pro ABS a ASA se nejčastěji využívá aceton, pro PETG dichlormetan. Vyhlazování PLA běžnými rozpouštědly je vzhledem k deformaci výtisků problematické, a proto se jako nejlepší způsob jeví použití resinu, který se na povrch výtisku nanáší štětečkem a následně se nechá vytvrdit UV světlem.

V praktické části bakalářské práce bylo provedeno srovnání různých metod postprocessingu (broušení, omílání, tmelení, tryskání, kuličkování, vyhlazování resinem a vyhlazování v parách) aplikovaných na výtisky z PLA a ASA, vyrobených technologií FDM. Cílem bylo porovnat použité metody z hlediska finanční a časové náročnosti. Součástí praktické části také bylo zhodnocení dosažené kvality povrchu za pomoci fotografií z mikroskopu. Z hlediska času aplikace vyšlo jako nejnáročnější broušení (hladký vzorek 20 minut, členitý 10 minut). Technologický čas byl nejdelší při tmelení sprejem, což se vzhledem k dlouhé době usychání spreje (3 hodiny) dalo očekávat. Naopak nejkratší čas aplikace (takřka nulový) mělo omílání. Z fotografií pořízených mikroskopem vyplynulo, že nejlepšího povrchu bylo v obou případech (hladký i členitý vzorek) dosaženo při aplikaci dvousložkového tmelu. To bylo patrně způsobeno vysokou plnivostí tmelu. Velmi podobných výsledků bylo dosaženo při aplikaci resinu. Jen malý vliv na kvalitu povrchu mělo omílání, tmelení sprejem, tryskání a kuličkování. Broušení se dle fotografií povrchu ukázalo jako dobrý kompromis mezi pracností a výslednou kvalitou povrchu. Dále fotografie ukázaly, že při vyhlazování v parách acetonu velmi záleží na čase, po který je vzorek parám vystaven. Třicet minut se na vzorku nijak výrazně neprojevovalo, naopak po 180 minutách už u vzorku došlo ke ztrátě některých detailů a změně rozměrů. Jako optimální se pro vyhlazování v parách acetonu jevil čas kolem 90 až 120 minut.

10 Bibliografie

- [1] *WHAT IS ADDITIVE MANUFACTURING? DEFINITION, TYPES AND PROCESSES* [online]. Velká Británie: TWI, - [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-additive-manufacturing#HowDoesAdditiveManufacturingWork>
- [2] *What is additive manufacturing?* [online]. USA: GE Additive, - [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
- [3] *The additive manufacturing process* [online]. Nizozemsko: Hubs, - [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-process/>
- [4] *The advantages of 3D printing* [online]. Nizozemsko: Hubs, - [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing/>
- [5] *The Free Beginner's Guide: 3D Printing Benefits & Value* [online]. -: 3D Printing Industry, - [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/#07-benefits-value>
- [6] *Will 3D printing replace traditional manufacturing? The advantages of 3D printing* [online]. Nizozemí: HUBs.com, - [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: https://www.hubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing/?fbclid=IwAR1_7noo7iZ8kSg5VLzQzN8yZcr6QdUquVaxL71LIA0WhMfj_WYcOpd05W8
- [7] *WHAT ARE THE ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF 3D PRINTING?* [online]. Velká Británie: TWI, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/pros-and-cons>
- [8] *3D Hubs Publishes Complete 3D Printing Technologies Infographic* [online]. UK: 3D Printing Media Network, 2016 [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/3d-hubs-publishes-complete-3d-printing-technologies-infographic/>
- [9] *Úvod do FDM* [online]. Rumunsko: 3D DOT, - [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.blog.3ddot.ro/introducere-in-fdm/>
- [10] *Hubs.com: What is FDM 3D printing?* [online]. Amsterdam: hubs.com, - [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>
- [11] *Prusa Knowledge Base: Průvodce materiály* [online]. ČR: PrusaPrinters, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/category/pruvodce-materialy_220
- [12] *3D Insider - 3D Printing Filaments* [online]. Nový Zéland: 3D Insider, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/>
- [13] *ABS Melting Point, Properties, Applications, Advantages & Disadvantages* [online]. Indie: PlasticRanger, 2021 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://plasticranger.com/abs-melt-point/>

- [14] *Polyamide (PA) or Nylon: Complete Guide* [online]. Francie: Omnexus, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyamide-pa-nylon>
- [15] *Thermal Properties of Plastics* [online]. -: m-ep.co, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: https://www.m-ep.co.jp/en/pdf/product/iupi_nova/physicality_04.pdf
- [16] *WHAT IS PLA? (EVERYTHING YOU NEED TO KNOW)* [online]. Velká Británie: TWI, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-pla#HowisitMade>
- [17] *ACRYLONITRILE STYRENE ACRYLATE (ASA) FILAMENT REVIEW* [online]. USA: JuggBot 3D, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://juggbot3d.com/materials/asa-filament-review/>
- [18] *Vlastnosti polykarbonátu* [online]. ČR: Verlag Dashöfer, nakladatelství, spol. s r. o., 2015 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.strojirenstviprofi.cz/33/vlastnosti-polykarbonatu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1Gx-NUTUHrB7JY/>
- [19] *Cotu.cz: DLP a LCD 3D tisk* [online]. Praha: cotu.cz, - [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/148/dlp-a-lcd-3d-tisk>
- [20] *3dnatives.com: SLA vs DLP: Which Resin 3D Printing Process Should You Choose?* [online]. -: 3dnatives.com, - [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/sla-vs-dlp-3d-printing-080420215/#!>
- [21] *The Types of 3D Printing Technology of 2022* [online]. Německo: All3DP, 2021 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>
- [22] *What is SLA 3D printing?* [online]. Nizozemsko: Hubs, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/#what-materials-are-used-for-sla-printing>
- [23] *Opportunities and Challenges of Selective Laser Sintering 3D Printing in Personalized Pharmaceutical Manufacturing* [online]. USA: americanpharmaceuticalreview.com, 2021 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.americanpharmaceuticalreview.com/Featured-Articles/574845-Opportunities-and-Challenges-of-Selective-Laser-Sintering-3D-Printing-in-Personalized-Pharmaceutical-Manufacturing/>
- [24] *Guide to Selective Laser Sintering (SLS) 3D Printing* [online]. USA: formlabs.com, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>
- [25] Introduction to metal 3D printing. In: *Hubs - A Protolab Company* [online]. Amsterdam, Nizozemí: Hubs, - [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing/#what>
- [26] *3D tisk na ČVUT: DMLS* [online]. ČR: ČVUT FS, - [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/dmls-3dtisk/>

- [27] *Manufacturing explained: direct metal laser sintering (DMLS)* [online]. Nizozemsko: hubs.com, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/blog/direct-metal-laser-sintering/>
- [28] *3D tisk kovů: Materiály pro 3D tisk kovů* [online]. Belgie: Materialise, - [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/technologie-materialy-a-dokoncovaci-upravy/3d-tisk-kovu>
- [29] *EBM - průlomová technologie výroby exponovaných součástí* [online]. ČR: MM Průmyslové spektrum, 2020 [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ebm-prulomova-technologie-vyroby-exponovanych-soucasti>
- [30] *Základy 3D tisku: Co je EBM?* [online]. -: mrgeeky, - [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://mrgeeky.org/cs/zaklady-3d-tisku-co-je-ebm>
- [31] *Material Jetting: What is Material Jetting?* [online]. -: Engineering product design, - [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/material-jetting/>
- [32] *3D PRINTING - ADDITIVE: Binder jetting - BJ* [online]. Francie: 3DS, - [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-jetting>
- [33] *LOM (Laminated Object Manufacturing): 3D Printing with Layers of Paper* [online]. Francie: sculpteo, - [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/>
- [34] *Laminated Object Manufacturing (LOM)* [online]. Rusko: 3D Print Expo, 2017 [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://3d-expo.ru/en/article/izgotovlenie-obektov-metodom-laminirovaniya-lom-78841>
- [35] RAZAVYKIA, Abbas, Eugenio BRUSA, Cristiana DELPRETE a Reza YAVARI. An Overview of Additive Manufacturing Technologies—A Review to Technical Synthesis in Numerical Study of Selective Laser Melting. *Materials*. 2020, **13**. Dostupné z: doi:10.3390/ma13173895
- [36] *Foundry Vs Additive comparison of performances and heat treatments for an Al-Si-Mg alloy* [online]. Miláno: Metal Working World Magazine, 2019 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.metalworkingworldmagazine.com/foundry-vs-additive-comparison-of-performances-and-heat-treatments-for-an-al-si-mg-alloy/>
- [37] KEMPEN, K., L. THIJS, J. VAN HUMBEECK a J.-P. KRUTH. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia*. 2012, **39**, 439-446. ISSN 1875-3892. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.059>
- [38] WANG, Min, Bo SONG, Qingsong WEI, Yuanjie ZHANG a Yusheng SHI. Effects of annealing on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted AlSi7Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2019, **739**, 463-472. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.047>
- [39] WANG, Lin-zhi, Sen WANG a Xingfu HONG. Pulsed SLM-manufactured AlSi10Mg alloy: Mechanical properties and microstructural effects of designed laser energy densities: Mechanical properties and microstructural effects of designed laser energy

- densities. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018, **35**, 492-499. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.09.007>
- [40] *Datasheets 3D Printing Materials* [online]. -: materialise.com, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: https://www.materialise.com/system/files/resources/materialise_datasheets_25_01_2022.pdf
- [41] *Slitina hliníku na odlitky ČSN 42 4331* [online]. -: techportal.cz, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrODF32bS3UUhLQzuL5aEnWu-NsFmbGrQqRg
- [42] *Metalurgie neželezných slitin* [online]. ČR: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/metalurgie-nezelezných-kovu/metalurgienezeleznýchkovu-skripta.pdf>
- [43] *Hliníkové slitiny* [online]. ČR: alucom.cz, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://alucom.cz/hlinikove-slitiny/?fbclid=IwAR3d5TY-adPkJvn3veJl3RlacBUapun0fGVDEm2D1Razs38yjP59Fjt3aVE>
- [44] *Číselné označování hliníku a slitin hliníku podle ČSN EN 573-1:2005 (42 1401)* [online]. ČR: online.ferona.cz, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/znaceni-nezelezných-kovu/?typ=2>
- [45] *ASM Aerospace Specification Metals Inc.: AISI Type 316L Stainless Steel* [online]. Florida, USA: ASM Aerospace Specification Metals Inc., - [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq316q>
- [46] *Atlas Steels: Grade Data Sheet 316, 316L, 316H* [online]. Austrálie: Atlas Steels, 2011 [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: https://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas_Grade_datasheet_316_rev_Jan_2011.pdf
- [47] KARAKURT, Ilbey a Liwei LIN. 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing: techniques, materials, and post-processing. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2020, **28**, 134-143. ISSN 2211-3398. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001>
- [48] *Tepelné zpracování* [online]. ČR: Killich s.r.o, - [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.killich.cz/stranky/technicke-info/ocelovy-spojovaci-material/tepelne-zpracovani>
- [49] *Žihání* [online]. ČR: oneindustry.cz, 2017 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/zihani/>
- [50] ATKINSON, H. a S. DAVIES. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview: An overview. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000, **31**(12), 2981-3000. ISSN 1543-1940. Dostupné z: doi:10.1007/s11661-000-0078-2

- [51] *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2351-6.
- [52] *How to Smooth 3D-Printed Parts* [online]. USA: machinedesign.com, 2014 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/article/21832012/how-to-smooth-3dprinted-parts>
- [53] *Výběr a použití brusiva: Brusné kotouče* [online]. Brno: -, 2018 [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://www.chytre-bydleni.cz/dum/vyber-a-pouziti-brusiva-brusne-kotouce>
- [54] *Co je pískování? čím se pískuje?* [online]. ČR: piskovacka.cz, 2016 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje/>
- [55] *CeraBlast - Minerals for blasting and flooring* [online]. Německo: cerablast.com, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://cerablast.com/cs/home-cz/>
- [56] *Abraziva* [online]. ČR: abraziva.cz, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: www.abraziva.cz
- [57] *Tryskání - Pískování* [online]. Prostějov, ČR: PEKR METAX, - [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <http://www.pekrmetax.cz/tryskani-piskovani.html>
- [58] *TRYSKACÍ SYSTÉMY* [online]. Valašské Meziříčí, ČR: GDS Pískování, - [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <http://tryskani-piskovani.gds.cz/tryskaci-systemy>
- [59] *Pískovačka.cz: Co je pískování? Čím se pískuje?* [online]. -: piskovacka.cz, 2016 [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: <https://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje/>
- [60] *Benefits of Recycling Vibratory Finishing Effluent* [online]. USA: Products Finishing, 2020 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/benefits-of-recycling-vibratory-finishing-effluent>
- [61] *The basics of wheel blasting* [online]. USA: the fabricator, 2013 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/finishing/the-basics-of-wheel-blasting>
- [62] *Mechanical Finishing Q&A: Blasting Steel Parts to Clean and Profile for Coating Adhesion Specifications* [online]. USA: Products Finishing, 2016 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/mechanical-finishing-qa-blasting-steel-parts-to-clean-and-profile-for-coating-adhesion-specifications->
- [63] *Technologie tryskání jako konečná úprava povrchu (kuličkování)* [online]. Slovensko: TechPark, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: http://www.techpark.sk/technika-9102014/Prvni_tousenska_povrchove_upravy_tryskani_casopis_Technika.html
- [64] *Kuličkování - shot peening* [online]. ČR: 1.Toušeňská s.r.o., - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.tryskaci-zarizeni.cz/tryskaci-zarizeni/automaticka-tryskaci-zarizeni/kulickovani-shot-peening/>
- [65] *Kuličkování* [online]. ČR: oneindustry, 2017 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/kulickovani/>

- [66] *WHAT IS SHOT PEENING AND HOW DOES IT WORK?* [online]. Velká Británie: TWI, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-shot-peening#HowDoesShotPeeningWork>
- [67] *Peening Process - shot peening* [online]. -: TheMetalCasting.Com, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <http://www.themetalcasting.com/peening-process.html>
- [68] *Řízené kuličkování (shot peening)* [online]. Velká Británie: CWST, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://www.cwst.co.uk/wp-content/uploads/2015/08/czech-shot-peening-1.pdf>
- [69] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 3. část* [online]. -. ČR: VUT Brno, 2005 [cit. 2022-04-03]. ISBN -. Dostupné z: <https://adoc.pub/technologie-i-technologie-obrabni-3-ast.html>
- [70] *Laser Shock Peening / LSP* [online]. ČR: hilase, - [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.hilase.cz/produkty/laser-shock-peening-lsp/>
- [71] *Shot Peening Falls Short of Laser Peening in Residual Stress Comparison* [online]. Irsko: LSP Technologies, 2017 [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.lsptechnologies.com/resources/shot-peening-falls-short-of-laser-peening/>
- [72] *Warm Laser Shock Peening* [online]. USA: Chang Ye, University of Akron, - [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/changye2002/experience/warm-lase-shock-peening>
- [73] *Omílání* [online]. ČR: ELUC, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1388>
- [74] *Omílání a leštění* [online]. ČR: dk metal, - [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/vyroba/omilani>
- [75] *ELEKTROLYTICKÉ LEŠTĚNÍ* [online]. Litovel, ČR: ELLIT PLUS, - [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://www.ellit.cz/elektrolyticke-lesteni/>
- [76] *The electrochemical polishing process* [online]. Itálie: delmet, 2020 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://www.delmet.it/en/n/5-the-electrochemical-polishing-process.html>
- [77] KOSMAČ, Alenka. *Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí*. První. Belgie: Euro Inox, 2009. ISBN 978-2-87997-319-7.
- [78] *Doplňkové technologie pro zpracování plastů* [online]. ČR: TUL, Fakulta strojní, - [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm
- [79] *Technologie povrchových úprav* [online]. ČR: ČVUT FS, - [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/252191/mod_resource/content/1/TE1_povrchove_upravy_3.pdf
- [80] *Galvanické pokovování* [online]. ČR: ucitel.krejciavclav.cz, - [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: http://ucitel.krejciavclav.cz/wp-content/uploads/2017/10/Cpm2_galvanick%C3%A9-pokovov%C3%A1n%C3%AD.pdf

- [81] *Post processing for FDM printed parts* [online]. Nizozemí: HUBS.com, - [cit. 2022-07-22]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts/#sanding>
- [82] *Jak vyhladit 3D tisky pomocí chemického vyhlazování* [online]. ČR: Prusa Research, 2020 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/cs/jak-vyhladit-3d-tisky-pomoci-chemickeho-vyhlazovani_36268/
- [83] *Vyhlazování 3D výtisku acetonem* [online]. ČR: PowerPrint3D, 2019 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://powerprint3d.cz/vyhlazovani-3d-vytisku-acetonem/>
- [84] *How to smooth PLA? 4 techniques and tricks* [online]. Španělsko: bitfab, - [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://bitfab.io/blog/how-to-smooth-pla/>
- [85] *The Best Methods for PLA Smoothing* [online]. -: 3DPrintWorld, 2021 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://3dprinterworldexpo.com/the-best-methods-for-smoothing-3d-prints/>
- [86] *Jak upravit model po 3D tisku* [online]. ČR: futlab.cc, 2018 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://futlab.cc/uprava-modelu-po-3d-tisku/>
- [87] *Postprocessing 3D výtisků krok za krokem* [online]. ČR: josefprusa.cz, 2018 [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/postprocessing-3d-vytisku-krok-za-krokem/#5>
- [88] *TIPY PRO TVORBU MODELŮ PRO 3D TISK* [online]. ČR: Tecron, 2021 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://tecron.cz/konstrukce-modelu-pro-3d-tisk/>
- [89] PRŮŠA, Josef a Ondřej STRŽÍTESKÝ. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. První. ČR: Prusa Research, a.s., 2019 [cit. 2022-04-05]. ISBN -. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/zaklady-3d-tisku-s-josefem-prusou_490/
- [90] *K čemu slouží nastavení perimeters* [online]. ČR: Prusa Research, a.s., 2015 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/cs/k-cemu-slouzi-nastaveni-perimeters_3963/
- [91] *Vše co potřebujete znát o tiskových výplních* [online]. ČR: Prusa Research, a.s., 2021 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/cs/vse-co-potrebuje-znat-o-tiskovych-vyplnich_43579/
- [92] *3D tisk – Teplota trysky, rychlost tisku a materiál* [online]. ČR: Inventorblog, 2017 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.inventor3dblog.cz/3d-tisk-teplota-trysky-rychlost-tisku-material/>

Seznam obrázků:

Obrázek 1 - Postup 3D tisku.....	9
Obrázek 2 - Porovnání výroby 3D tiskem a konvenčními metodami - upraveno [6]	9
Obrázek 3 - Schéma FDM tiskárny se dvěma tiskovými hlavami [9]	11
Obrázek 4 - Schéma DLP/SLA tiskárny [21].....	13
Obrázek 5 - Schéma SLS tiskárny [23]	14
Obrázek 6 - Schéma DMLS/SLM tiskárny [27].....	16
Obrázek 7 - Schéma EBM tiskárny [29]	17
Obrázek 8 - Schéma PolyJet tiskárny [31]	18
Obrázek 9 - Schéma Binder Jetting tiskárny [32]	19
Obrázek 10 - Schéma LOM tiskárny [35]	19
Obrázek 11 - Rozdíl mezi gravitačně odlitým AlSi10Mg (vlevo) a 3D tištěným (vpravo) [36]	20
Obrázek 12 - Princip hipování s naznačenou změnou rozměrů [50].....	28
Obrázek 13 - Injektorové tryskání [58]	30
Obrázek 14 - Tlakové tryskání	31
Obrázek 15 - Mechanické tryskání [62]	31
Obrázek 16 - Princip kuličkování [67]	32
Obrázek 17 - Princip technologie Laser Peening [72].....	33
Obrázek 18 - Rotační omílací zařízení [74]	34
Obrázek 19 - Princip elektrolytického leštění [76].....	35
Obrázek 20 - Varianta úpravy převisu [88].....	40
Obrázek 21 - Rozdíl doby tisku modelu s dutinou a plného modelu	41
Obrázek 22 - Výsledný model.....	41
Obrázek 23 - Ukázka výplně z Prusaslicer 2.4.1	43
Obrázek 24 - Porovnání spotřeby materiálu a tiskového času pro různé procentuální hustoty výplně	44
Obrázek 25 - Ručně nakreslené podpory v místě 5	44
Obrázek 26 - Porovnání povrchu modelů první a druhé série.....	45
Obrázek 27 - Doba tisku a spotřeba materiálu na jeden model – první série	45
Obrázek 28 - Členitý vzorek po broušení.....	46
Obrázek 29 - Hladký vzorek po broušení (hnědé skvrny) a omílání (tmavé hrany vzorku)	46
Obrázek 30 - Omílačka vlastní výroby.....	46
Obrázek 31 – Vzorek s hladkým povrchem po aplikaci tmelu ve spreji.....	47
Obrázek 32 – Členitý vzorek po aplikaci dvousložkového tmelu (před obroušením) ...	47
Obrázek 33 - Členitý vzorek po tryskání.....	48
Obrázek 34 – Vzorky (členitý vlevo a hladký vpravo) po kuličkování	48
Obrázek 35 - Ukázka vytvrzování vzorku po aplikaci resinu	49
Obrázek 36 - Vzorek před vyhlazením v parách (vlevo) a po vyhlazení (vpravo)	49
Obrázek 37 - Vyhlazování součásti z ASA v parách acetonu	50
Obrázek 38 - Referenční hladký vzorek.....	52
Obrázek 39 - Referenční členitý vzorek.....	52

Obrázek 40 - Povrch hladkého vzorku po broušení	52
Obrázek 41 - Povrch členitého vzorku po broušení	52
Obrázek 42 - Vzorek hladký po tmelení sprejem	53
Obrázek 43 - Vzorek členitý po tmelení sprejem	53
Obrázek 44 - Hladký vzorek po tmelení dvousložkovým tmelem	53
Obrázek 45 - Členitý vzorek po tmelení dvousložkovým tmelem	53
Obrázek 46 - Hladký vzorek po aplikaci resinu	54
Obrázek 47 - Členitý vzorek po aplikaci resinu	54
Obrázek 48 - Hladký vzorek po omílání (2 hodiny).....	54
Obrázek 49 - Členitý vzorek po omílání (2 hodiny).....	54
Obrázek 50 - Hladký vzorek po kuličkování.....	55
Obrázek 51 - Členitý vzorek po kuličkování.....	55
Obrázek 52 - Hladký vzorek po tryskání.....	55
Obrázek 53 - Členitý vzorek po tryskání.....	55
Obrázek 54 - Členitý vzorek bez působení par (porovnávací)	55
Obrázek 55 - Členitý vzorek po 30 minutách v parách acetonu.....	55
Obrázek 56 - Členitý vzorek po 90 minutách v parách acetonu.....	56
Obrázek 57 - Členitý vzorek po 180 minutách v parách acetonu.....	56

Seznam tabulek:

Tabulka 1 - Rozdělení technologií 3D tisku.....	10
Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti polymerních materiálů pro 3D tisk [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18].....	12
Tabulka 3 - Materiály pro SLA/DLP a jejich vlastnosti [22].....	14
Tabulka 4 - Mechanické vlastnosti nylonu pro SLS [24].....	15
Tabulka 5 - Chemické složení AlSi10Mg [7].....	20
Tabulka 6 - Porovnání mechanických vlastností odlitku a 3D výtisku z materiálu AlSi10Mg [40] [41].....	21
Tabulka 7 - Chemické složení AISI 316L [45].....	22
Tabulka 8 - Vybrané mechanické vlastnosti AISI 316L [46].....	23
Tabulka 9 - Parametry hipování pro vybrané materiály a jejich slitiny [50].....	27
Tabulka 10 - Srovnání použitých metod postprocessingu.....	51

Seznam grafů:

Graf 1 - Diagram tepelného zpracování při vytvrzování za tepla (hodnoty jsou orientační).....	25
Graf 2 - Závislost tvrdosti AlSi10Mg na teplotě a době vytvrzování [42].....	26