

Prototypové polymerní tvářecí nástroje

František Halíček

Bakalářská práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **František Halíček**
Osobní číslo: **T19189**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Prototypové polymerní tvářecí nástroje**

Zásady pro vypracování

- 1.- teoretická studie na dané téma
- 2.- zhotovení sady prototypových tvářecích nástrojů aditivní metodou výroby
- 3.-zhodnocení trvanlivosti nástrojů v závislosti na procesních parametrech

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

GEBHARDT, Andreas, Julia KESSLER a Laura THURN. *3D Printing: Understanding Additive Manufacturing*. 2nd edition. Munich: Hanser Publishers, [2019], xvi, 204 s. ISBN 9781569907023.

NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC. *Základy strojírenské technologie I*. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016, 160 s. ISBN 9788001060568.

DURGUN, Ismail. Sheet Metal Forming Using FDM Rapid Prototype Tool. *Rapid Prototyping Journal*, 2015.

KLIMYUK, Daniil; SEREZHKIN, Mikhail; PLOKHIKH, Andrey. Application of 3D Printing in Sheet Metal Forming. *Materials Today: Proceedings*, 2020.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 22. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá 3D tiskem a jeho využitím v průmyslu. Za cíl si klade zjistit chování sad polymerních nástrojů vyrobených s jednou parametrou změnou. V rámci praktické části byla provedena výroba experimentálních výliseků. Každý výlisek byl změřen a proběhla statistická analýza dat a porovnání zjištěných výsledků.

Klíčová slova: 3D tisk, FDM, lisování, ohraňování

ABSTRACT

This work deals with 3D printing and its use in industry. The aim is to determine the behavior of sets of polymer tools made with change in one parameter. In the practical part, the production of experimental pressed piece was performed. The pressed pieces were measured, statistically analysed and results were compared.

Keywords: 3D print, FDM, pressing, press brake

Chtěl bych tímto poděkovat firmě KALINA industries s.r.o. za možnost výborné spolupráce, poskytnutí finanční i odborné podpory v době přípravy experimentu i při jeho provedení. Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. za kvalitní vedení, přínosné připomínky, odborné rady a v neposlední řadě i za čas, který mi věnoval.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 TVÁŘENÍ	13
1.1 TVÁŘENÍ ZA STUDENA	13
1.2 TVÁŘENÍ ZA TEPLA	13
1.3 ROZDĚLENÍ TVÁŘECÍCH PROCESŮ PODLE PŮSOBENÍ VNĚJŠÍ SÍLY	14
1.3.1 Objemové tváření	14
1.3.2 Plošné tváření	14
2 3D TISK	15
2.1 HISTORIE	15
2.2 CHARAKTERISTIKA 3D TISKU	15
2.3 ROZDÍLY KONVENČNÍCH TECHNOLOGIÍ A 3D TISKU	16
2.3.1 Konvenční technologie.....	16
2.3.2 Aditivní technologie.....	16
2.3.3 Porovnání	17
3 METODY 3D TISKU	18
3.1 SELECTIVE LASER SINTERING (SLS).....	18
3.2 SELECTIVE LASER MELTING (SLM).....	19
3.3 STEREOLITHOGRAPHY (SLA).....	19
3.4 FUSED DEPOSITION MODELING (FDM).....	20
4 POLYMERY	22
4.1 PLASTY	23
4.1.1 Termoplasty.....	23
4.1.2 Reaktoplasty	23
4.2 ELASTOMERY	23
4.2.1 Kaučuky	24
4.2.2 Termoplastické elastomery	24
4.3 DRUHY POLYMERŮ PRO 3D TISK	24
5 MATERIÁLY PRO FDM TISK	25
5.1 KYSELINA POLYMLÉČNÁ (PLA)	25
5.2 AKRYLONITRIL-BUTADIEN-STYREN (ABS)	26
5.3 POLYKARBONÁT (PC)	26
5.4 POLYKARBONÁT/AKRYLONITRIL-BUTADIEN-STYREN (PC/ABS).....	26
5.5 AKRYLONITRIL-STYREN-AKRYL (ASA)	26
5.7 POLYAMID (PA)	27

5.8	CHLOROVANÝ POLYETHYLEN (CPE).....	27
5.9	CPE CARBON	27
6	PLOŠNÉ TVÁŘENÍ POMOCÍ NÁSTROJE VYROBENÉHO FDM METODOU	28
6.1	VLASTNOSTI NÁSTROJE Z 3D TISKÁRNY	28
6.2	VÝROBA NÁSTROJEM VYROBENÝM NA 3D TISKÁRNĚ.....	28
7	VYHODNOCOVÁNÍ DAT	30
7.1	NORMALITA DAT	30
7.2	EXPLORATORNÍ DATOVÁ ANALÝZA	30
7.2.1	Testy odlehých hodnot	31
7.3	STATISTICKÉ HYPOTÉZY	31
II	PRAKTICKÁ ČÁST	33
9.1	SOFTWARE A ZAŘÍZENÍ POUŽITÁ PŘI EXPERIMENTU	35
9.1.1	Solid Edge 2020	35
9.1.2	PrusaSlicer.....	35
9.1.3	Original Prusa MK3S+.....	36
9.1.4	TruBend 5170.....	37
9.2	MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	38
9.3	EXPERIMENTÁLNÍ VÝLISEK	39
9.3.1	Výroba experimentálního výlisku	39
9.4	KYSELINA POLYMLÉČNÁ (PLA)	40
9.5	MODELOVÁNÍ A VÝROBA NÁSTROJŮ	40
9.5.1	Tvorba modelu	41
9.5.2	Příprava modelu pro tisk	42
9.5.3	Tisk.....	47
9.6	NASTAVENÍ OHRAŇOVACÍHO LISU.....	48
10	KALINA INDUSTRIES S.R.O.	50
11	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ.....	51
11.1	EXPLORATORNÍ DATOVÁ ANALÝZA (EDA)	54
11.1.1	Test normality	55
11.2	SROVNÁVÁNÍ SOUBORŮ DAT	56
11.2.1	T-test (Studentův t-test).....	56
11.2.2	F-test.....	59
11.3	VÝŠKY VÝLISKŮ V ZÁVISLOSTI NA ČASE	60
12	PREDIKCE.....	61
13	DISKUZE VÝSLEDKŮ	63
	ZÁVĚR	65

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	70
SEZNAM OBRÁZKŮ	72
SEZNAM TABULEK.....	74
SEZNAM PŘÍLOH.....	75

ÚVOD

Aditivní technologie byly objeveny již dávno, ale až v posledním desetiletí došlo k jejich masovému rozšíření i mezi veřejnost. Oproti konvenčním technologiím materiál neodebírají, ale přidávají, vzniká daleko méně odpadu. Moderní 3D tiskárny dokáží tisknout například z kovů, termoplastů i reaktoplastů. Tím získávají vysokou flexibilitu oblastí použití.

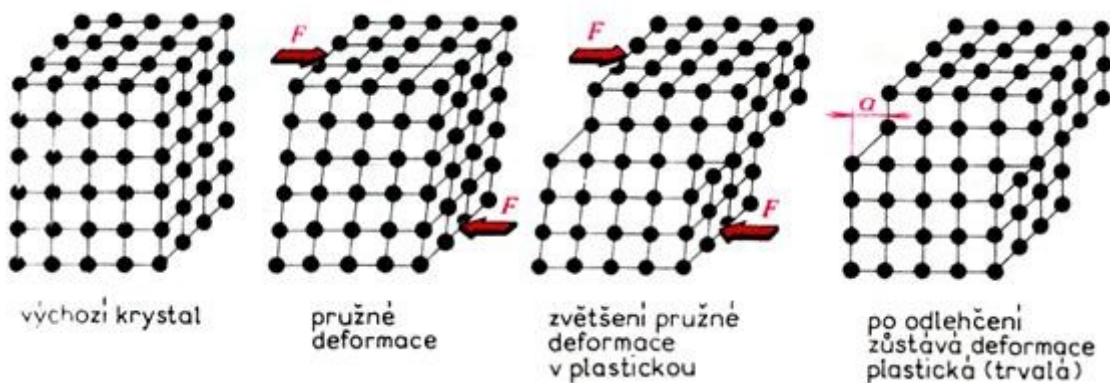
Tato práce vyhodnotila vliv zvoleného procesního parametru na výdrž tří sad polymerních ohýbacích nástrojů vyrobených na 3D tiskárně od firmy Prusa. Experiment byl proveden za pomoci ohraňovacího lisu. Inspirací pro výlisek byl zvolen výrobek vyráběný firmou KALINA industries s.r.o. pro konkrétního zákazníka.

Bylo provedeno vyhodnocení naměřených dat statistickými metodami a na základě zjištěných údajů bylo rozhodnuto o trvanlivosti sad nástrojů vyrobených aditivní metodou.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TVÁŘENÍ

Jedná se o proces, při kterém dochází k požadované změně tvaru polotovaru působením vnější síly na polotovar. Principem tváření je dosažení plastické deformace. Ta nastane překročením napětí meze kluzu pro zpracovávaný materiál. Mezi výhody tváření se řadí vysoká rozměrová přesnost, velká využitelnost materiálu a dobrá produktivita práce. Technologii můžeme dělit na základě teplot tvářeného materiálu vůči teplotě rekrytalizace. [1], [2]



Obrázek 1 Schéma elastické a plastické deformace [2]

1.1 Tváření za studena

Tvářením pod rekrytalizační teplotou (teplota je pod hodnotou 30 % teploty tání daného materiálu) dochází k deformaci zrn ve směru tváření, vytváří se textura (změna tvaru zrn v důsledku tváření), materiál se zpevní (zvýšení meze pevnosti a meze kluzu) a naroste odpor k dalšímu tváření. Zahřátím kovu nad rekrytalizační teplotu získáme opět možnost materiál plasticky tvářet. Mezi výhody takto tvářeného výrobku řadíme zlepšení jeho mechanických vlastností, kvality povrchu a dobrou rozměrovou přesnost. Nevýhody jsou omezená tvárnost materiálu a nutnost použít velké tvářecí síly. [1], [2]

1.2 Tváření za tepla

Probíhá nad rekrytalizační teplotou (teplota je nad hodnotou 70 % teploty tání daného materiálu). Zpevnění způsobené tvářením zaniká v průběhu, nebo bezprostředně po skončení operace. Jsou potřebné až desetkrát menší tvářecí síly oproti tváření za studena. Nemusí vznikat textura a dochází ke zhoršení kvality povrchu díky okujení (vznik oxidovaných plátek kovu). Dochází k zhrubnutí zrna, důsledkem čehož nastává zhoršení kvality dalších technologických operací. Trhliny a bubliny materiálu jsou v procesu

odstraněny. Vzniká vláknitá struktura ovlivňující mechanické vlastnosti a způsobující anizotropii. [1], [2]

1.3 Rozdělení tvářecích procesů podle působení vnější síly

1.3.1 Objemové tváření

Deformace nastávají ve všech třech směrech souřadného systému (válcování, kování, protlačování a tažení drátů). [1], [2]

1.3.2 Plošné tváření

Deformace převládají ve dvou směrech (ohýbání, tažení a stříhání). Polotovary jsou plechy a pásy plechů. [1], [2]

- **Ohýbání**

Probíhá za pomoci ohýbadla a ohybnice. Při ohýbání musí být překročena mez kluzu, aby bylo dosaženo plastické deformace, která je doprovázena deformací elastickou. Těleso má tendenci vrátit se do původního tvaru, to jest odpružit. [1], [2]

- **Tažení**

Můžeme dělit na mělké a hluboké, tažení bez a se ztenčením stěny, tažení rotační a nerotační. Funkční části tažného nástroje jsou tažník a tažnice. Probíhá jedním nebo více tahy v závislosti na hloubce tahu. Výsledkem je duté těleso takzvaný výtažek. Vlivem deformace dochází ke ztenčení původních tloušťek stěn. [1], [2]

- **Stříhání**

Stříhání je oddělování částí materiálu působením protilehlých řezných hran způsobujících smykové napětí. V první fázi dochází k pružným deformacím, při kterých je materiál stlačován a ohýbá se do prostoru střížnice. Druhou fází je oblast plastických deformací. Střížník se vtlačuje do plechu a plech do otvoru ve střížnici. Napětí na hranách se přibližuje mezi pevnosti. Následně na hranách vznikají trhliny, jež vyústí v utržení materiálu. [1], [2]

2 3D TISK

Jde o proces aditivní výroby určený k výrobě prostorových součástí na speciálních 3D tiskárnách. Součást se tiskne po vrstvách z různých materiálů. [4], [5]

2.1 Historie

V roce 1980 Dr. Hideo Kodama přihlásil v Japonsku první patent na 3D tiskárnu. Jednalo se o SLA tiskárnu. Nakonec patent nezískal a o technologii nebyl v Japonsku projeven zájem. Další patent přichází v roce 1982 na tiskárnu pracující s kovovým práškem. Slovo 3D tisk se objevilo v roce 1984. [4]

Vynálezce Chuck Hull vyrobil produkční 3D tiskárnu SLA-1 roku 1987. Pracovala s fotopolymery, které vytvrzovala pomocí světla po vrstvách. Vyráběly se na nich komplikované výrobky, které by konvenčním způsobem bylo velmi obtížně vyrobit. Kvůli vysoké ceně tiskáren a vysokým požadavkům na kvalitu materiálu nebyla technologie příliš rozšířená. Druhá generace tiskárny pojmenovaná SLA-250 byla již používána i veřejností. [4], [5]

Selectiv Laser Sintering (SLS) tiskárny se objevily 1987 a následně, v roce 1989, přichází Fused Deposition Modeling (FDM). Metoda FDM se začala využívat v medicíně pro tisk tkáně a orgánů z lidských buněk. [4], [5]

Rozšíření FDM tiskáren mezi veřejnost nastalo kolem roku 2009, kdy se začaly prodávat kity (stavebnice) pro jejich stavbu. Vznikaly platformy na online sdílení tiskových souborů. Vyznačovaly se lehkou obsluhou a uživatelskou přístupností. [4], [5]

V posledních letech je patrné rozšíření 3D tisku do stavebnictví (domy, mosty a designové konstrukce), konstrukce (tištění letadel, lodí) a medicíny. [4], [5]

2.2 Charakteristika 3D tisku

Aditivní výroba je založená na digitálních procesech. Přináší daleko větší flexibilitu a efektivitu do výrobních operací. Využívají se data z CAD systémů nebo 3D scannerů, která se zpracují pomocí Sliceru na formát souboru pro tiskárnu. Slicer (plátkovač) má za úkol rozdělit 3D model na horizontální plátky. Proběhne rozdělení na tiskové vrstvy a nastavení vlastností tisku. Tisk následně probíhá na základě údajů z vytvořeného souboru. [6]

2.3 Rozdíly konvenčních technologií a 3D tisku

Konvenční technologie fungují na principu odebírání materiálu, aditivní jej naopak přidávají za vzniku minima odpadu. [7], [8]

2.3.1 Konvenční technologie

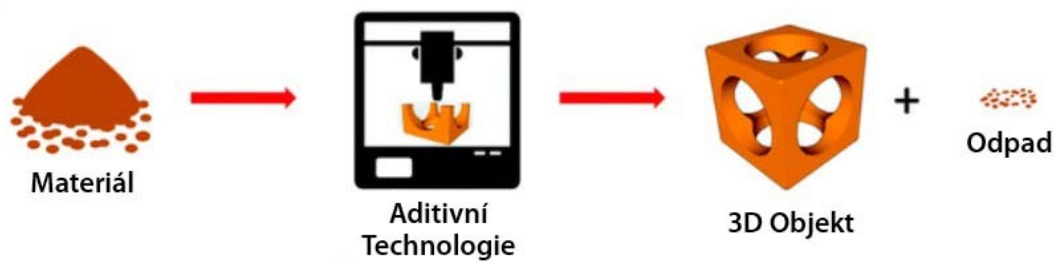
Tradiční výrobní metody jako například obrábění, tváření, svařování, vstřikování, vrtání a řezání fungují na základě odebírání materiálu (za vzniku odpadu), nebo změny tvaru pomocí externí síly působící přes nástroj na výrobek. Pro vznik hotového výrobku jsou technologie často kombinovány, jelikož není možné provést všechny operace jednou technologií (např. vyřezání rozvinu výrobku a jeho následné tvarování na lisu). Pro nový výrobek může být potřebné vyrobit nebo zakoupit nový nástroj, což způsobuje drahou kusovou nebo malosériovou výrobu. Odpadní materiál je nutné prodávat nebo likvidovat. [7], [8]



Obrázek 2 Postup výroby při užití konvenční technologie [7]

2.3.2 Aditivní technologie

Neodebírají materiál, ale naopak ho přidávají po vrstvách a vytváří tak výrobek. Doba tisku se odlišuje podle zvolené technologie, geometrie produktu a požadovaných mechanických vlastností. Dochází k minimálnímu plýtvání materiálem (tiskové opory). Pro tisk nejsou potřeba speciální nástroje a většinou není nutné provádět dokončovací operace (například vrtání). [7], [8]



Obrázek 3 Postup výroby při užití aditivní technologie [7]

2.3.3 Porovnání

Konvenční technologie:

- vyžaduje velké série, aby se zaplatily vstupní náklady na nástroj, práce a montáže,
- často je potřeba kombinace více technologií pro dosažení požadovaného tvaru,
- cena nástrojů roste s jejich komplexností,
- úprava nástrojů je drahá a problematická,
- vzniká velké množství odpadu,
- jsou větší materiálové možnosti,
- lepší kvalita povrchu,
- větší flexibilita velikosti výrobků. [7], [8]

Aditivní technologie:

- velikost série má minimální vliv na cenu kusu,
- existuje možnost úpravy výrobku, lze tisknout každý díl ze série odlišně,
- komplexnost nezvyšuje cenu výrobku,
- rychlá výroba, stačí mít 3D model a materiál,
- vysoké využití materiálu,
- povrch není hladký (možnost leštit),
- maximální rozměr výtisku je omezen velikostí podložky. [7], [8]

3 METODY 3D TISKU

3D tiskárny pracují na principu vytvrzování a aplikace materiálů ve vrstvách. Tiskárny dělíme například na základě aditivního materiálu, který využívají (termoplast, reaktoplast, kov, keramika atd.). [9]

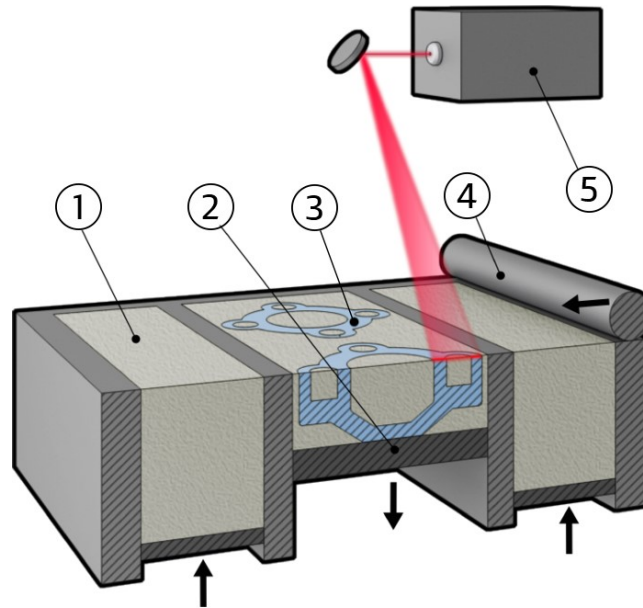
3.1 Selective Laser Sintering (SLS)

Selektivní laserové sintrování pracuje s práškovým materiálem. Může jím být polymer, kov nebo keramika. Velikost zrn materiálu se pohybuje od 20 do 50 μm . Stroj se skládá z pracovní plochy a CO_2 laseru. Pracovní plocha je vyhřívána a chráněna plynem, aby nedocházelo k deformaci způsobené náhlou změnou teploty a k oxidaci. Na pracovní plochu je nanesen prášek. Ten je následně vytvrzen za pomoci laseru. Po vytvrzení se pracovní plocha posune o tloušťku jedné vrstvy dolů a pomocí válečku je nanesena další vrstva prášku. Konstantní tloušťku vrstev zajišťuje rotace válečku opačná ke směru jeho pohybu. Tento proces se opakuje, dokud není výrobek zcela hotov. Na hotový výrobek je nanesena dodatečná prášková vrstva. Zajišťuje jeho rovnoměrné ochlazování. [9], [10], [11]

Ze stroje se vyjme takzvaný „práškový koláč“ a nechá se ochladit. Po ochlazení je následně přebytečný materiál očištěn za pomoci vysavačů a kartáčů. Polymerní materiály potřebují většinou dokončovací operace kvůli velké pórovitosti povrchu. [8]

Výrobky vyrobené touto technologií se vyznačují vlastnostmi blízcími se vstřikovaným dílům. Nacházejí využití od prototypů, až po sériové výrobky určené přímo zákazníkům. [8]

Standardně používané polymerní materiály jsou PA 11 a PA 12. Moderní tiskárny dokáží pracovat i s high-tech materiály jako PEEK. [9], [10]



Obrázek 4 Schéma tiskárny SLS: 1) Práškový materiál, 2) Pracovní plocha, 3) Výrobek, 4) Váleček, 5) Laserová jednotka [11]

3.2 Selective Laser Melting (SLM)

Technologie selektivního tavení laserem je velice podobná SLS. Je speciálně vyvinutá pro výrobu kovových dílů s co největší výplní. Laser taví prášek dokud nevznikne roztavený kov. Díky tomu nejsou ve vzniklém výrobku prakticky žádná prázdná místa. [9], [12]

Materiály mohou být ocel, nerezová ocel, titan, hliník, zlato a velké množství slitin. [9], [12]

Existují také stroje speciálně navržené pro výrobu mikro dílů. Pracují s laserem o průměru $< 20 \mu\text{m}$ a šířce vrstvy od 1 do $5 \mu\text{m}$. [9], [12]

3.3 Stereolithography (SLA)

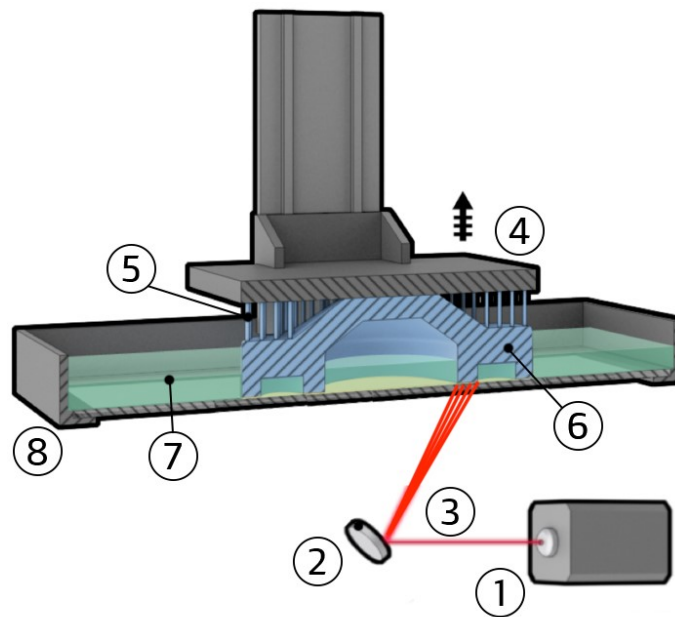
Jedná se o nejstarší technologii 3D tisku. Výrobky vyrobené stereolitografií se vyznačují vysokou kvalitou povrchu a detaily. Často se vyrábí skořepinové díly, tenkostěnné výrobky ale i objemné součástky. [9], [13]

Polymerní pryskyřice je vytvrzována pomocí UV záření a vytváří vrstvy. Pracovní plocha je vyplněna pryskyřicí. Tloušťka jedné vrstvy je $0,05 - 0,15 \text{ mm}$. Laser je směřován pomocí zrcadel. [9], [13]

Laser postupně vytvrzuje jednotlivé vrstvy výrobku. Jakmile se paprsek dotkne pryskyřice, dochází k polymeraci a materiál se stává tuhým. Po dokončení vrstvy se pracovní plocha

posune o tloušťku jedné vrstvy. Je vytvrzena další vrstva pryskyřice a proces se opakuje. Tiskový proces vyžaduje podpory, které je potřeba brát v úvahu při volbě orientace výrobku, protože po odstranění zanechávají stopy na povrchu. Po vyjmutí ze stroje je výrobek očištěn a následně umístěn do UV komory pro dodatečné zesílení. Je možné provádět dokončovací operace jako například leštění. [9], [13]

Výrobky z pryskyřice vykazují špatné vlastnosti při vyšších teplotách. Proto se používá pryskyřice se skleněným plnivem, uhlíkem, nebo hliníkem. [9], [13]



Obrázek 5 Schéma tiskárny SLA: 1) UV Laser, 3) Pohyblivé zrcadlo, 4) Deska, 5) Podpěry, 6) Výrobek, 7) Tekutá pryskyřice, 8) Vana [14]

3.4 Fused Deposition Modeling (FDM)

Tiskárny využívající tuhý materiál ve formě polymerní struny. Materiál je odvíjen z cívky pomocí kol, které ho tlačí do vyhřívané tiskové hlavy. Ta zajišťuje natavování materiálu na požadovanou teplotu. Z trysky je materiál nanášen na vyhřívanou podložku. Je důležité, aby se první vrstva materiálu přichytila na podložku. Jakmile se první vrstva dotiskne, hlava se posune nahoru o šířku jedné vrstvy a pokračuje v tisku vrstev, dokud není výrobek hotov. [9], [15]

Parametry rychlosti posunů, šířky vrstvy, počty obvodových stěn, výplně, teploty trysky a podložky zásadně ovlivňují kvalitu tisku. Filament (struna materiálu určená pro 3D tiskárnu) musí mít správnou teplotu, aby nedocházelo k deformacím a špatnému spojení jednotlivých vrstev. Nevhodné chlazení výrobku může způsobit například deformace, ke

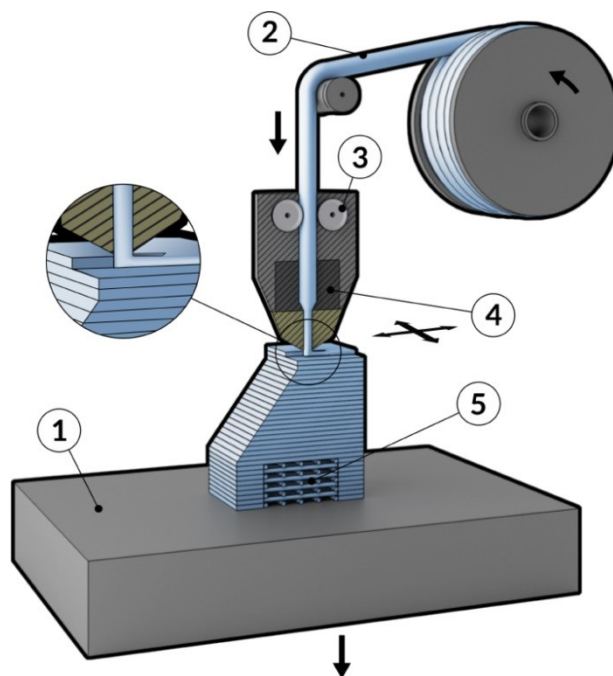
kterým dochází nerovnoměrným ochlazováním. Orientace výrobku je důležitá pro jeho mechanické vlastnosti. Platí, že nejslabší část výtisku jsou spoje mezi vrstvami materiálu. [8], [14]

Vlastnosti výrobku můžeme ovlivnit nastavením výplně. Tato hodnota nám říká, kolik procent výrobku bude vyplněno materiálem. Další důležitou proměnou je šířka obvodové stěny. Tento parametr značně ovlivňuje čas tisku a spotřebu materiálu, takže je potřeba jej nastavit na co nejmenší přípustnou hodnotu. [9], [15]

Tvarově složitější výtisky vyžadují tiskové podpory. Tištěny jsou zároveň s objektem, ale nejsou tištěny v kvalitě výrobku. Od dokončeného výrobku se odstraňují buď manuálně, nebo jsou tištěny ze speciálních ve vodě rozpustných materiálů. Toto řešení ale vyžaduje tiskárnu schopnou používat více filamentů. [9], [15]

Povrch vyrobených dílů není nikdy hladký. Leštění je možné, ale musíme dbát na vlastnosti použitého materiálu. Zároveň se zhoršuje rozměrová přesnost. [9], [15]

Hlavní výhody této technologie jsou cena, rychlost, různorodé materiály a díky dobrým vlastnostem i velká škála aplikací pro dané výrobky. Mezi nevýhody řadíme nízkou rozměrovou přesnost, viditelné vrstvy a jejich špatnou přilnavost. [9], [15]



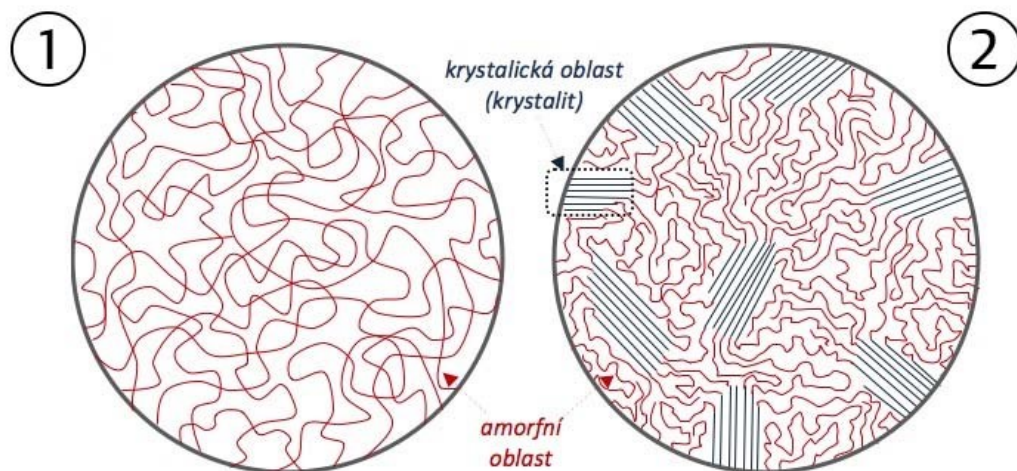
Obrázek 6 Schéma tiskárny FDM: 1) Vyhříváná podložka, 2) Polymerní struna, 3) Podávací kolečka, 4) Tryska vyhříváná, 5) Výrobek s podporami [16]

4 POLYMERY

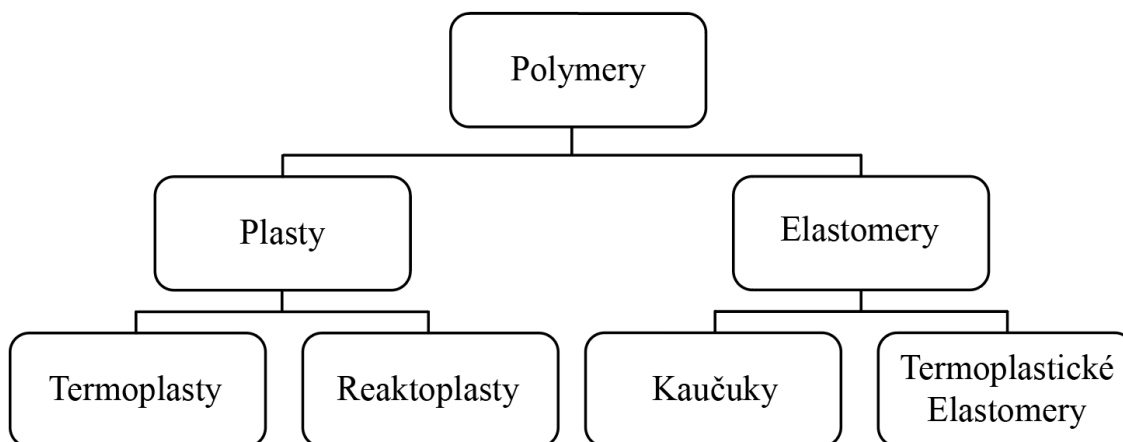
Polymery můžeme rozdělit na základě jejich původu na látky organické nebo syntetické. Typickým příkladem organického polymeru je kaučuk, který se získává ze stromů. Syntetický je například silikon. Každý polymer obsahuje makromolekuly (velké molekuly), ve kterých se v řetězci opakuje základní stavební jednotka mer. Vyznačují se vysokou molární hmotností od 10^4 g/mol. Vlastnosti výsledné látky jsou ovlivněny charakteristikou řetězce a jejich uspořádáním. [17]

Díky speciálním vlastnostem mají polymery široké spektrum použití, nahrazují se jimi i ostatní materiály. Vyznačují se nízkou hmotností, odolností proti korozi i povětrnostním vlivům, chemickou odolností a snadným zpracováním. Využívají se v mnoha odvětvích například ve stavebnictví, automobilovém průmyslu a v mnoha dalších. Často jsou používány jako obalové materiály. I přes sílící tlaky na omezení jejich výroby a přechod k recyklovaným materiálům, roste každý rok jejich celosvětová výroba. [17]

Podle uspořádání makromolekul můžeme dělit polymery na amorfnní a semikrystalické. Amorfnní látky mají nepravidelně uspořádané řetězce. Jsou tvrdé a pružné. Při ochlazování se rozměry mění nepatrně a jsou průhledné. Semikrystalické látky mají určité procento uspořádanosti. Podíl uspořádaných oblastí můžeme vyjádřit jako stupeň krystalinity (obvykle nabývá hodnot od 40 do 90 %). Hodnota krystalinity určuje vlastnosti materiálu (pružnost a pevnost). Krystaly při tuhnutí získávají mléčnou barvu. Při vstřikování dochází k výraznějšímu smrštění. [17]



Obrázek 7 Schéma nad molekulární struktury polymerů 1) amorfnní, 2) semikrystalické [17]



Obrázek 8 Rozdělení polymerů dle stálosti deformace

4.1 Plasty

Plasty jsou polymery, u kterých má působení vnější síly za následek trvalou deformaci. Za normálních podmínek jsou pevné a zároveň křehké. Podle chování při zahřívání je dělíme dále na termoplasty a reaktoplasty. [17]

4.1.1 Termoplasty

Termoplasty jsou materiály, které je možné opakovaně převádět do taveniny, tvářet a recyklovat. Po ochlazení přechází zpět do pevného skupenství a tento proces je možné opakovat. Při zahřívání neprobíhá chemická reakce a nemění se jejich chemická struktura. Změny jsou pouze fyzikální. Při recyklaci je možné z již nepotřebných výrobků zahřátím získat původní granulát. Termoplasty mohou být amorfni, nebo semikrystalické. [17]

4.1.2 Reaktoplasty

Při zahřátí dochází k chemické změně a původní molekuly se zasítují. Látka se stává netavitelnou a nerozpustnou. Jedná se o nevratný proces. Po vytvrzení (zasítování) je velmi tvrdá, tuhá a odolná vůči teplotám i chemikáliím. Struktura je vždy amorfni. Nevytvrzená látka se obvykle nazývá pryskyřice. Pro zlepšení vlastností materiálů se používají plniva (uhlíková vlákna, skelná výztuž), získané kompozity mají unikátní vlastnosti. [17]

4.2 Elastomery

Jsou to materiály s velkou pružností, nízkou tuhostí, snadno deformovatelné a převážně vratné. [17]

4.2.1 Kaučuky

Polymery, které můžeme řídkým zasíťováním (vulkanizací) převést na pryž. Jsou amorfní. Vulkanizace způsobí vytvoření příčných vazeb mezi lineárními makromolekulami kaučuku. Pryže se vyznačují vysokou pružností, nízkou teplotou skelného přechodu a vysokou schopností navrátit se do původního stavu po skončení působení deformační síly. [17]

4.2.2 Termoplastické elastomery

Vlastnosti těchto materiálů stojí na pomezí termoplastů a elastomerů. Zpracovávají se jako termoplasty a mají aplikační vlastnosti elastomerů (elasticita, ohebnost). Struktura se skládá z měkkých, elastických a tvrdých segmentů. Tvrdé segmenty jsou tvořeny termoplasty a měkké elastomery. Segmenty jsou vzájemně nemísitelné. Mohou být jak amorfní, tak také semikrystalické. [17]

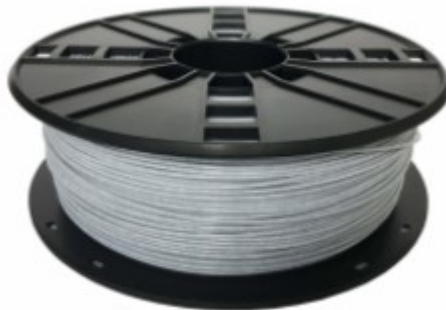
4.3 Druhy polymerů pro 3D tisk

Nejčastěji se setkáme se s tiskárnami určenými pro tisk z termoplastů. Cena hobby FDM tiskárny určené pro tisk termoplastů se pohybuje kolem 20 tisíc Kč. Reaktoplasty se nejčastěji tisknou pomocí stereo litografie, ale už existují tiskárny schopné pracovat s technologií FDM a dokonce tisknout více materiálové výtisky. Oproti standartním termoplastickým výtiskům, bývá výtisk z pryskyřice méně pevný. Z termoplastických elastomerů se využívají často pro tisk různé druhy polyurethanu. [17], [18], [19]

5 MATERIÁLY PRO FDM TISK

Tento druh tiskáren využívá materiál zvaný filament. Jedná se o dlouhou strunu vyrobenou z plastu nebo kompozitu obsahující dřevo, kovový prášek a různé druhy vláken. Standartní průměr používaných filamentů je 1,75 mm a 2,85 mm. [18]

Volba materiálu hraje zásadní roli pro konečné vlastnosti a cenu výrobku. Zároveň jsou jeho vlastnosti ovlivněny nastavením tiskárny a prostředím, v jakém se samotný filament dlouhodobě nachází. Všechny materiály níže popsané jsou termoplasty (CPE Carbon je termoplastický kompozit). [18]



Obrázek 9 Struna polymeru namotána na jádru [18]

5.1 Kyselina polymléčná (PLA)

PLA byl vyvinut speciálně pro 3D tisk. Vyrábí se z kukuřičného škrobu a z pohledu tisku nepřináší žádné špatné vlastnosti. Neobsahuje ropu a je biologicky odbouratelný. Nekrouť se a pevně drží na tiskové podložce. Má špatnou odolnost vůči teplu, slunečnímu záření a chemikáliím. Proto není vhodné provádět na výrobcích dokončovací operace generující velké množství tepla. Broušení, frézování a vrtání musí probíhat s chlazením, případně, z důvodu snížení vzniku tepla, za nízkých otáček. Je velmi tvrdý a vrstvy mají vzájemně vysokou přilnavost. Smrštění je minimální, dokáže zachovávat drobné detaily tisku. Z uvedených důvodů se používá pro tisk velkých objektů. Materiál je nutné skladovat v prostředí s nízkou vlhkostí vzduchu, protože je hydrofilní. Doporučuje se dlouhodobé skladování ve speciálně větraných boxech. [18], [19]

5.2 Akrylonitril-Butadien-Styren (ABS)

ABS je jeden z nejpoužívanějších tiskových materiálů. Vyrábí se z ropy, tudíž při tisku vylučuje zdraví škodlivé páry. Je velmi náchylný na vznik deformací při náhlé změně teploty, proto je dobré mít tiskárnu umístěnou v boxu, který udrží tiskárnu generované teplo uvnitř. Je vhodný pro vnitřní i venkovní použití, odolný proti nízkým i vysokým teplotám, pevný a odolný vůči nárazům. Je rozpustný v acetonu a lepitelný. Acetonové páry se využívají při leštění povrchu (zanikne vrstevná struktura a získáme hladký lesklý povrch). Má nízkou odolnost proti UV záření. Při tisku rozměrných dílů dochází z důvodu smršťování k deformacím. Objevuje se i snáze tisknutelný materiál ABS+, většinou obsahující menší množství styrenu. Jedná se o marketingové označení upravené verze klasického ABS. [18], [20], [21]

5.3 Polykarbonát (PC)

Jedná se o jeden z nejhouževnatějších plastů používaných pro FDM technologii. Využívá se pro technické aplikace z důvodu velké tepelné odolnosti a pevnosti. Tiskově se jedná o problematický materiál, jelikož vyžaduje vysokou teplotu a je náchylný k deformacím. Filament je velice navlhavý, musí být skladován ve speciálních boxech. Existují i transparentní verze. Časté jsou jeho kombinace s ostatními plasty. [22]

5.4 Polykarbonát/Akrylonitril-Butadien-Styren (PC/ABS)

Materiál vyrobený z ABS a PC. PC přináší rázovou a tepelnou odolnost i vyšší kvalitu povrchu, ABS dobré mechanické vlastnosti. Uplatnění nachází při výrobě namáhaných součástí. [23]

5.5 Akrylonitril-Styren-Akryl (ASA)

ASA byl původně vytvořen jako možná náhrada za ABS. Jedná se o konstrukční termoplast odolný proti UV záření a žloutnutí. Využívá se i ve venkovních prostorech, má vyšší tuhost než ABS, zachovává si dobré mechanické vlastnosti, je odolný proti vodě a povětrnostním podmínkám. Tiskově má lepší vlastnosti než ABS, ale stále je náchylný k warpingu, vylučuje nezdravé výpary a zápach. Vyžaduje velké teploty tiskové hlavy a je výrazně dražší než ABS. V současné době se na trhu vyskytují i alternativy upravené pro snadnější tisk, které nevykazují tak kvalitní mechanické vlastnosti jako běžná ASA.

Zároveň si však zachovávají odolnost vůči UV světlu a povětrnostním podmínkám. [24], [25]

5.6 Polyethylentereftelát glykol (PETG)

Alternativa pro běžný PET je PETG. Oproti PLA je pevnější, odolnější a méně křehký. Přidáním glykolu během polymerizace vznikne materiál pružnější a lépe tisknutelný. Má dobrou odolnost proti nárazům, ale povrch se rychle opotřebovává (výrazná deformace první vrstvy při působení síly). Tepelná odolnost je vysoká, umožňující tepelné tvarování a leštění povrchu. Vyznačuje se silnou adhezí mezi vrstvami a nízkým smršťováním. Vyskytuje se i jako kompozit plněný uhlíkovými vlákny. [26]

5.7 Polyamid (PA)

Silný a odolný materiál, který je flexibilní v tenkých vrstvách. Teplota tání je vysoká a výtisky jsou hladké a lesklé. Kombinuje nízký součinitel tření spolu s dobrou adhezí vrstev. Rychle absorbuje vzdušnou vlhkost. Z toho důvodu jsou nutné speciální podmínky skladování, aby se předešlo vzniku tiskových vad. Vyskytuje se ve více variantách s odlišnými mechanickými vlastnostmi. [27]

5.8 Chlorovaný polyethylen (CPE)

CPE je pevnější než PLA a odolný jak ABS. Zároveň je tepelně a chemicky odolný. Nelze jej vyhladit chloroformem ani acetonem. Vyrábí se na bázi kyseliny tereftalové, jedná se o vylepšený PET materiál. Je recyklovatelný a lze jej použít pro styk s potravinami. Využívá se při tisku funkčních součástí z důvodu dobrých mechanických vlastností, velké přilnavosti vrstev a nízkým deformacím při tisku. Tenkostěnné výrobky mohou být průhledné. Při tisku nevylučuje škodlivé páry. [28]

5.9 CPE Carbon

Kompozit vyrobený z polymeru CPE doplněný o mletá karbonová vlákna. Z CPE získává dobré tiskové vlastnosti a uhlíková vlákna vylepšují vlastnosti mechanické. Vyznačuje se vyšší odolností povrchu, tvrdostí a lepší teplotní i chemickou odolností, než běžné CPE. Vlákna zajišťují velkou rozměrovou stabilitu a hladký povrch. Při tisku je vhodné používat trysky z kalené oceli, jelikož se jedná o abrazivní materiál, který by mosaznou trysku zničil. [29]

6 PLOŠNÉ TVÁŘENÍ POMOCÍ NÁSTROJE VYROBENÉHO FDM METODOU

Průmysl je neustále tlačěn do co nejlevnější a nejrychlejší výroby při zachování vysoké kvality produktů. Z toho důvodu jsou hledány alternativní metody pro tvorbu nástrojů. Používají se například nástroje vyrobené metodou SLS. Dostupnou alternativou je technologie FDM. S rozvojem materiálů a klesající cenou tiskáren se stávají zajímavé pro malosériové tváření. Oproti tradičním nástrojům z oceli jsou levnější a rychlejší na výrobu. Postrádají ale vysokou trvanlivost. [30]

6.1 Vlastnosti nástroje z 3D tiskárny

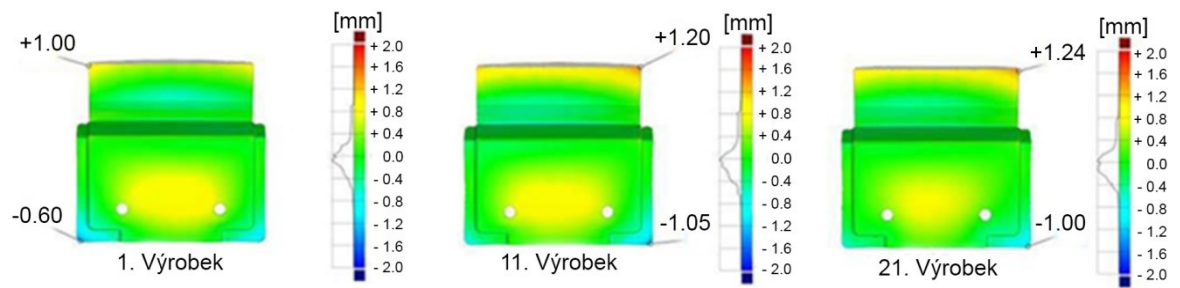
Na základě publikace uvedené Klimyukem [31], nastavení tisku a materiál mají velký vliv na výsledné vlastnosti nástroje. Nejdůležitější parametr ovlivňující jeho vlastnosti je materiál. Dále to je sestupně výplň, šířka obvodové stěny, tvar výplně, šířka trysky, teplota trysky, rychlost tisku, výška vrstvy, chlazení a spojení obrysu s výplní. Materiály a zpracovatelské teploty jsou navzájem závislé, proto je nutné teplotu tisku nastavit podle tepelných vlastností polymeru. Vnitřní struktura nástroje není důležitá při 100% výplni. Jako největší nedostatek se ukazuje jeho nízká pevnost při stlačení v porovnání s ocelí. [31]

Jak uvádí Liewald [32] velkou roli hrají vzájemné interakce mezi povrchem polymerního nástroje a kovu. Výhodou polymerů je nízká hodnota tření. Na druhou stranu mají oproti kovům nižší Yongův modul, což vede k viskoelastickým a plastickým deformacím již při nižších silách. Drsnost a textura povrchu kovu výlisku mají vliv na odolnost a výdrž polymerního nástroje. [32]

6.2 Výroba nástrojem vyrobeným na 3D tiskárně

Konečný výrobek musí splňovat předem stanovené výrobní deviace. Nástroje podléhají opotřebení, které způsobuje postupné zvětšování odchylek, až do bodu, kdy se nástroj stává nevyhovujícím. Při výrobě prvních kusů dochází ke zmáčknutí vrstev materiálu, a to způsobuje skokové zvětšení rozměrových odchylek na výrobku. [30]

Při rozměrové analýze na Obrázku 9 vidíme nárůst odchylek mezi prvním a dvacátým prvním výrobkem. Jedná se o oblast s největším nárůstem odchylek. Následně se velikosti odchylek ustálily a nedocházelo k jejich výraznému nárůstu. [30]



Obrázek 10 Analýza rozměrové shody plechového dílu [30]

7 VYHODNOCOVÁNÍ DAT

Data můžeme dělit do různých kategorií a používat různé metody vyhodnocování.

Základní dělení dat:

kvalitativní: nečíselná data (míra spokojenosti)

kvantitativní: číselná data (výška, hmotnost)

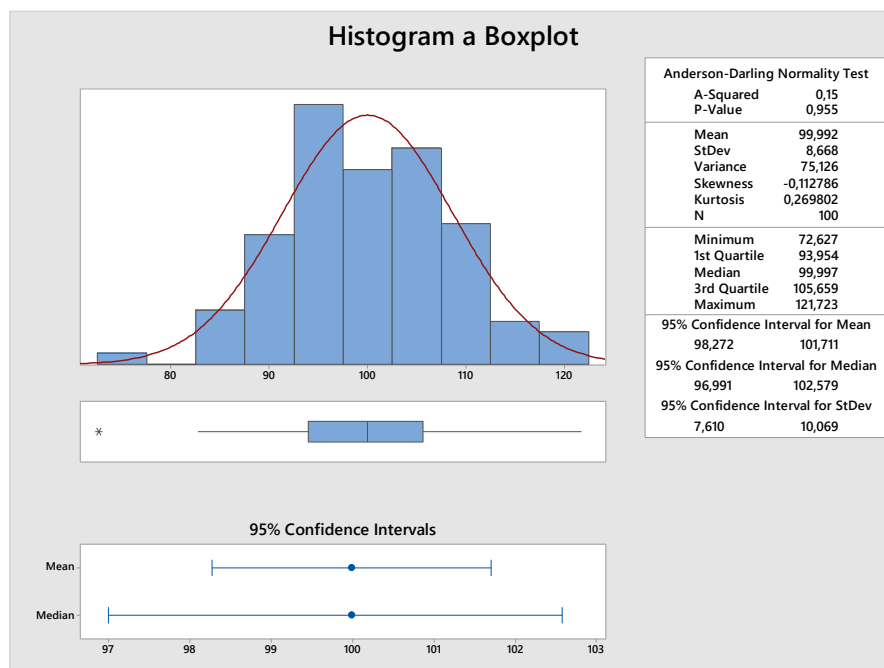
7.1 Normalita dat

Pro testování dat je důležité znát jejich rozdělení. Normální rozdělení se přesně testuje výpočtem například pomocí Anderson-Darlingova testu normality. Můžeme jej také zjistit, proložením histogramu Gaussovou křivkou. Histogram je graf, jenž má na ose x hodnoty sledované veličiny (mohou být rozdělené do intervalů pro spojitá data) a na ose y jejich četnost. Pokud data přibližně kopírují křivku, můžeme předpokládat normalitu. [33]

7.2 Exploratorní datová analýza

Provádí se pro zjištění základních údajů o datech (jejich normálnost, šikmost, špičatost a nalezení odlehlých hodnot). Snaží se identifikovat, jaké analýzy budou dále používány.

Využívají se nejčastěji grafy: diagram rozptýlení, boxplot, histogram [33]



Obrázek 11 Histogram a Boxplot s normálním rozdělením a jednou odlehlou hodnotou

7.2.1 Testy odlehlých hodnot

Vyžívají se ke zjištění odlehlých hodnot. Může se jednat o odlehlé hodnoty, nebo hrubé chyby (například způsobené nepozorností). Odlehlé hodnoty se v souboru ponechávají, hrubé chyby se odstraňují. [33]

7.3 Statistické hypotézy

Pomáhají určit, zda data vyhovují nějakému předpokladu. Stanoví se nulová hypotéza (H_0) a alternativní hypotéza (H_1). Rozhoduje se o nezamítnutí, nebo zamítnutí nulové hypotézy. Zamítnutím nulové hypotézy je přijata hypotéza alternativní. Dále se volí kritická hodnota a hladina významnosti (nejčastěji $\alpha=0,05$), která určuje, s jakou pravděpodobností bude učiněn správný závěr, a zda bude přijata nebo zamítnuta nulová hypotéza. [34]

		Výsledek testu	
		Platí H_0	Platí H_1
Skutečnost	Platí H_0	Správné rozhodnutí, pravděpodobnost $1 - \alpha$ (spolehlivost testu)	Chyba I. druhu, pravděpodobnost α (hladina významnosti)
	Platí H_1	Chyba II. druhu, pravděpodobnost β	Správné rozhodnutí, pravděpodobnost $1 - \beta$ (síla testu)

Obrázek 12 Chyby při přijímání a zamítání hypotéz [34]

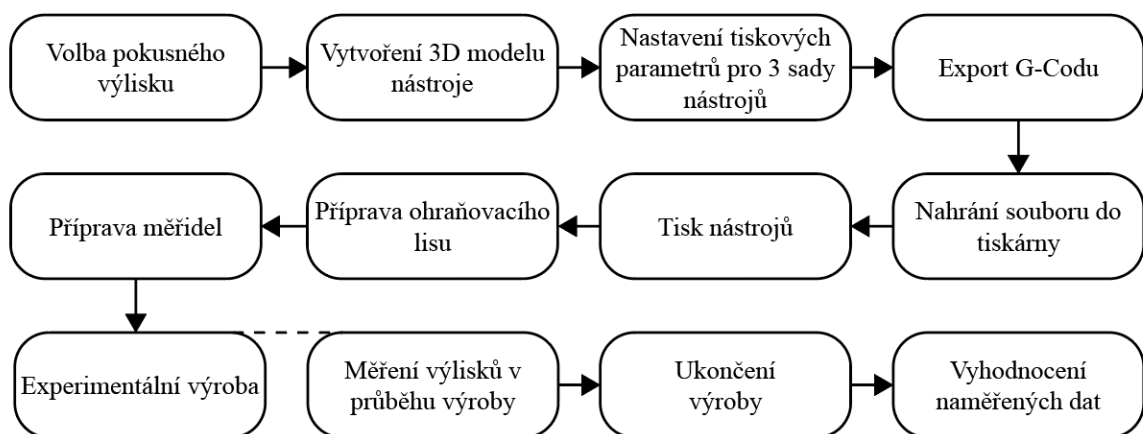
8 SHRNU TÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

3D tisk je technologie s velice širokým využitím. Díky různým druhům tisknutelných materiálů a technologií samotného tisku, je možné aditivně vyrábět jak okrasné, tak také mechanicky namáhané výrobky. Uplatňuje se i pro výrobu tvářecích nástrojů s cílem urychlit dodání dílů pro zákazníky a zmenšit náklady. Chování takto vyráběných nástrojů se odlišuje od tradičních ocelových. Polymery podléhají rychlejšímu opotřebení. Pro analýzu chování lze použít statistické metody a hypotézy.

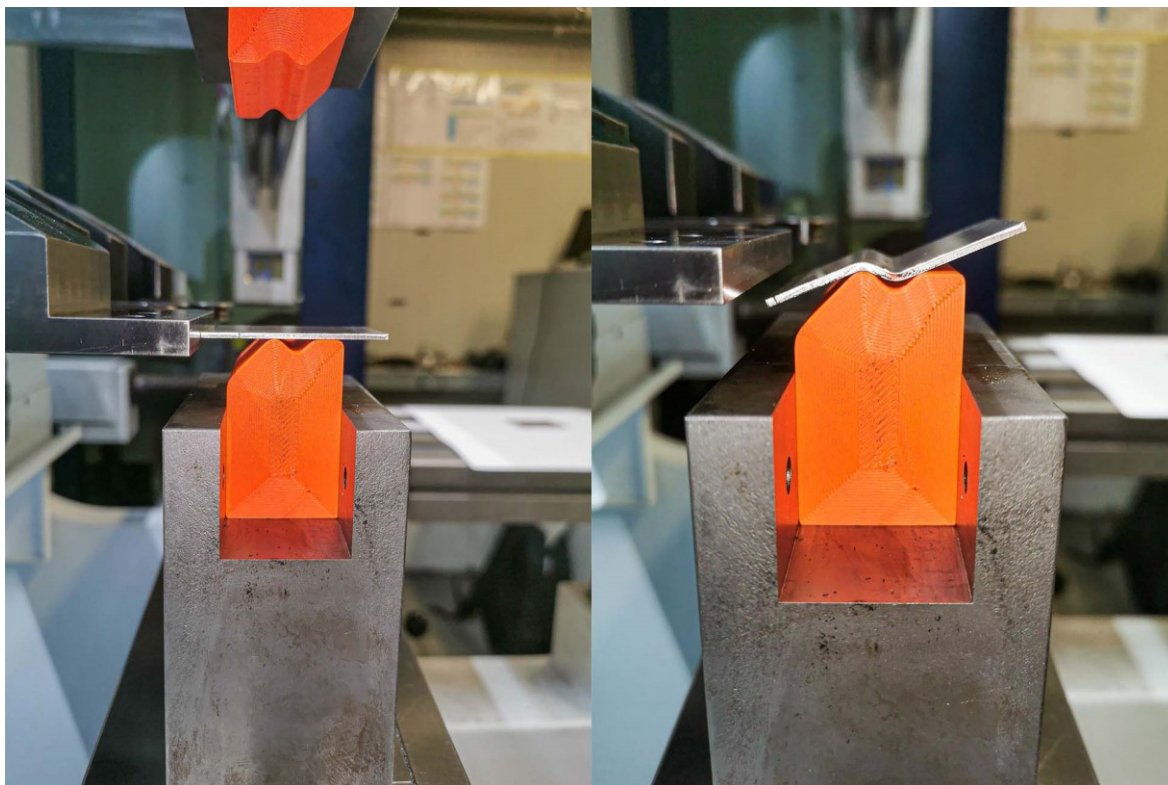
II. PRAKTICKÁ ČÁST

9 CÍLE A METODIKA PRAKTICKÉHO EXPERIMENTU

Experiment si klade za cíl zjistit a porovnat výdrž sad ohýbacích nástrojů vyrobených aditivní metodou z polymeru. Na výrobu nástrojů byla použita 3D tiskárna české firmy Prusa Original Prusa i3 MK3S+. Jako materiál byl použit polymer PLA. Byly vyrobeny celkem tři sady nástrojů, skládající se z razníku a matrice. První sada byla vyrobena s dvaceti obvodovými stěnami (perimetry), druhá s deseti a třetí s pěti. Ostatní tisková nastavení zůstala nezměněna. Ohýbání vybraného experimentálního výlisku bylo provedeno na ohraňovacím lisu TruBend 5170. Pro správné nastavení stroje byly na každé sadě nejprve ohnuty tři zkušební výlisky, které nebyly zaznamenány ve výsledcích. V průběhu výroby se provádělo měření rozměrů výrobků i samotných nástrojů. Maximální počet kusů ohnutých jednou sadou byl stanoven na jedno sto. Pokud nástroj vyrobil pět výrobků po sobě, které nesplňovaly maximální odchylku $-0,2$ mm, byl experiment přerušen. Sada nástrojů s 20 a 10 perimetry prošla testem s maximálním množstvím vyrobených výrobků s požadovanou odchylkou (sto kusů s maximální odchylkou $-0,2$ mm). Odchylka byla stanovena pouze do mínusu, na základě předpokladu postupného deformace nástroje. Sada s 5 perimetry nesplnila pětkrát po sobě požadovanou odchylku, a tudíž byl test přerušen. Následně proběhlo zpracování naměřených hodnot a provedení analýzy dat.



Obrázek 13 Schéma experimentu



Obrázek 14 Nástroj s 20 perimetry připravený pro ohýbání (vlevo) a nástroj po ohybu (vpravo)

9.1 Software a zařízení použita při experimentu

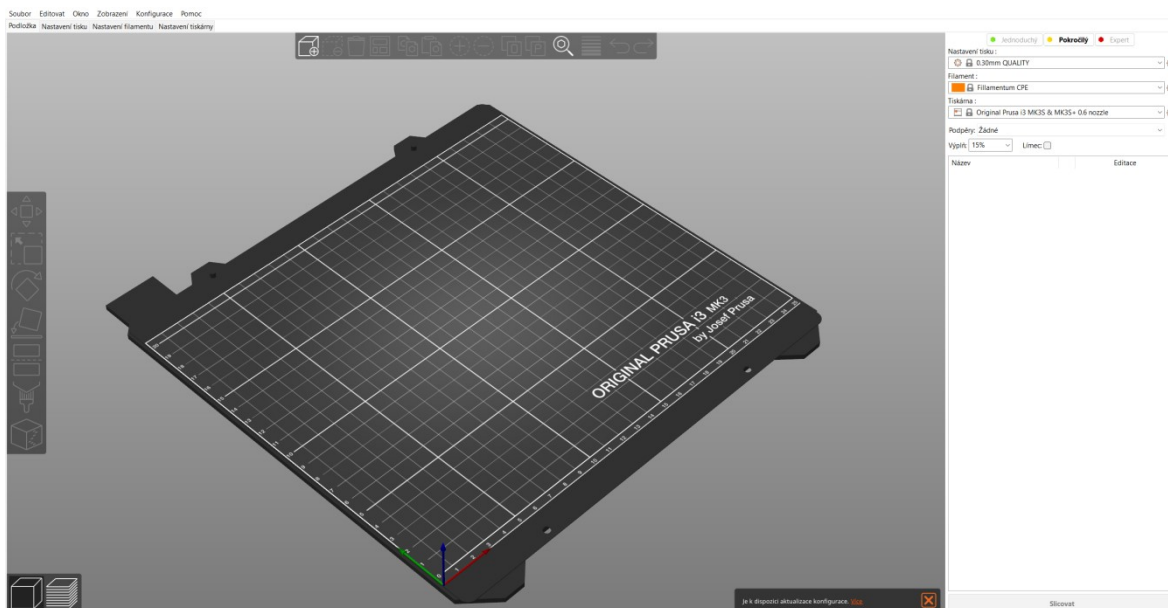
Model nástrojů byl vytvořen v programu Solid Edge 2020. Nastavení tisku a převedení na G-Code bylo provedeno v programu PrusaSlicer 2.3.0. Vytisknuto na tiskárně Original Prusa i3 MK3S+ materiálem PLA od firmy Plasty Mladeč. Samotný ohyb byl realizován na ohraňovacím lisu TruBend 5170 od firmy TRUMPF. Měření výrobků bylo provedeno digitálním úchylkoměrem MarCator 1086R.

9.1.1 Solid Edge 2020

Jedná se o 3D CAD software sloužící k navrhování strojírenských součástí. Byl zde vytvořen náčrt a také prostorový model pro razník i matrici.

9.1.2 PrusaSlicer

Software vyvinutý firmou Prusa založený na open-source projektu Slic3r. Nabízí možnost vytvořit z 3D modelu program pro 3D tiskárnu (G-Code). Nastavují se zde tiskové parametry například materiál, obvodové stěny (perimetry), tvary a procenta výplně, ale také nastavení samotné tiskárny jako jsou teplota podložky a trysky, průměr trysky, a také rychlosti posuvů.



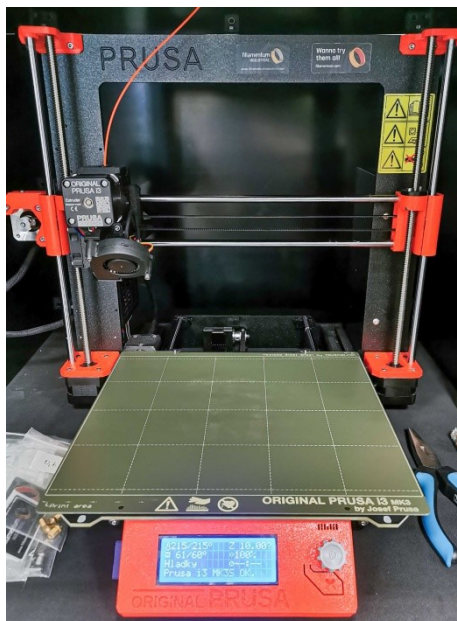
Obrázek 15 Rozhraní Prusa Slicer 2.3.0

9.1.3 Original Prusa MK3S+

3D tiskárna typu FDM dokáže tisknout široký výběr termoplastů. Dodávány byly do tiskové hlavy z cívky. Konec cívky stačilo vsunout do tiskové hlavy a podávací kolečka zavedla strunu dovnitř. Jakmile byla tiskárna nahřátá, začala podávací kolečka sunout materiál do hotendu. Ten byl následně protlačen přes trysku na vyhřátou podložku. Zde ochladl a stal se pevným. Po skončení tisku stačilo výrobek z tiskové podložky sloupnout. Na Obrázku 15 můžeme vidět tiskárnu připravenou k tisku se zavedeným filamentem. Nachází se v ochranném boxu určeném k zadržení tepla.

Pohyby tiskárny

Pohyb tiskárny probíhá ve 3 osách. Tisková hlava se pohybuje v osách X a Z. Podložka na ose Y. Poloha na ose X a Y je řízena řemenicí a řemeničkou. Pohyb po ose Z je zajištěn přes trapézové šrouby.



Obrázek 16 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ s hladkou podložkou v ochranném boxu

9.1.4 TruBend 5170

CNC řízený ohraňovací lis sloužící k tváření rovinných plechů ohýbáním. Aby bylo možné ohýbat výrobky na lisu, jsou zapotřebí nástroje, které se upevňují na berana a lisovací stůl. Volbu nástroje ovlivňuje tvar a úhel ohybu výlisku, popřípadě násobnost ohybu. Výrobek se vkládá na spodní nástroj stroje ručně, aby doléhal na zadní doraz. Lis je ovládán nožně, tudíž stiskem pedálu zahájíme pohyb berana dolů. Samotný ohyb probíhá dle předem nastavených vzdáleností a rychlostí posuvu. Následně vyjede beran automaticky nebo manuálně nahoru, aby bylo možné výlisek odebrat a založit nový plech.

Základní technické údaje

Tabulka 1 Technické údaje stroje TruBend 5170

Lisovací síla	1700 kN
Maximální délka ohybu	3230 mm
Maximální vzdálenost stůl-beran	735 mm
Přesnost na ose Y (lisovací osa)	$\pm 0,005$ mm
Osa Y rychlý chod	220 mm/s
Osa Y pracovní chod	25 - 10 mm/s



Obrázek 17 Ohraňovací lis TruBend 5170

9.2 Měřicí přístroje

Byl použit digitální úchylkoměr od značky Mahr model MarCator 1086 s ocelovým kulovým dotekem pro měření rovných ploch. Měřicí rozsah byl 0-25 mm s přesností 0,02 mm. Rozlišení měření bylo 0,01 mm.



Obrázek 18 Digitální úchylkoměr Mahr a ukázka doteků

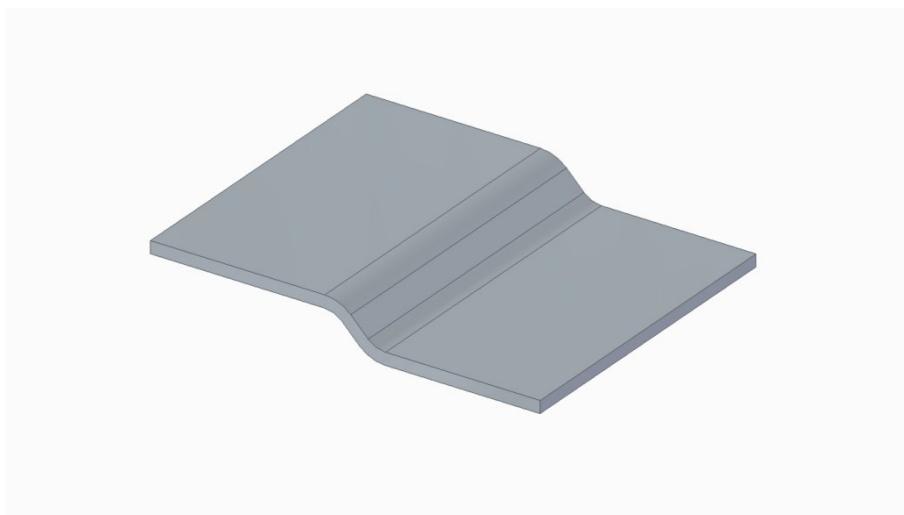
Pro měření tloušťky materiálu bylo použito digitální posuvné měřidlo Mitutoyo s rozsahem 0-150 mm a největší chybou měření 0,02 mm. Rozlišitelnost měřidla byla 0,01 mm.

9.3 Experimentální výlisek

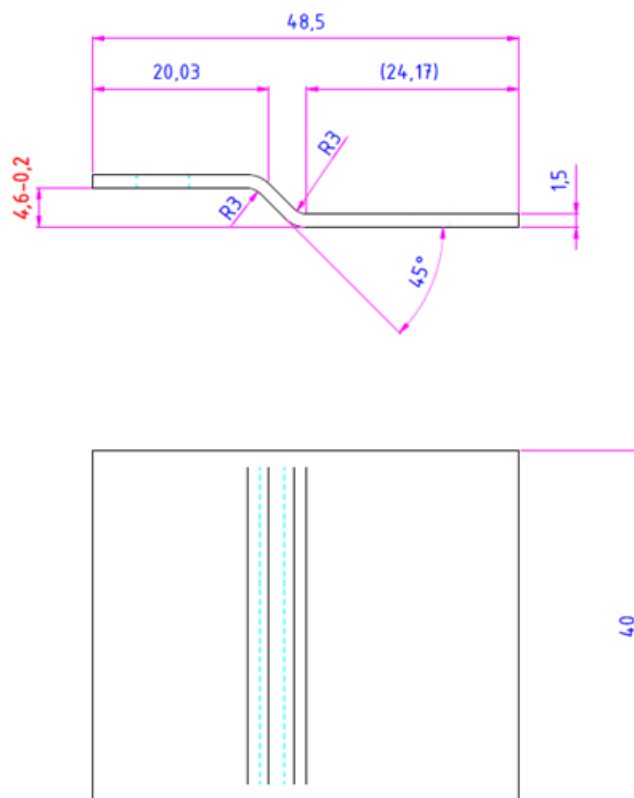
Jako ohýbaný díl byla zvolena zjednodušená verze výlisku dlouhodobě vyráběná firmou KALINA industries s.r.o., který byl vybrán z důvodů materiálových a geometrických. Násobný ohyb provedený na jeden cyklus přinesl významnou časovou úsporu jak stroje, tak také obsluhy. Materiálem byla nerezová ocel 1.4301 tloušťky 1,5 mm, která byla zvolena jako reprezentativní materiál z důvodu jejího častého ohýbání v běžné výrobě. Jako kritický rozměr byla zvolena výška výrobku. Stroj byl nastaven tak, aby výška při prvním ohybu byla 4,6 mm. Dolní toleranční pole bylo nastaveno na -0,2 mm. Horní tolerance byla 0 mm.

9.3.1 Výroba experimentálního výlisku

Plech nerezové oceli 1,4301 1000x2000x1,5 mm byl rozřezán na laseru TruLaser 3030 Fiber od firmy TRUMPF. Jedná se o CO₂ laser. Celkem bylo vyrobeno 320 výpalků (všechny ze stejné tabule). Tabule byla nastříkána ze spodní strany ochranou emulzí, aby nedošlo ke znečištění materiálu. Samotné řezání trvalo kolem 8 minut.



Obrázek 19 3D model experimentálního výlisku



Obrázek 20 Náskres dílce s vyznačeným kritickým rozměrem (červeně)

9.4 Kyselina polymléčná (PLA)

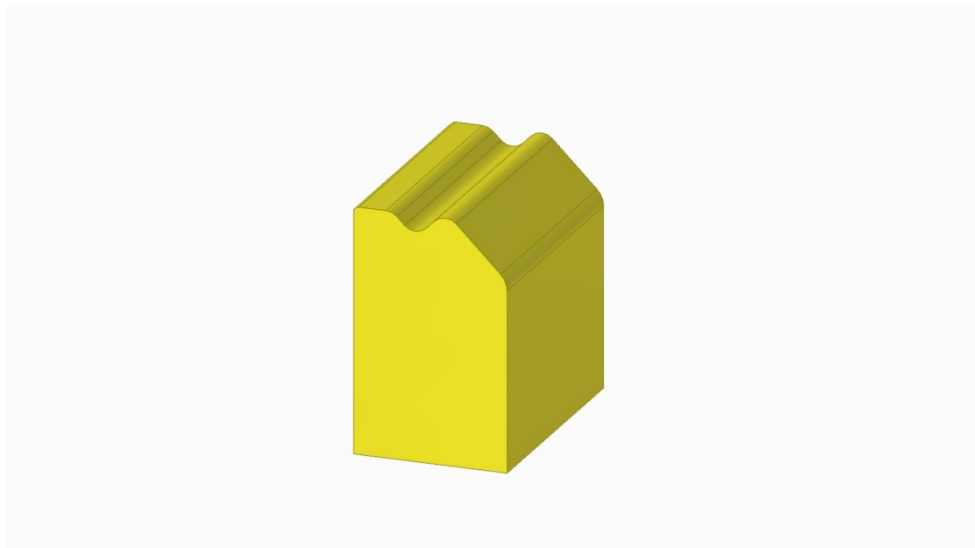
Jako materiál pro tisk byl zvolen filament PLA od firmy Plasty Mladeč (Příloha P I: Technický list pro materiál PLA). Důvody pro volbu tohoto materiálu jsou jeho tvrdost, odolnost proti tlaku a kvalitní tisk. Zároveň se materiál vyznačuje nízkou cenou a oproti ABS má pevnější spoje mezi vrstvami. Nedochozí k pružení nástrojů jako u materiálů z CPE nebo PA.

9.5 Modelování a výroba nástrojů

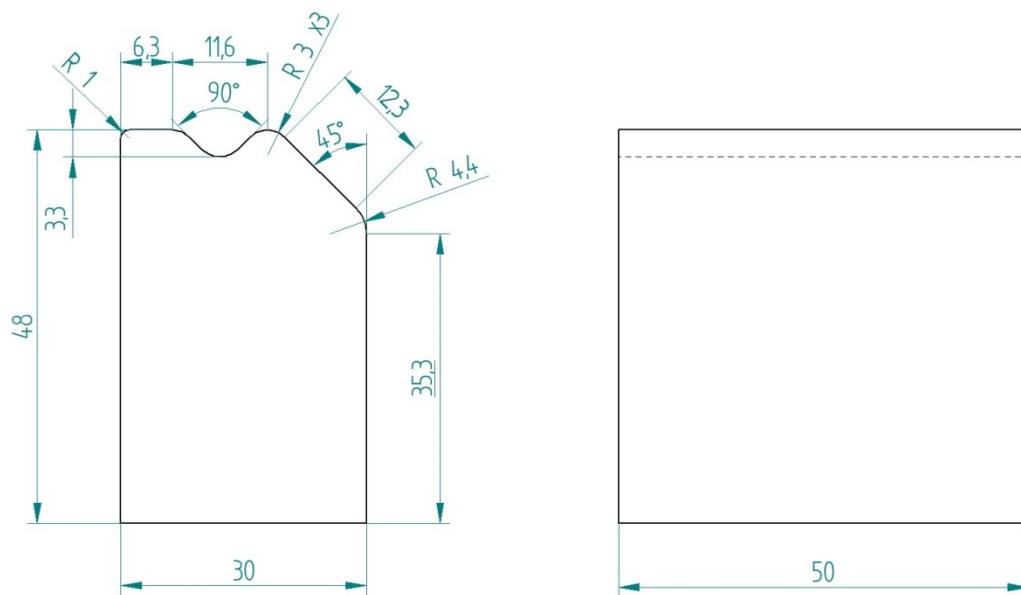
Jako reference sloužil nástroj používaný na ohyb výrobku tvarově stejného, jako byl experimentální díl. Nástroj se neupínal přímo do stroje, ale do speciálních ocelových přípravků vyrobených jako univerzální držáky pro polymerní nástroje. Ty zároveň pomáhaly uspořít materiál, jelikož splňovaly minimální výšku nástroje ohraňovacího lisu. V přípravcích byly vyvrtány závitové otvory pro šrouby, které sloužily jako aretace a zabraňovaly hornímu nástroji vypadnout z přípravku. Tyto díry byly vyvrtány pomocí vrtačky po samotném tisku.

9.5.1 Tvorba modelu

Modelování proběhlo v softwaru Solid Edge 2020. Jednalo se o nástroj navržený na provedení dvou ohybů o velikosti 45° . Zároveň měl umožnit položení dílu na dolní nástroj a zadní doraz, aby nemusel být držen obsluhou. Nástroj se musel vejít do přípravku a mít možnost následného provrtání pro aretační šrouby. Z toho důvodu byla zvolena šířka nástroje 50 mm, jelikož šrouby jsou od sebe vzdálené 40 mm. Celková výška nástroje byla 48 mm z důvodu bezpečnosti stroje. Funkční rádiusy měly poloměr 3 mm. Jejich velikost byla zvolena na základě předpokladu vyšší odolnosti mohutnějších rádiusů z důvodu větší tlačící plochy. Bylo očekáváno využívání větších rádiusů výlisků i při výrobě pro zákazníky, jelikož jejich rozměry jsou málokdy funkčně důležité. Ohybnice a ohybník byly totožné.



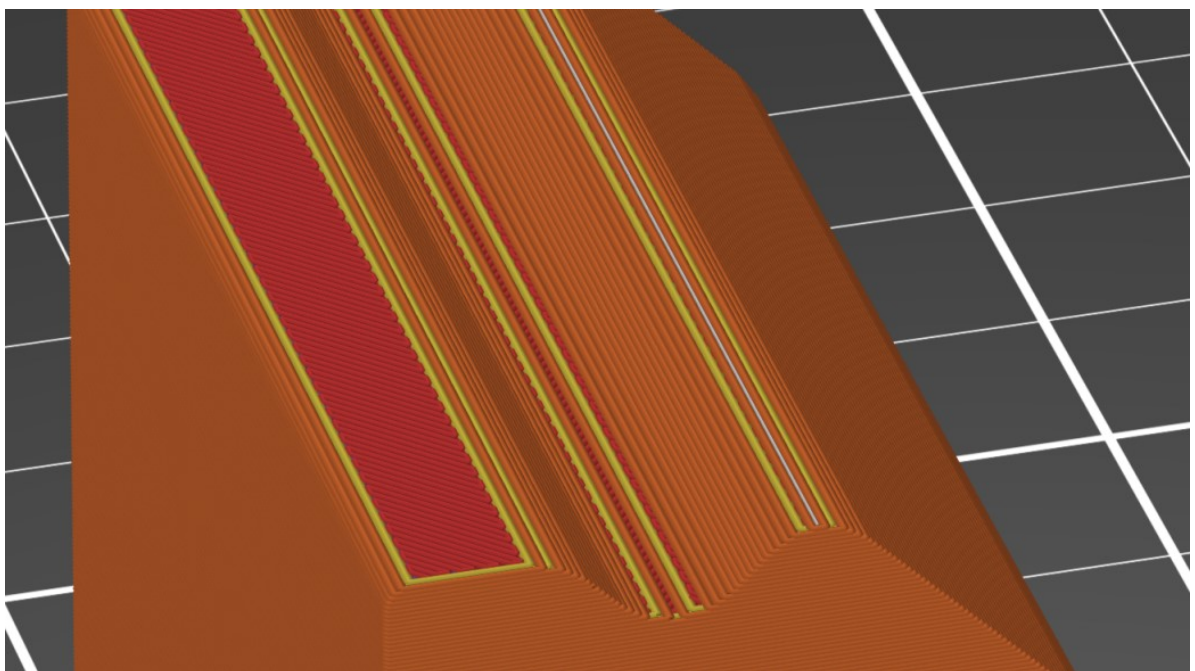
Obrázek 21 3D model nástroje



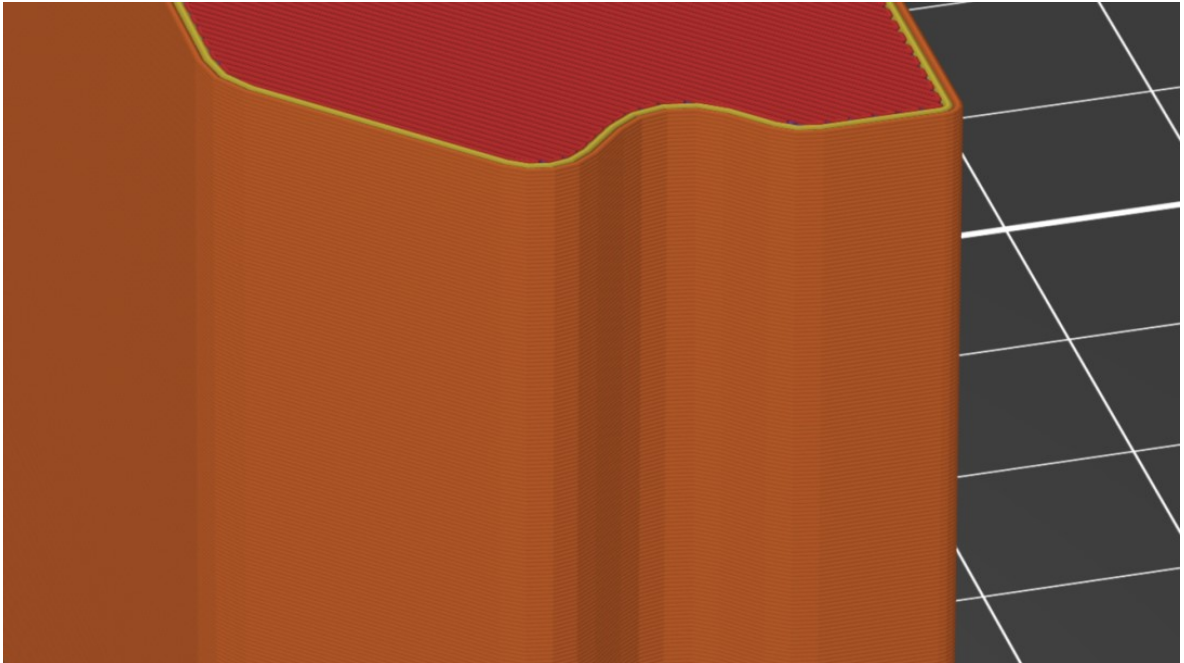
Obrázek 22 Náskres nástroje

9.5.2 Příprava modelu pro tisk

Model byl v Solid Edgy uložen ve formátu 3MF. Následně byl otevřen v programu PrusaSlicer. Zde se odehrála veškerá příprava pro tisk a také tvorba souboru pro tiskárnu. Nejdříve byl vložen samotný model. Orientace tisku byla zvolena ve směru nejdelšího rozměru nástroje z důvodu zajištění co největší přesnosti vrstvení materiálu ve funkčních plochách.



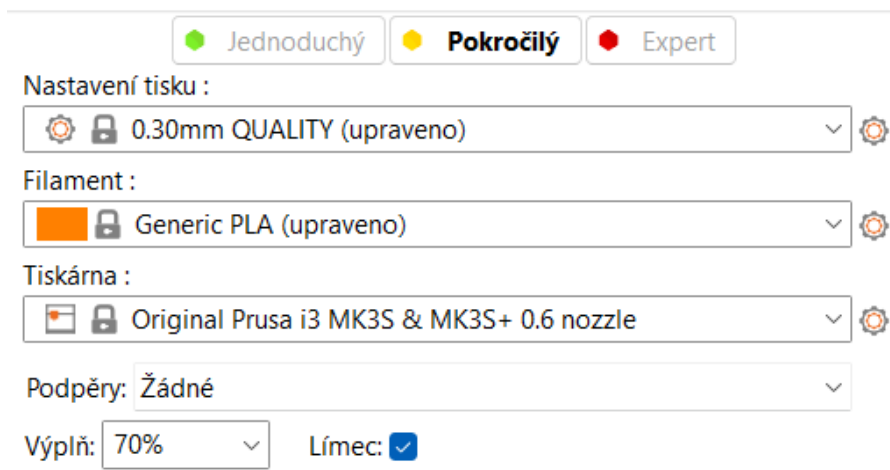
Obrázek 23 Funkční plochy při špatně zvolené tiskové ose



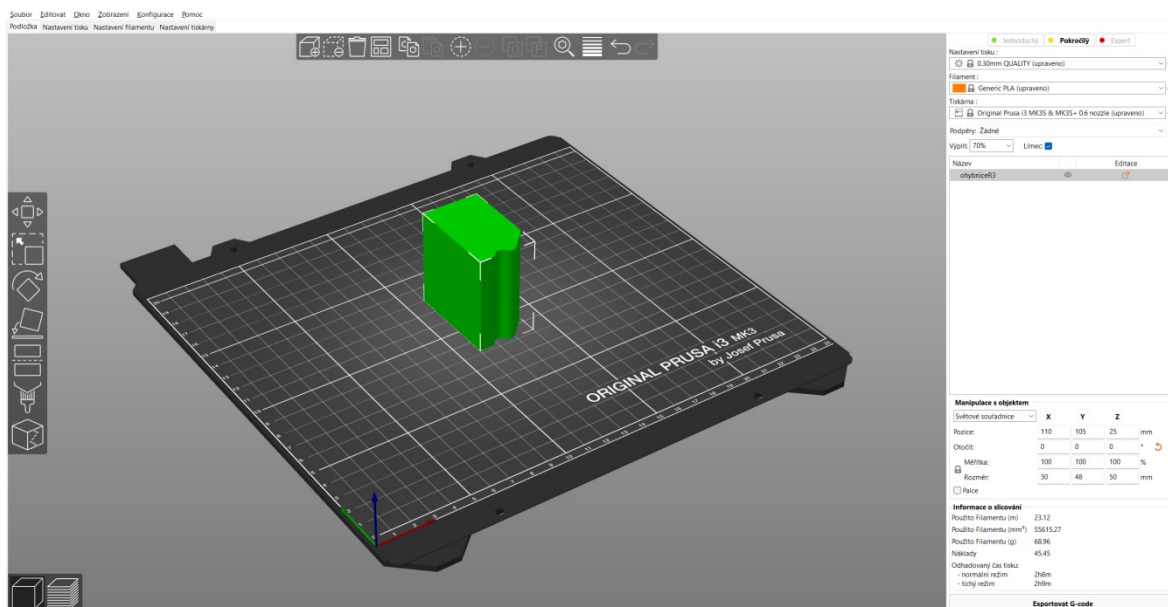
Obrázek 24 Funkční plochy při tiskové ose ve směru největšího rozměru

Základní nastavení tisku

V nastavení materiálu bylo zvoleno generické PLA. Použitý polymer PLA od Plastů Mladeč vyhovoval těmto parametrům. Nastavení tisku bylo vybráno 0,30mm QUALITY (název pro tisk s výškou vrstvy 0,3 mm). Zvolená výška vrstev byla stanovena na základě předchozích zkušeností s tiskem velkých objektů. Představovala optimální poměr mezi kvalitou tisku a tiskovým časem. Byla použita tryska o průměru 0,6 mm. Důvod pro její volbu bylo značné urychlení tisku a zároveň zachování kvality. Při použití velkých trysek často dochází ke ztrátě detailu, ale u tisku tohoto typu to nehrozilo. Nastavení trysky probíhalo zároveň s volbou tiskárny. V mém případě se jednalo o Original Prusa i3 MK3S & Mk3s+ 0.6 nozzle.



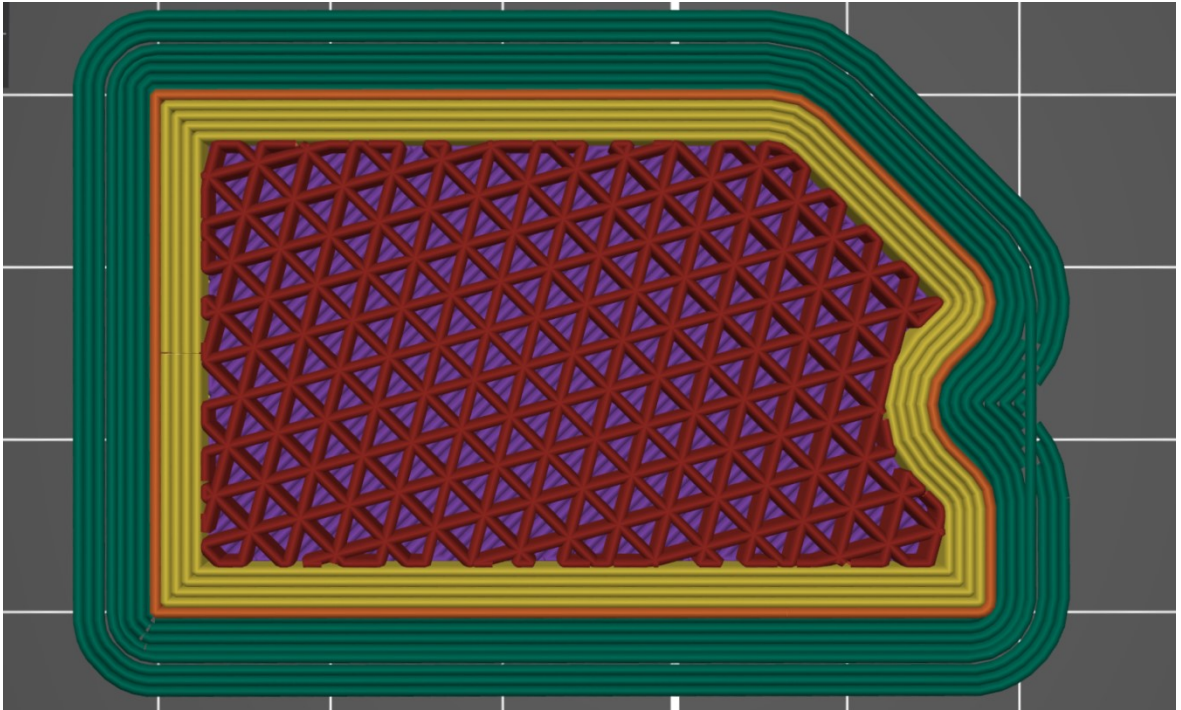
Obrázek 25 Ukázka základního nastavení tisku



Obrázek 26 Nástroj umístěný ve středu tiskové podložky

Výplň

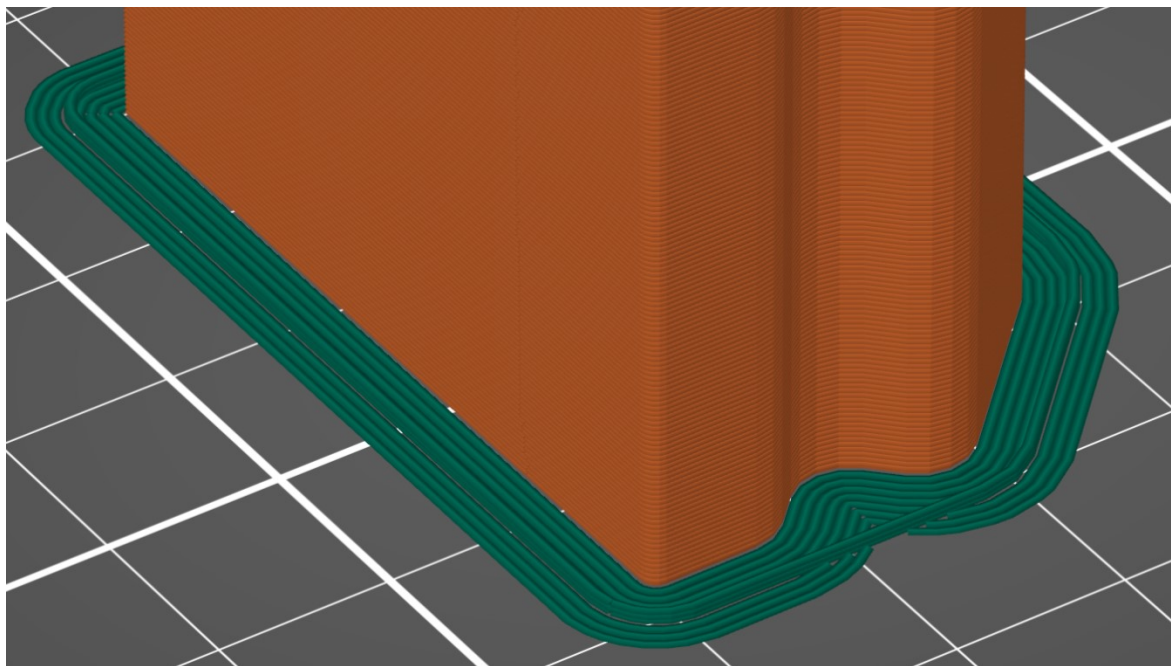
Výplň byla nastavena na 70 % a jako tvar byly zvoleny trojúhelníky. Vysoké procento výplně mělo za úkol zajistit pevnost výtisku. Při příliš velkém procentu výplně by docházelo k deformacím.



Obrázek 27 Vnitřní struktura nástroje (70% trojúhelníková výplň (červená), perimetry (žlutá a oranžová), plná boční stěna (fialová), límec (zelená))

Obrysy a límce

Při každém tisku byl použit límec, aby se předešlo odlepení první vrstvy od podložky a deformacím nástroje způsobeným stahováním polymeru při ochlazování. Šířka límce byla nastavena na 5 mm.



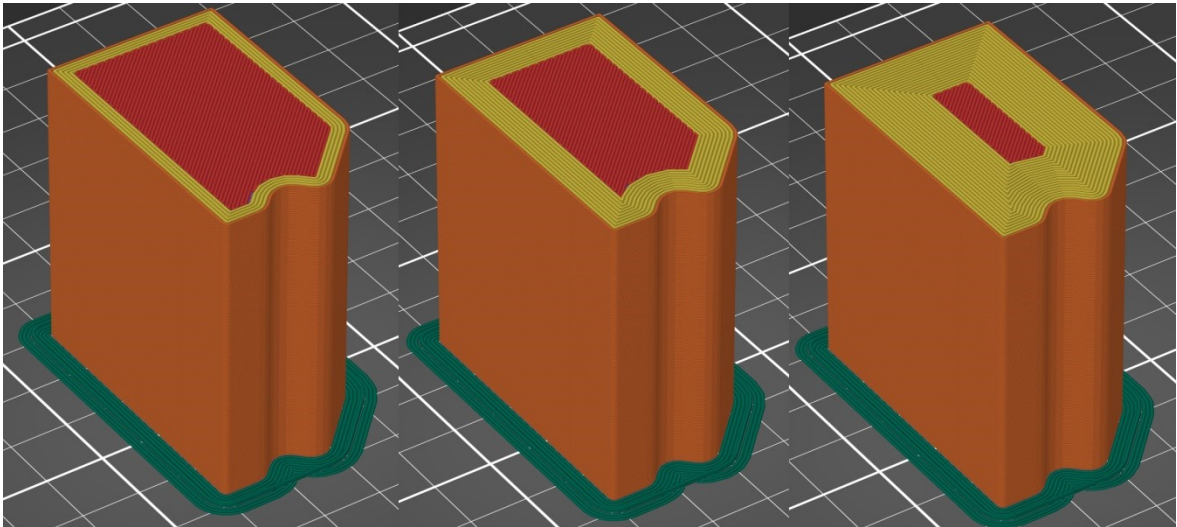
Obrázek 28 5mm límec kolem základny nástroje (zelená)

Vrstvy a parametry

V této záložce programu se nacházelo nastavení perimetrů. Počet perimetrů nám určoval, kolik obvodových stěn bude mít samotný výtisk. Perimetry byly zcela vyplněny materiálem. Uvnitř perimetrů se nacházela předešle zvolená 70% výplň. Toto bylo jediné nastavení, které bylo měněno pro každou sadu. První tisk proběhl s dvaceti perimetry, druhý s desíti a třetí s pěti. Byla zvolena pozice švu na polohu zezadu, aby nebyl šev v oblasti funkčních ploch, nebo v části, kde dochází ke kontaktu mezi přípravkem a nástrojem.

Tabulka 2 Rozdílné parametry nástrojů

	20 perimetrů	10 perimetrů	5 perimetrů
Použito filamentu (m)	27,61	25,09	23,12
Použito filamentu (mm ³)	66 415,35	60 353,88	55 615,27
Použito filamentu (g)	85,36	74,84	68,96
Náklady (Kč)	54,27	49,32	45,45
Čas tisku (min)	169	148	128



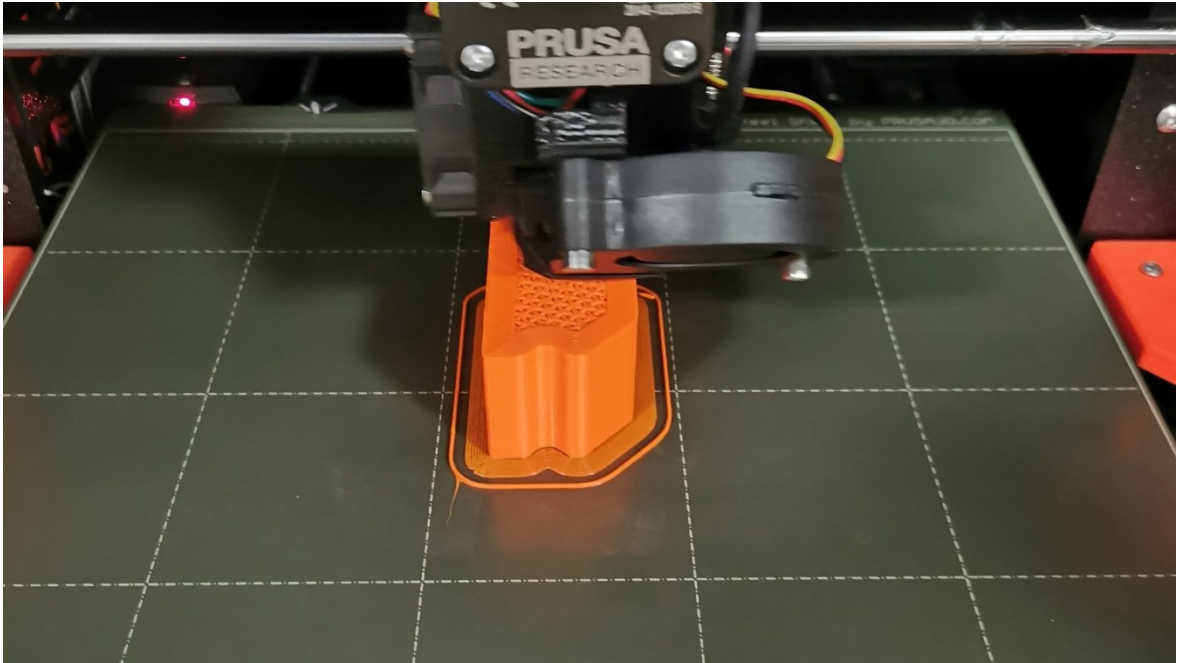
Obrázek 29 Nástroje s různým počtem perimetrů (perimetry označeny žlutě). Zleva pět, deset a dvacet perimetrů

Slicování a export do G-Codu

Po nastavení parametrů byl model převeden přes slicing (plátkování) do modelu ukazujícího jednotlivé vrstvy. Následně byl proveden export do G-Codu. Tento soubor sloužil pro nahrání přes SD kartu do 3D tiskárny.

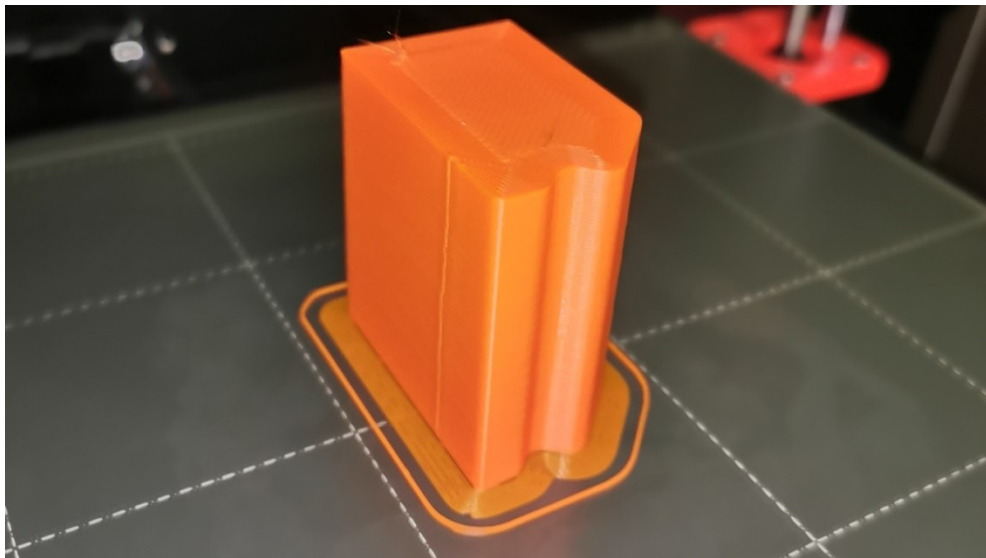
9.5.3 Tisk

Pro tento tisk byla zvolena hladká podložka s jednou vrstvou lepidla. SD karta byla vložena do portu tiskárny. V menu tiskárny byl nalezen požadovaný soubor a ten byl vybrán. Začalo vyhřívání podložky a trysky na požadovanou teplotu. PLA filament byl zaveden do tiskové hlavy, a dále automaticky pomocí dávkovacích koleček. Po vyhřátí začal tisk automaticky.



Obrázek 30 Nástroj při tisku (hotový z 60 %)

Hotový výrobek byl ponechán na tiskové podložce, dokud nezchladnul. Následně byl odlepen z tiskové podložky.



Obrázek 31 Hotový nástroj na podložce

9.6 Nastavení ohraňovacího lisu

Nastavení bylo stejné pro všechny sady s výjimkou korekce dolní úvratě, která musela být upravována z důvodu drobných odlišností ve výšce nástrojů.

Tabulka 3 Nastavení ohraňovacího lisu TruBend 5170

Nastavení ohraňovacího lisu TruBend 5170	
Hlavní nastavení	
Materiál	1,4301
Tloušťka plechu	1,49 mm
Metoda ohýbání	Ražením
Korekce dolní úvrati pro 20 perimetrů	-39,698 mm
Korekce dolní úvrati pro 10 perimetrů	-39,550 mm
Korekce dolní úvrati pro 5 perimetrů	-39,300 mm
Délka ohybu	40 mm
Rameno vlevo	22 mm
Rameno vpravo	22 mm
Nastavení rychlosti os	
Rychlý chod dolů	220 mm/s
Upnutí	7 mm/s
Lisování	7 mm/s
Uvolnění tlaku	5 mm/s
Rychlý chod nahoru	150 mm/s
Zadní dorazy	
R1	15 mm
X	20 mm
Nastavený automatický odjezd	Ano
Lisovací rám	
Vzdálenost bodu utlumení 1	2,00 mm
Korekce bodu upnutí	7,50 mm
Doba čekání v bodě upnutí	0,5 s
Šikmá poloha	0 mm
Doba zastavení v dolní úvrati	0,5 s
Otevření	5,00 mm
Automatická dekomprese	Ano

10 KALINA INDUSTRIES S.R.O.

Společnost byla založena v roce 1990 jako výrobce automobilových těsnění a kovotlačitelských výrobků. Firma sídlí ve Zlíně a zaměstnává 70 zaměstnanců. Disponuje moderně vybavenou lisovnou s rychloběžnými i excentrickými lisami s tonáží 5-250 tun. Nástrojárna je vybavena strojem na elektroerozivní obrábění. Řezání materiálů probíhá na sekačkách a plotrech. Zároveň firma provozuje pracoviště zakázkové výroby těsnění s velkou přidanou hodnotou rukodělné práce, středisko s velmi dynamickým rozvojem LVO (zde jsem působil v rámci bakalářské práce), vlastní CO₂ laser TruLaser 3030 od firmy TRUMPF a nově 8kW laser ByCut Smart od společnosti Bystronic. Dále se zde nachází vodní paprsek Mach 500 od firmy Flow a ohraňovací lis TruBend 5170 od společnosti TRUMPF. Experimentální část práce byla realizována ve spolupráci s firmou Kalina industries s.r.o. s využitím jejich zařízení a materiálů.

11 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ

V průběhu experimentu byl každý výrobek změřen úchylkoměrem a jeho výška byla zapsána. Pro sadu nástrojů s 20 a 10 perimetry bylo provedeno všech 100 ohybů. Sada s 5 perimetry nesplnila toleranci 5krát v řadě, a tudíž byl experiment přerušen.

K výškám výlisků vyrobených sadou nástrojů s 20 perimetry bylo referováno jako PLA 20. Stejně pojmenování platilo i pro dvě zbylé sady a jejich výrobky. Výška výlisku byla obecně označena jako **a**.



Obrázek 32 Výška výrobku označena jako *a*

Tabulka 4 Naměřené hodnoty výšek výlisků pro sadu nástrojů s 20 perimetry

PLA 20							
Výška výlisku							
číslo výlisku	a (mm)	číslo výlisku	a (mm)	číslo výlisku	a (mm)	číslo výlisku	a (mm)
1	4,6	26	4,55	51	4,52	76	4,5
2	4,59	27	4,55	52	4,54	77	4,5
3	4,58	28	4,54	53	4,53	78	4,49
4	4,58	29	4,55	54	4,52	79	4,51
5	4,58	30	4,54	55	4,53	80	4,51
6	4,57	31	4,55	56	4,53	81	4,49
7	4,57	32	4,56	57	4,52	82	4,51
8	4,58	33	4,55	58	4,52	83	4,51
9	4,58	34	4,56	59	4,53	84	4,5
10	4,58	35	4,55	60	4,52	85	4,49
11	4,57	36	4,54	61	4,53	86	4,5
12	4,57	37	4,54	62	4,54	87	4,5
13	4,58	38	4,53	63	4,52	88	4,48
14	4,58	39	4,54	64	4,52	89	4,5
15	4,59	40	4,54	65	4,53	90	4,49
16	4,57	41	4,55	66	4,51	91	4,49
17	4,56	42	4,53	67	4,51	92	4,48
18	4,56	43	4,53	68	4,51	93	4,48
19	4,57	44	4,53	69	4,52	94	4,48
20	4,56	45	4,53	70	4,49	95	4,48
21	4,56	46	4,55	71	4,51	96	4,49
22	4,57	47	4,54	72	4,5	97	4,48
23	4,56	48	4,53	73	4,5	98	4,47
24	4,55	49	4,54	74	4,51	99	4,47
25	4,55	50	4,54	75	4,51	100	4,46

Tabulka 5 Naměřené hodnoty výšek výlisků pro sadu nástrojů s 10 perimetry

PLA 10							
Výška výlisku							
číslo výlisku	a (mm)	číslo výlisku	a (mm)	číslo výlisku	a (mm)	číslo výlisku	a (mm)
1	4,6	26	4,54	51	4,52	76	4,48
2	4,59	27	4,52	52	4,5	77	4,48
3	4,59	28	4,53	53	4,49	78	4,47
4	4,58	29	4,52	54	4,51	79	4,47
5	4,58	30	4,53	55	4,5	80	4,47
6	4,57	31	4,54	56	4,49	81	4,45
7	4,54	32	4,53	57	4,49	82	4,46
8	4,55	33	4,52	58	4,51	83	4,45
9	4,54	34	4,52	59	4,5	84	4,46
10	4,54	35	4,52	60	4,48	85	4,45
11	4,56	36	4,54	61	4,5	86	4,46
12	4,54	37	4,52	62	4,53	87	4,47
13	4,55	38	4,53	63	4,49	88	4,47
14	4,55	39	4,52	64	4,49	89	4,45
15	4,56	40	4,51	65	4,52	90	4,46
16	4,55	41	4,52	66	4,51	91	4,46
17	4,56	42	4,49	67	4,49	92	4,44
18	4,54	43	4,52	68	4,49	93	4,45
19	4,54	44	4,51	69	4,48	94	4,44
20	4,55	45	4,51	70	4,49	95	4,45
21	4,56	46	4,5	71	4,48	96	4,44
22	4,55	47	4,51	72	4,49	97	4,43
23	4,54	48	4,52	73	4,48	98	4,43
24	4,54	49	4,54	74	4,46	99	4,42
25	4,55	50	4,53	75	4,45	100	4,43

Tabulka 6 Naměřené hodnoty výšek výlisků pro sadu nástrojů s 5 perimetry

PLA 5							
Výška výlisku							
číslo výlisku	a (mm)	číslo výlisku	a (mm)	číslo výlisku	a (mm)	číslo výlisku	a (mm)
1	4,6	26	4,36	51	-	76	-
2	4,55	27	4,33	52	-	77	-
3	4,51	28	-	53	-	78	-
4	4,54	29	-	54	-	79	-
5	4,5	30	-	55	-	80	-
6	4,46	31	-	56	-	81	-
7	4,48	32	-	57	-	82	-
8	4,45	33	-	58	-	83	-
9	4,45	34	-	59	-	84	-
10	4,43	35	-	60	-	85	-
11	4,44	36	-	61	-	86	-
12	4,41	37	-	62	-	87	-
13	4,48	38	-	63	-	88	-
14	4,44	39	-	64	-	89	-
15	4,41	40	-	65	-	90	-
16	4,48	41	-	66	-	91	-
17	4,46	42	-	67	-	92	-
18	4,44	43	-	68	-	93	-
19	4,39	44	-	69	-	94	-
20	4,35	45	-	70	-	95	-
21	4,41	46	-	71	-	96	-
22	4,4	47	-	72	-	97	-
23	4,39	48	-	73	-	98	-
24	4,38	49	-	74	-	99	-
25	4,39	50	-	75	-	100	-

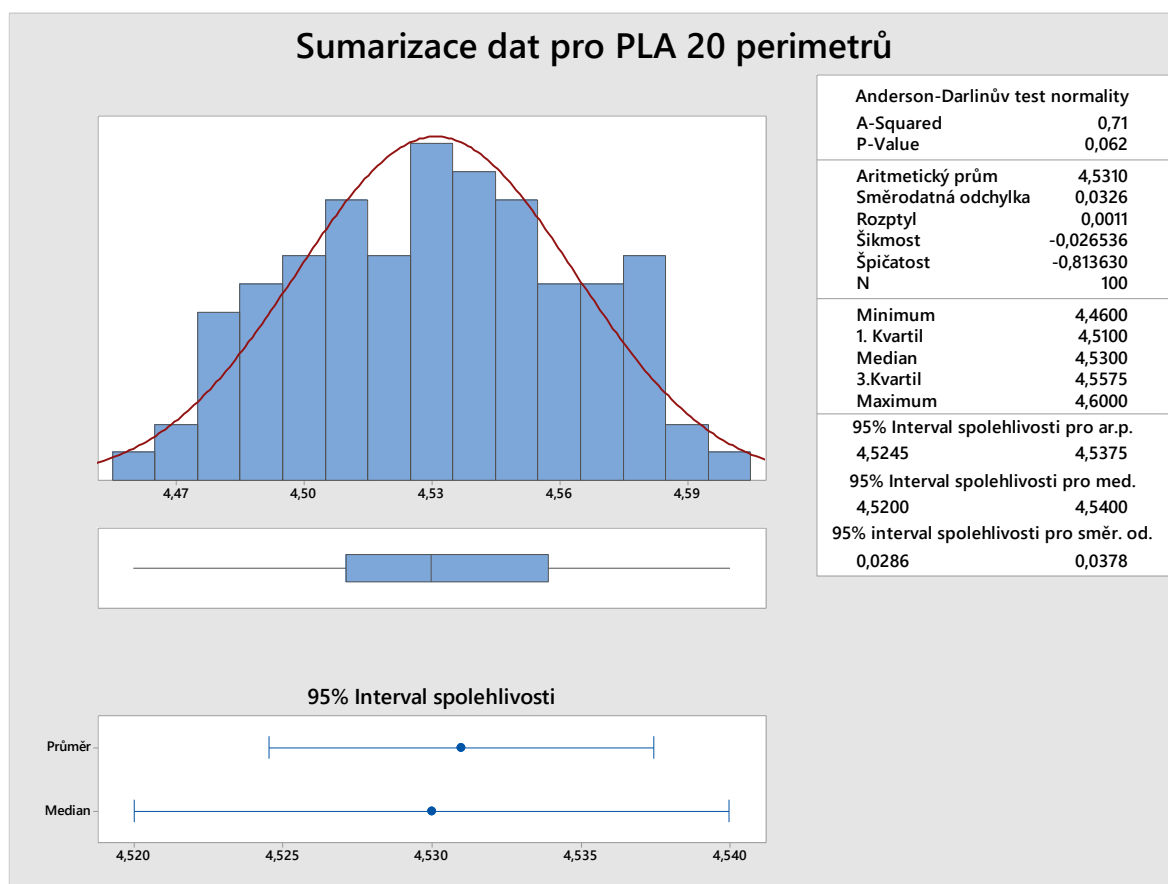
11.1 Exploratorní datová analýza (EDA)

Pro každý soubor dat byla provedena exploratorní analýza. Byla snaha určit, zda data měla normální rozdělení. Další krok bylo identifikovat, zda se v souboru nacházely odlehle hodnoty nebo hrubé chyby.

Vyhodnocení proběhlo v programu MiniTab.

11.1.1 Test normality

Na základě Anderson-Darlingova testu normality a hodnoty $p > 0,05$, bylo možné konstatovat, že všechny měřené skupiny dat pocházely ze souboru dat s normálním rozdělením. Hypotéza o tom, zda data pocházela ze souboru s normálním rozdělením, nebyla zamítnuta. Hladina pravděpodobnosti byla $\alpha = 0,05$.



Obrázek 33 Sumarizace výšek výrobku pro PLA 20 perimetrů (z Tabulka 4)

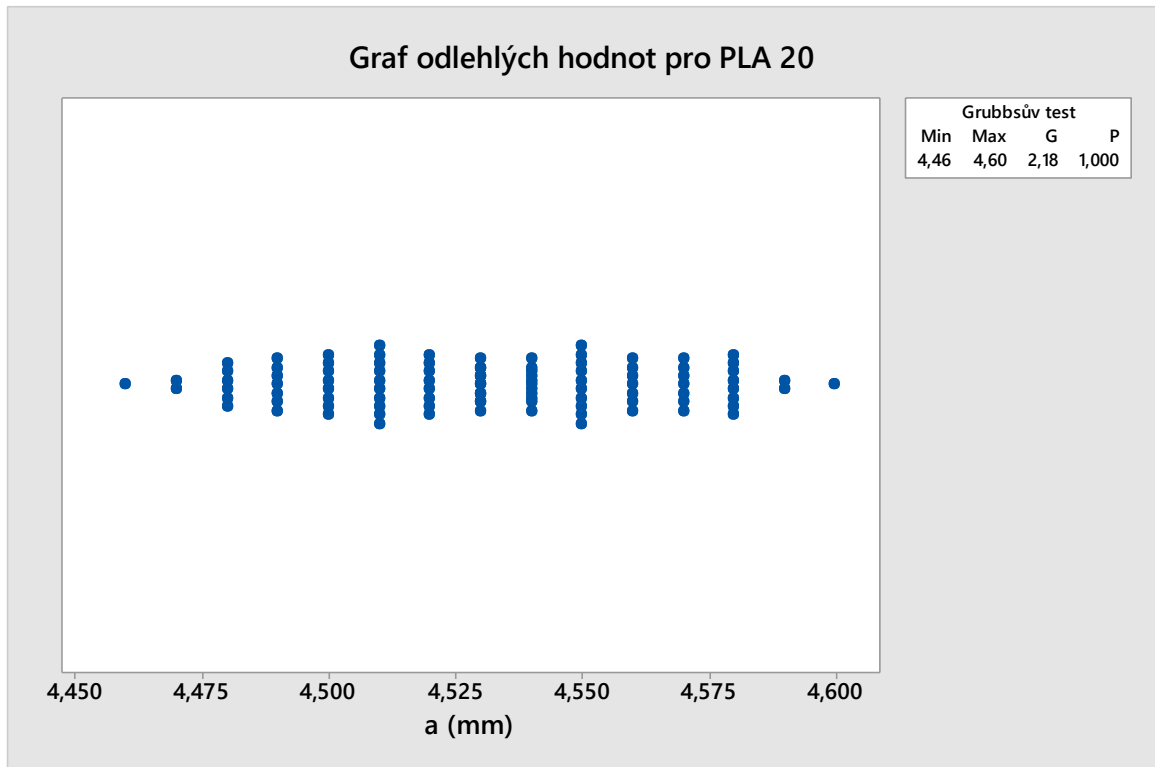
Tabulka 7 P-hodnoty Anderson-Darlingova testu (všechny větší než 0,05)

	PLA 20	PLA 10	PLA 5
	n=100		n=27
P-hodnota	0,062	0,058	0,728

Za předpokladu normálního rozdělení byl proveden Grubbsův test odlehlých hodnot, jenž pomohl určit, zda se v souboru nachází odlehlé hodnoty. Kritické hodnoty Grubbsova testu byly uvedeny v tabulkách. Hypotézy byly sestaveny následovně:

H_0 : Max a min hodnota jsou extrémny

H_1 : Max a min jsou odlehlé hodnoty



Obrázek 34 Grubbsův test odlehých hodnot výšek výrobku pro PLA 20 perimetrů

Tabulka 8 „p“ hodnoty Grubbsova testu pro všechna měření

	PLA 20	PLA 10	PLA 5
	n=100		n=27
P-hodnota	1,000	1,000	0,215

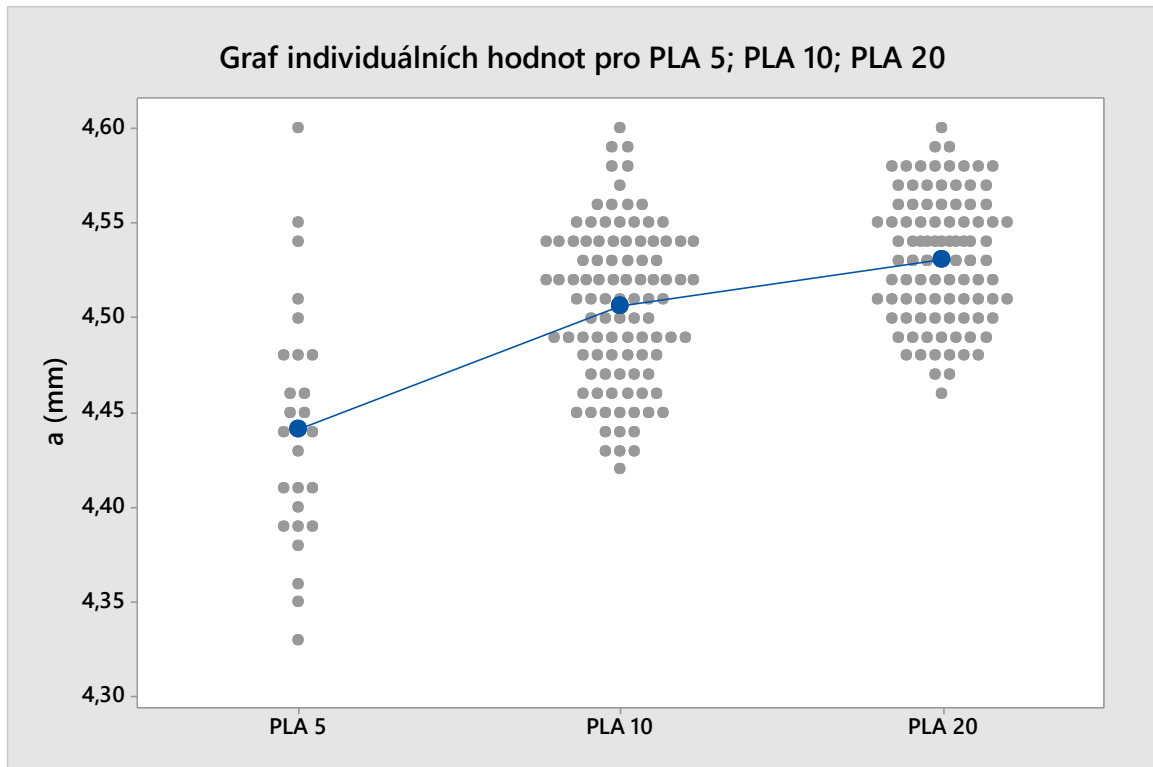
Nulovou hypotézu H_0 nezamítám, jelikož výsledky Grubbsova testu odlehých hodnot „p“, byly vyšší než 0,05. Tvrdím tedy, že odlehlé hodnoty v souboru nebyly nalezeny. Test byl proveden na hladině pravděpodobnosti $\alpha=0,05$.

11.2 Srovnávání souborů dat

Využity byly standardní parametrické metody srovnávání souborů s normálním rozdělením.

11.2.1 T-test (Studentův t-test)

Byl použit oboustranný t-test pro porovnání středních hodnot dvou datových souborů (PLA 20 a PLA 10, PLA 10 a PLA 5, PLA 20 a PLA 5).



Obrázek 35 Graf shodnosti středních hodnot sady PLA 5, PLA 10 a PLA 20

PLA 20 a PLA 10

Výsledky oboustranného testu z programu MiniTab:

Difference = μ (pla 10) - μ (pla 20)

Estimate for difference: -0,02460

95% CI for difference: (-0,03497; -0,01423)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -4,68 P-Value = 0,000 DF = 187

Na základě oboustranného t-testu mezi soubory PLA 20 a PLA 10, kde „p“ hodnota vyšla nižší než 0,05 ($0,00 < 0,05$), zamítám nulovou hypotézu (H_0) o rovnosti středních hodnot pro soubor PLA 20 a PLA 10 ve prospěch alternativní hypotézy (H_A), že se střední hodnoty liší staticky významně s pravděpodobností $\alpha=0,05$.

PLA 10 a PLA 5

Výsledky oboustranného testu z programu MiniTab:

Difference = μ (pla 10) - μ (pla 5)

Estimate for difference: 0,0645

95% CI for difference: (0,0384; 0,0907)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = 5,02 P-Value = 0,000 DF = 32

Na základě oboustranného t-testu mezi soubory PLA 10 a PLA 5, kde „p“ hodnota vyšla nižší než 0,05 ($0,00 < 0,05$), zamítám nulovou hypotézu (H_0) o rovnosti středních hodnot pro soubor PLA 10 a PLA 5 ve prospěch alternativní hypotézy (H_A), že se střední hodnoty liší staticky významně s pravděpodobností $\alpha=0,05$.

PLA 20 a PLA 5

Výsledky oboustranného testu z programu MiniTab:

Difference = μ (pla 20_1) - μ (pla 5_1)

Estimate for difference: 0,0891

95% CI for difference: (0,0634; 0,1149)

T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = 7,08 P-Value = 0,000 DF = 29

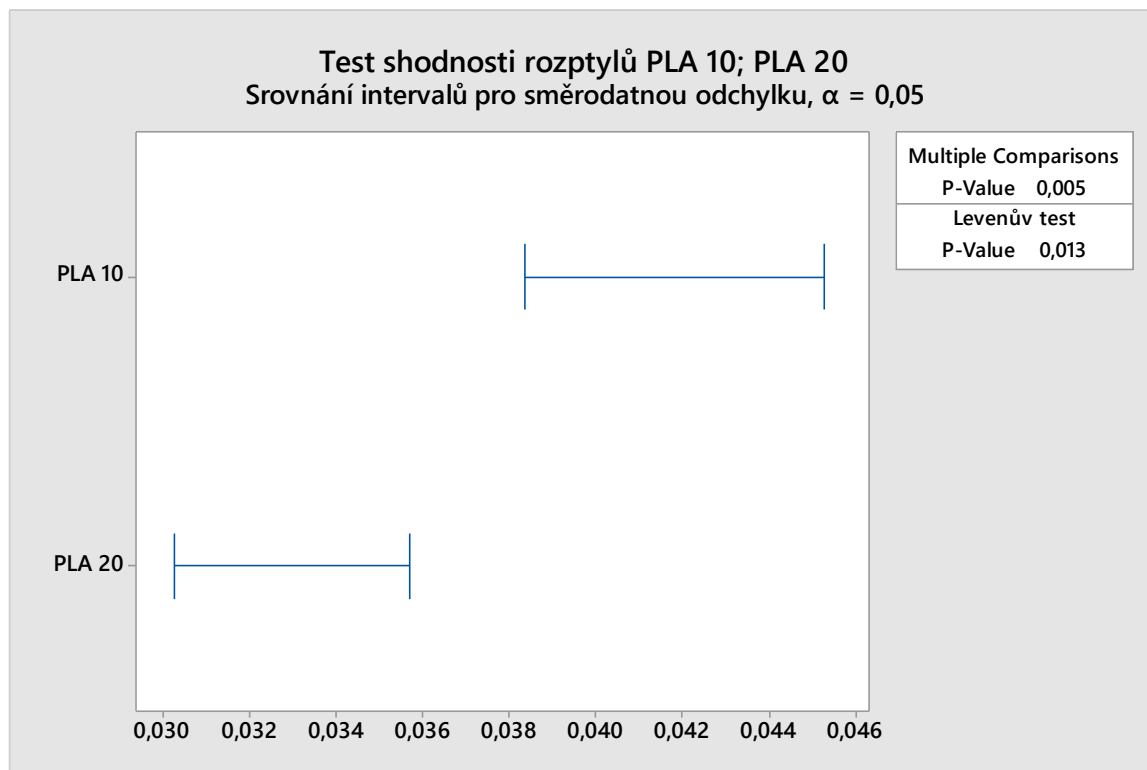
Na základě oboustranného t-testu mezi soubory PLA 20 a PLA 5, kde „p“ hodnota vyšla nižší než 0,05 ($0,00 < 0,05$), zamítám nulovou hypotézu (H_0) o rovnosti středních hodnot pro soubor PLA 20 a PLA 5 ve prospěch alternativní hypotézy (H_A), že se střední hodnoty liší staticky významně s pravděpodobností $\alpha=0,05$.

Závěr

Na základě testu shodnosti průměru bylo konstatováno, že střední hodnoty souborů PLA 20, PLA 10 a PLA 5 jsou od sebe statisticky významně odlišné na hladině pravděpodobnosti $\alpha=0,05$.

11.2.2 F-test

Levenův test byl použit pro analýzu rozptylu souborů.



Obrázek 36 Levenův test pro soubory PLA 10 a PLA 20

PLA 20 a PLA 10

Na základě Levenova testu mezi soubory PLA 20 a PLA 10, kde „p“ hodnota vyšla nižší než 0,05 ($0,013 < 0,05$), zamítám nulovou hypotézu (H_0) o rovnosti rozptylů pro soubor PLA 20 a PLA 10 ve prospěch alternativní hypotézy (H_A), že se rozptyly liší statisticky významně s pravděpodobností $\alpha=0,05$.

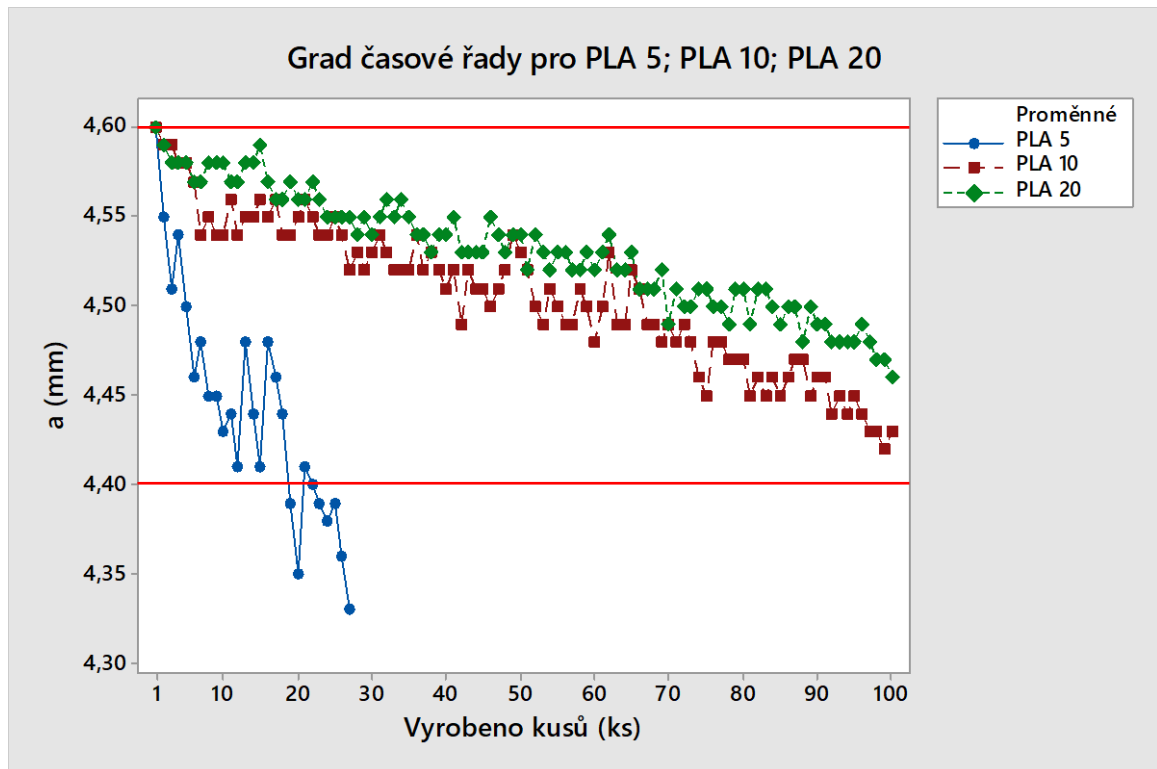
Tabulka 9 Výsledky Levenova testu pro každou dvojici souborů

$\alpha=0,05$	PLA 20 a PLA 10	PLA 10 a PLA 5	PLA 20 a PLA 5
P-hodnota	0,013	0,017	0

Závěr

Podle Levenova testu je každý z rozptylů vůči ostatním statisticky významně odlišný s pravděpodobností $\alpha=0,05$.

11.3 Výšky výlisků v závislosti na čase

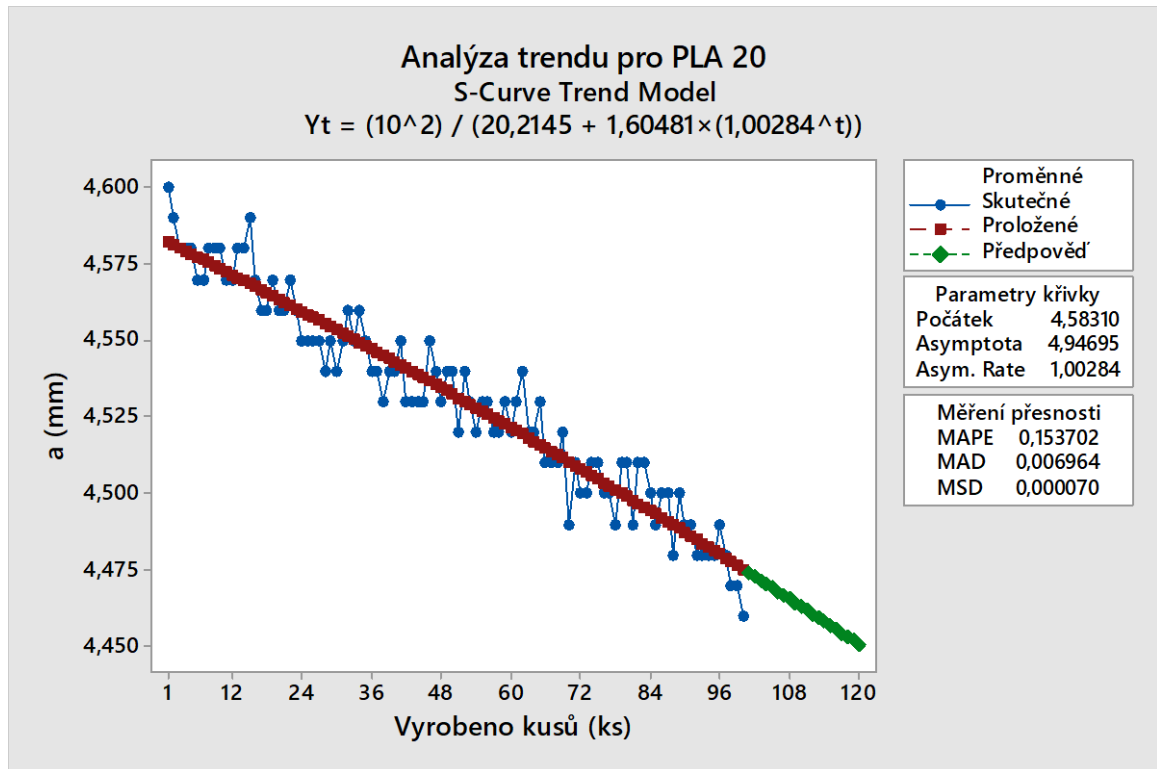


Obrázek 37 Graf závislosti výšky výrobků na počtu vyrobených kusů (horní a dolní mez vyznačena červenou čarou)

Z grafu byl patrný vliv počtu perimetrů na výšku výrobku. PLA 20 a PLA 10 se chovaly podobně, ale na základě t-testu a f-testu bylo konstatováno, že se aritmetické průměry i rozptyly těchto souborů liší statisticky významně. Statisticky významné rozdíly pro aritmetický průměr a rozptyl platily i pro porovnávání PLA 20 a PLA 10 vůči PLA 5. Zde byly rozdíly ale patrné již při prvním pohledu.

12 PREDIKCE

Na základě proložení křivky grafem proběhla predikce výšek výrobku pro 20 výrobků. Grafy byly proloženy křivkou s rovnicí $Y_t = (10^a) / (b_0 + b_1 * b_2^t)$ z důvodu její nejvyšší přesnosti vůči původním hodnotám. Pro PLA 5 predikce nebyla provedena s důvodu nesplnění tolerance při zkoušce.



Obrázek 38 Analýza trendu pro PLA 20 proložená křivkou s predikcí

V grafu bylo vidět predikci pro 20 výlisek vyrobených sadou s 20 perimetry. Střední absolutní procentní chyby odhadu (MAPE) vyšla 0,153702 %. Výška pro výlisek číslo 120 byla predikována na 4,45066. Počátek měla na souřadnici X 1 a Y 4,58310.

Výpočet predikované hodnoty a pro 120. kus:

$$Y_t = (10^2) / (20,2145 + 1,60481 * 1,00284^{120}) = 4,4580$$

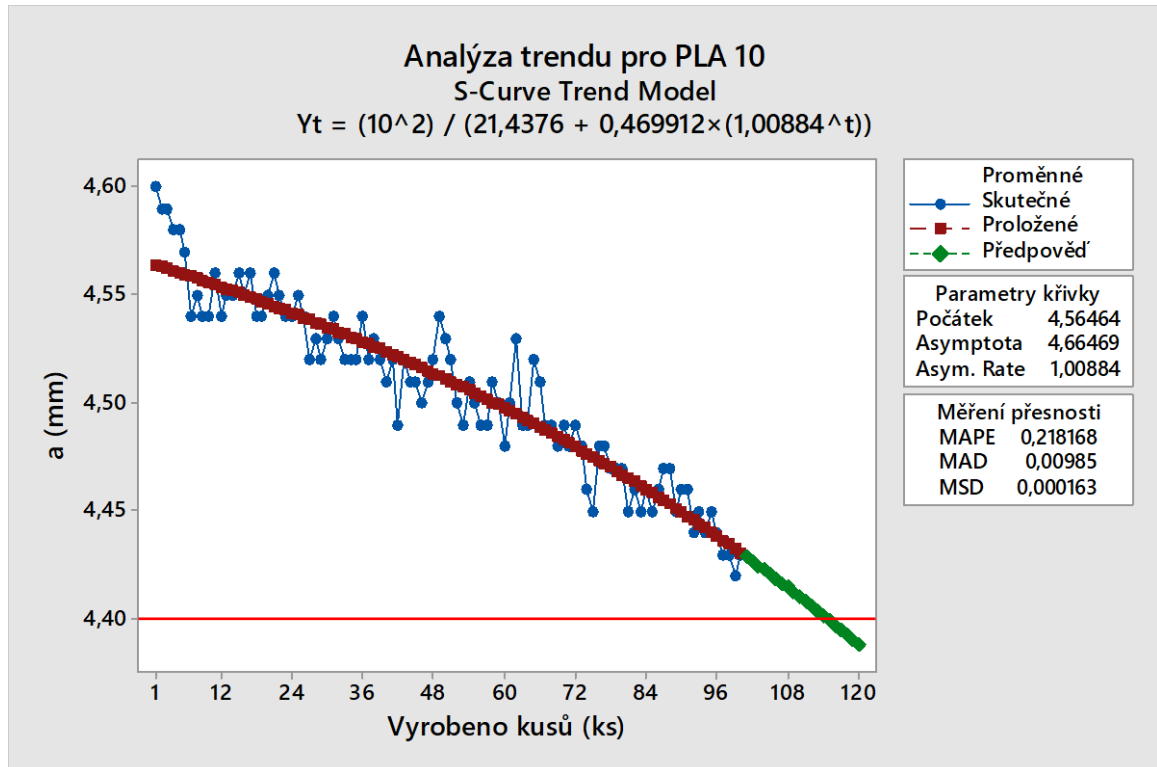
Výpočet střední absolutní procentní chyby odhadu:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left(\frac{A_t - F_t}{A_t} \right) * 100 \text{ [%]}$$

n: počet proložených bodů

A_t : skutečné hodnoty

F_t : proložení hodnoty



Obrázek 39 Analýza trendu pro PLA 10 proložená křivkou s predikcí (červeně vyznačen kritický rozměr)

V grafu bylo vidět predikci pro 20 vylisků vyrobených sadou s 10 perimetry. Střední absolutní procentní chyby odhadu (MAPE) vyšla 0,218168 %. Výška pro vylisek číslo 120 byla predikována na 4,38826. Poslední vylisek splňující toleranci dle predikce byl 114 s výškou 4,40167. Počátek měla na souřadnici X 1 a Y 4,66469.

Výpočet predikované hodnoty a pro 120. kus:

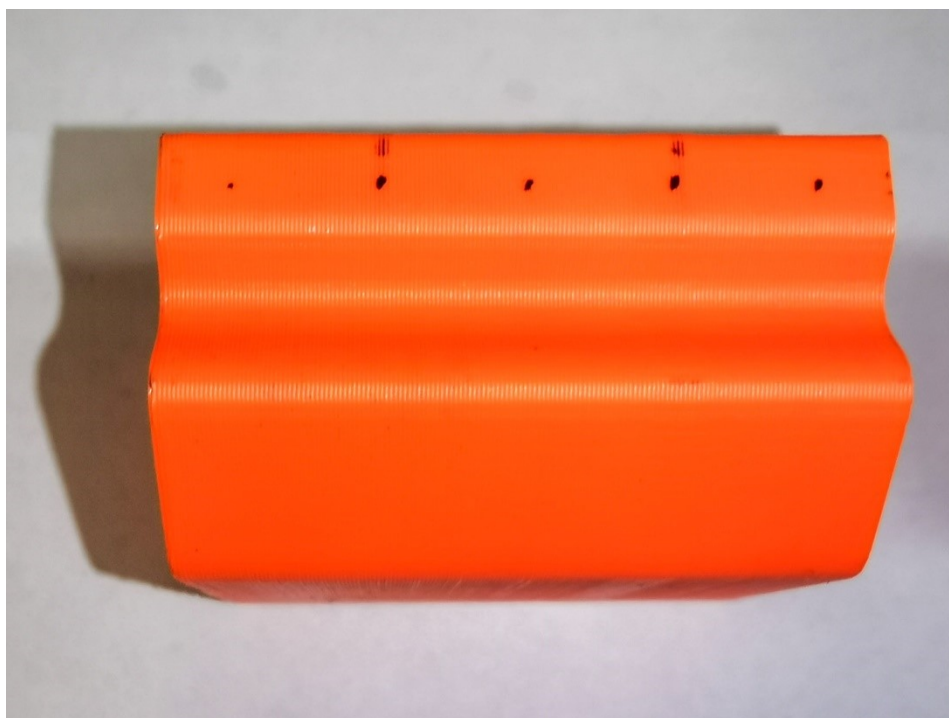
$$Y_t = (10^2) / (21,4376 + 0,469912 * 1,00884^{120}) = 4,38826$$

13 DISKUZE VÝSLEDKŮ

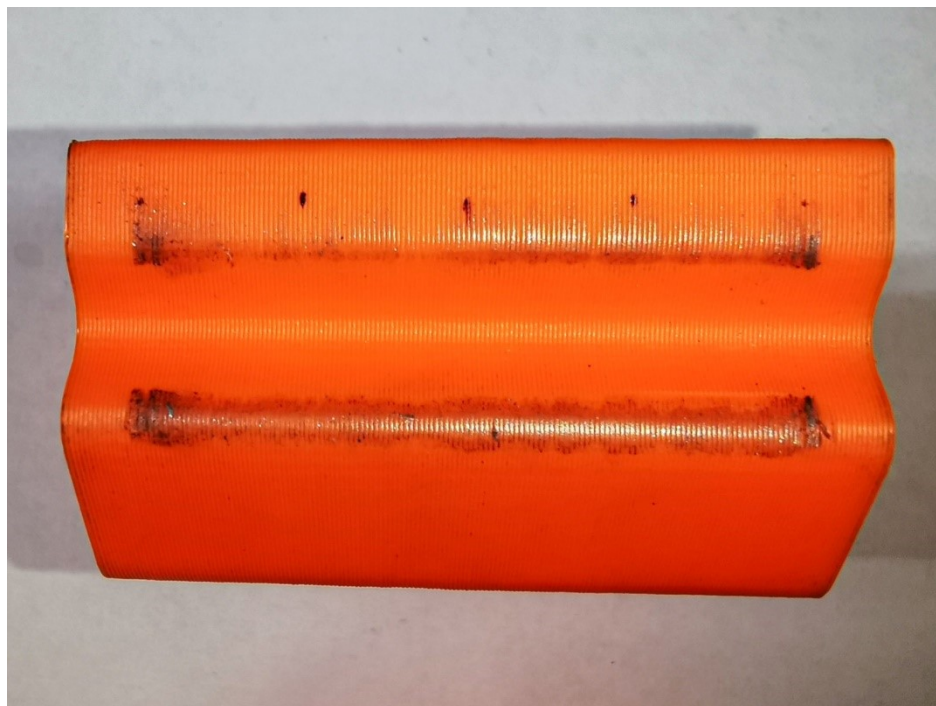
Sada nástrojů s dvaceti perimetry byla vyrobena z 170,72 g filamentu, stála 108,54 Kč a čas tisku byl 338 minut. Deseti perimetrová sada byla vyrobena z 149,68 g filamentu, stála 98,64 Kč a čas tisku byl 296 minut. Pěti perimetrová sada byla vyrobena z 137,92 g filamentu, stála 90,90 Kč a čas tisku byl 256 minut. Dvaceti a deseti perimetrové sady splnily podmínky experimentu, pěti perimetrová sada nesplnila podmínky experimentu.

Tabulka 10 Závěrečné parametry sad nástrojů

	Sada s 20 perimetry	Sada s 10 perimetry	Sada s 5 perimetry
Použito filamentu (m)	55,22	50,18	46,24
Použito filamentu (mm ³)	132830,7	120707,76	111230,54
Použito filamentu (g)	170,72	149,68	137,92
Náklady (Kč)	108,54	98,64	90,90
Čas tisku (min)	338	296	256
Výrobno výrobků	100	100	27
Průměrná výška výrobku (mm)	4,531	4,5064	4,4419
Směrodatná odchylka (mm)	±0,0326	±0,0413	±0,0632



Obrázek 40 Nástroj s 20 perimetry před začátkem experimentu



Obrázek 41 Nástroj s 20 perimetry po skončení experimentu

ZÁVĚR

Bakalářská práce měla za úkol zjistit životnost sad nástrojů zhotovených aditivní metodou. Jako výdrž sady byla určena dovednost vyrobit výrobek s požadovanou tolerancí [Obrázek 31]. Každá sada měla odlišný jeden procesní parametr. Tím byl počet perimetrů (obvodových stěn). Materiálem byl termoplast PLA (kyselina polymléčná), s výplní 70 % tvaru trojúhelníků. Byla použita tryska o průměru 0,6 mm, výška vrstev byla 0,3 mm. Všechny sady byly tištěny na stejné tiskárně Original Prusa i3 MK3S+ s materiálem PLA od firmy Plasty Mladeč, jenž byl všechn z totožné šarže. Jako výrobek byl zvolen výlisek s násobným ohybem s úhlem 45° na ohyb. Materiálem experimentálního výlisku byla nerezová ocel 1.4301 tloušťky 1,5 mm. Všechny výlisky taktéž pocházejí ze stejné šarže. Jako kritický rozměr byla zvolena výška výrobku měřená úchylkoměrem s kulovým dotekem. Nastavená výška experimentálního výlisku byla 4,6 mm s dolním tolerančním polem -0,2 mm a horním tolerančním polem 0 mm. Cílem bylo vyrobit sto výlisků. Pokud bylo pětkrát po sobě porušeno toleranční pole, byl experiment přerušen a sada nástrojů byla prohlášena za nevyhovující.

Sady nástrojů s dvaceti a deseti perimetry vydržely všech sto ohybů. Sada s pěti perimetry poprvé porušila toleranci při 19. výrobku, porušení tolerance pětkrát po sobě nastalo u výlisku číslo 27.

Následovalo statistické vyhodnocení všech výsledků měření. Nejdříve bylo provedeno ověření normálního rozdělení dat. Všechny soubory dat měly normální rozdělení. Byl proveden Grubbsův test sloužící ke zjištění přítomnosti odlehlých hodnot. Nebyly nalezeny žádné odlehlé hodnoty. Následovaly srovnání souborů dat. První byly provedeny t-testy, které stanovily, že střední hodnoty všech souborů byly statisticky významně rozdílné na hladině pravděpodobnosti $\alpha=0,05$. F-testy nám ukázaly, že rozptyly všech souborů byly statisticky významně rozdílné na hladině pravděpodobnosti $\alpha=0,05$.

Z grafů závislosti výšky výrobků (a) na počtu vyrobených kusů bylo patrné chování jednotlivých nástrojů a jejich postupná degradace. Na základě predikce bylo usouzeno, že by sada nástrojů o dvaceti perimetrech vydržela teoreticky dalších dvacet výrobků v toleranci. Sada o deseti perimetrech by teoreticky dokázala vyrábět v toleranci do výrobku číslo 114. Pro sadu o pěti perimetrech predikce nebyla provedena z důvodu jejího selhání při výrobě 27. výlisku.

Pro budoucí výrobu tohoto typu bylo doporučeno použití nástrojů buď s deseti, nebo dvaceti perimetry. Záleželo by na požadované toleranci a počtu výrobků. Nástroje s deseti perimetry by spolehlivě vydržely sto kusů, ale při vyšším počtu bychom se blížili k hranici jejich selhání. Zároveň by obsluha ohraňovacího lisu musela častěji kontrolovat rozměry výrobku, kvůli vysokému rozptylu výšek.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC, 2016. *Základy strojírenské technologie I*. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016, 160 s. ISBN 9788001060568.
- [2] LENFELD, Petr. *Technologie tváření kovů. Technologie II* [online]. [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [3] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ, 2013. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [4] TURNER, Drew. *History of 3D Printing: It's Older Than You Think* [online]. 2021 [cit. 07-11-2021]. Dostupné z: <https://redshift.autodesk.com/history-of-3d-printing/>
- [5] *První zmínky o 3D tisku* [online]. 2019 [cit. 07-11-2021]. Dostupné z: <https://3d-tiskni.cz/zkusebni-prispevek-lorem-ipsam-dolor-amet-sit/>
- [6] *Additive Manufacturing Machines & Materials* [online]. 2021 [cit. 07-11-2021]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/>
- [7] *Additive Manufacturing vs. 3D Printing* [online]. [cit. 15-12-2021]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/3d-printing>
- [8] *3D Printing vs CNC Machining: Which is best for prototyping* [online]. 2021 [cit. 03-12-2021]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184/>
- [9] GEBHARDT, Andreas, Julia KESSLER a Laura THURN. *3D printing: understanding additive manufacturing. 2nd edition*. Munich: Hanser Publishers, [2019], xvi, 204 s. ISBN 9781569907023.
- [10] VAROTSIS, Alkaios. *Introduction to SLS 3D printing* [online]. 2021 [cit. 31-10-2021]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/>
- [11] *Selective Laser Sintering, SLS* [online]. 2020 [31-10-2021] Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls>
- [12] VAROTSIS, Alkaios. *Introduction to metal 3D printing* [online]. 2021 [cit. 31-10-2021]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing/>

- [13] VAM DER STREEN, Deiderik. *Industrial SLA/DLP vs. desktop SLA/DLP* [online]. 2021 [cit. 31-10-2021]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/industrial-sladlp-vs-desktop-sladlp/>
- [14] *Stereolithography, SLA* [online]. 2021 [cit. 31-10-2021] Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/stereolithography-sla>
- [15] VAROTSIS, Alkaios, SIMON, Isaac. *Introduction to FDM 3D printing* [online]. 2021 [cit. 31-10-2021]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [16] *Fused Deposition Modeling* [online]. 2021 [cit.31-10-2021] Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>
- [17] BĚHÁNEK, Luboš. *Polymer* [online]. 2016 [cit. 08-11-2021]. ISBN 978-80- 88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [18] BALCAROVÁ, Katerina. *Co je to filament?* [online]. 2018 [cit. 08-11-2021]. Dostupné z: <https://www.miroluk.cz/clanky-jake-je-zakladni-rozdeleni-materialu-filamentu-pro-3d-tiskarny-a-jake-jsou-v-nich-rozdily.html>
- [19] *Ultimate Materials Guide - Tips for 3D Printing with PLA* [online]. 2020 [cit. 08-11-2021]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pla/>
- [20] *3D printing with ABS plastic (Acrylonitrile Butadiene Styrene)* [online]. 2009 [cit. 08-11-2021]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/abs-definition/>
- [21] PUSHKAREV, Denis. *ABS+/PLUS Filament: the basics* [online]. 2021 [cit. 09-11-2021]. Dostupné z: <https://trider.cz/material/abs-plus>
- [22] VALDIVIESO, Carlota. *All you need to know about Polycarbonate (PC) for 3D printing* [online]. 2020 [cit. 09-11-2021]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/polycarbonate-pc-for-3d-printing-110220204/#!>
- [23] *PC-ABS: Polycarbonate Material Properties* [online]. 2021 [cit. 09-11-2021]. Dostupné z: <https://www.fastradius.com/resources/know-your-materials-polycarbonate-acrylonitrile-butadiene-styrene-pc-abs/>
- [24] *Ultimate Materials Guide - Tips for 3D Printing with ASA* [online]. 2020 [cit. 11-11-2021]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/asa/>

- [25] *Materiál pro 3D. Materiálový slovník - ASA* [online]. 2021 [cit. 11-11-2021]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa/>
- [26] *PET-G filamenty pro 3D tisk* [online]. 2021 [cit. 11-11-2021] Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g/>
- [27] *Nylon (PA) materiál pro 3D tisk* [online]. 2021 [cit. 12-11-2021] Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/nylon/sk>.
- [28] *CPE 3D tisková struna* [online]. 2021 [12-11-2021] Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/cpe/>
- [29] *CPE CF112 Carbon* [online]. 2021 [cit. 28-11-2021]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/cpe-cf112-carbon-filament/>
- [30] DURGUN, I. Sheet Metal Forming Using FDM Rapid Prototype Tool. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2015, 21(4), 412 - 422 [cit. 28-01-2022]. ISSN 13552546. Dostupné z: [doi:10.1108/RPJ-01-2014-0003](https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2014-0003)
- [31] KLIMYUK, Daniil, Mikhail SEREZHKIN a Andrey PLOKHIKH. Application of 3D Printing in Sheet Metal Forming. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, 38(Part 4), 1579-1583 [cit. 28-01-2022]. ISSN 22147853. Dostupné z: [doi:10.1016/j.matpr.2020.08.155](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.155)
- [32] LIEWALD, Mathias. DE SOUZA, J. H. C. *New Developments on the use of Polymeric Materials in Sheet Metal Forming. Production Engineering*, [online]. 2008 [cit. 28-11-2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/225231955_New_developments_on_the_use_of_polymeric_materials_in_sheet_metal_forming
- [33] KLADIVO, Petr. *Základy statistiky*; Katedra geografie Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci [online]. 2013 [cit. 28-04-2022]. Dostupné z: <https://geography.upol.cz/soubory/studium/e-ucebnice/978-80-244-3842-9.pdf>
- [34] DORDA, Michal. *Testování hypotéz* [online]. [cit.: 28-4-2022] Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/Aplikace_7.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

atd.	a tak dále
PLA	kyselina polyléčná
ABS	Akrylonitril-Butadien-Styren
ABS+	Akrylonitril-Butadien-Styren (+)
PC	Polykarbonát
ASA	Akrylonitril-Styren-Akryl
PETG	Polyethyltereftelát glykol
PA	Polyamid
CPE	Chlorovaný polyethylen
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
a	Výška výlisku (mm)
prům.	Průměr
ar. prům.	Aritmetický průměr
med.	Median
např.	Například
směr. od.	Směrodatná odchylka
n	Počet hodnot
H_0	Nulová hypotéza
H_a	Alternativní hypotéza
p	Hladina významnosti
$1-\alpha$	Konfidenční úroveň
α	Chyba I. řádu

b_0	Konstanta
b_1	Koeficient
b_2	Koeficient
t	Vyrobené kusy
Asym. Rate	Rychlost s jakou se model blíží asymptotě
n	Počet proložených bodů
A_t	Skutečné hodnoty
F_t	Proložené hodnoty

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma elastické a plastické deformace [2].....	13
Obrázek 2 Postup výroby při užití konvenční technologie [7]	16
Obrázek 3 Postup výroby při užití aditivní technologie [7].....	17
Obrázek 4 Schéma tiskárny SLS: 1) Práškový materiál, 2) Pracovní plocha, 3) Výrobek, 4) Váleček, 5) Laserová jednotka [11]	19
Obrázek 5 Schéma tiskárny SLA: 1) UV Laser, 3) Pohyblivé zrcadlo, 4) Deska, 5) Podpěry, 6) Výrobek, 7) Tekutá pryskyřice, 8) Vana [14]	20
Obrázek 6 Schéma tiskárny FDM: 1) Vyhřívaná podložka, 2) Polymerní struna, 3) Podávací kolečka, 4) Tryska vyhřívaná, 5) Výrobek s podporami [16]	21
Obrázek 7 Schéma nad molekulární struktury polymerů 1) amorfni, 2) semikrystalické [17]	22
Obrázek 8 Rozdělení polymerů dle stálosti deformace	23
Obrázek 9 Struna polymeru namotána na jádru [18]	25
Obrázek 10 Analýza rozměrové shody plechového dílu [30].....	29
Obrázek 11 Histogram a Boxplot s normálním rozdělením a jednou odlehlou hodnotou ..	30
Obrázek 12 Chyby při přijímání a zamítání hypotéz [34]	31
<i>Obrázek 13 Schéma experimentu</i>	34
Obrázek 14 Nástroj s 20 perimetry připravený pro ohýbání (vlevo) a nástroj po ohybu (vpravo).....	35
Obrázek 15 Rozhraní Prusa Slicer 2.3.0	36
Obrázek 16 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ s hladkou podložkou v ochranném boxu	37
Obrázek 17 Ohraňovací lis TruBend 5170	38
Obrázek 18 Digitální úchylkoměr Mahr a ukázka doteků	38
Obrázek 19 3D model experimentálního výlisku	39
Obrázek 20 Nákres dílce s vyznačeným kritickým rozměrem (červeně)	40
Obrázek 21 3D model nástroje	41
Obrázek 22 Nákres nástroje	42
Obrázek 23 Funkční plochy při špatně zvolené tiskové ose	42
Obrázek 24 Funkční plochy při tiskové ose ve směru největšího rozměru	43
Obrázek 25 Ukázka základního nastavení tisku	44
Obrázek 26 Nástroj umístěný ve středu tiskové podložky	44
Obrázek 27 Vnitřní struktura nástroje (70% trojúhelníková výplň (červená), perimetry (žlutá a oranžová), plná boční stěna (fialová), límec (zelená)).....	45
Obrázek 28 5mm límec kolem základny nástroje (zelená).....	46

Obrázek 29 Nástroje s různým počtem perimetrů (perimetry označeny žlutě). Zleva pět, deset a dvacet perimetrů	47
Obrázek 30 Nástroj při tisku (hotový z 60 %)	48
Obrázek 31 Hotový nástroj na podložce	48
Obrázek 32 Výška výrobku označena jako a	51
Obrázek 33 Sumarizace výšek výrobku pro PLA 20 perimetrů (z Tabulka 4)	55
Obrázek 34 Grubbsův test odlehlých hodnot výšek výrobku pro PLA 20 perimetrů	56
Obrázek 35 Graf shodnosti středních hodnot sady PLA 5, PLA 10 a PLA 20	57
Obrázek 36 Levenův test pro soubory PLA 10 a PLA 20	59
Obrázek 37 Graf závislosti výšky výrobků na počtu vyrobených kusů (horní a dolní mez vyznačena červenou čarou)	60
Obrázek 38 Analýza trendu pro PLA 20 proložená křivkou s predikcí	61
Obrázek 39 Analýza trendu pro PLA 10 proložená křivkou s predikcí (červeně vyznačen kritický rozměr)	62
Obrázek 40 Nástroj s 20 perimetry před začátkem experimentu	63
Obrázek 41 Nástroj s 20 perimetry po skončení experimentu	64

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Technické údaje stroje TruBend 5170	37
Tabulka 2 Rozdílné parametry nástrojů	46
Tabulka 3 Nastavení ohraňovacího lisu TruBend 5170	49
Tabulka 4 Naměřené hodnoty výšek výlisků pro sadu nástrojů s 20 perimetry	52
Tabulka 5 Naměřené hodnoty výšek výlisků pro sadu nástrojů s 10 perimetry	53
Tabulka 6 Naměřené hodnoty výšek výlisků pro sadu nástrojů s 5 perimetry	54
Tabulka 7 P-hodnoty Anderson-Darlingova testu (všechny větší než 0,05)	55
Tabulka 8 „p“ hodnoty Grubbsova testu pro všechna měření	56
Tabulka 9 Výsledky Levenova testu pro každou dvojici souborů	59
Tabulka 10 Závěrečné parametry sad nástrojů	63

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Technický list pro materiál PLA

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST PRO MATERIÁL PLA



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:
PLA FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	polylactid acid by NatureWork, biodegradabilic material, non petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
	2,0 kg netto ± 5% / 2,4 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/pla		
Solvents	1,2 Dichloroethane, Toluene, Tetrahydrofuran,		
Printing Properties:			
Temperature HE	200 – 230 °C		
Temperature HB	20-60 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	YES		
Nozzle	All diameters / for glitter using nozzle min 0,5 mm and more		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	55 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	55 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	16 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	3500 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,24 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	6 g/10 min