

Mechanická charakterizace 3D tištěných dílů

Viktor Fous

Bakalářská práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Viktor Fous
Osobní číslo:	T18172
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Mechanická charakterizace 3D tištěných dílů

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Vyroberte zkušební tělesa technologií 3D tisku a vstřikováním.
3. Podrobte zhotovená zkušební tělesa mechanickému testování.
4. Zhodnoťte výsledky měření.

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

Seznam doporučené literatury:

1. GIBSON, I., David ROSEN a B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Second edition. New York: Springer,
2. BRYDEN, Douglas. CAD and rapid prototyping for product design. London: Laurence King Publishing, 2014, 176 s. Portfolio skills. Product design. ISBN 978-1-78067-342-4.
3. Dizon, J.R.C., 2018. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. Additive Manufacturing. doi:10.1016/j.addma.2017.12.002

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Janošík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **5. ledna 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **21. května 2021**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

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 užít 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 bakalářská práce se zabývá analýzou mechanických vlastností materiálu ABS Extrafill a CPE HG100 od výrobce Fillamentum Manufacturing v závislosti na výrobní metodě. Vzorky byly vyrobeny pomocí technologie vstřikování a aditivní technologií FDM. Materiály byly pro oba postupy výroby totožné, pouze v jiné formě – granulát a filament. Tištěné vzorky byly zkoumány v závislosti mechanických vlastností na různé výšky vrstev. Dále byly tištěné vzorky podrobeny annealingu (žihání) a následně zkoumán vliv žihání na mechanické vlastnosti vzorků. Měření mechanických vlastnosti proběhlo pomocí tahové zkoušky v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1 a zkouškou rázové houževnatosti metodou Charpy v souladu s normou ČSN EN ISO 179-1. Naměřená data byla následně statisticky analyzována. Z naměřených a z analyzovaných dat můžeme určit, že výška tištěných vrstev má zásadní vliv na mechanické vlastnosti dílů. Žihání materiálu ABS zlepšuje mechanické vlastnosti dílu, avšak nijak razantně. Žihání materiálu CPE dává větší smysl, než žihání materiálu ABS.

Klíčová slova: Aditivní technologie, FDM, ABS, CPE, technologie vstřikování, tahová zkouška, rázová houževnatost.

ABSTRACT

The aim of this dissertation is to analyse mechanic features of ABS Extrafill and CPE HG100 materials produced by Fillamentum Manufacturing in relation to the manufacturing method. The samples were made using injection molding technology as well as FDM additive technology. Different forms of identical materials were used – granulate and filament. Printed samples were examined based on their mechanic features and varying layers height. Printed samples were also annealed which was followed by an investigation of the impact of anealing on mechanic features of samples. In compliance with ČSN EN ISO 527-1 and ČSN EN ISO 179-1 norms, tensile test as well as impact test using Charpy method was performer to measure the mechanic features. Statistical analysis was coducted to analyse the obtained data. From the analysed data we can say, that layer height is important for mechanic features. We can improve the mechanic features of ABS by annealing, but just slightly. Annealying material CPE makes more sence, then annealying ABS.

Keywords: Additive technology FDM, ABS, CPE, technology of injection molding, tension test, impact test.

Tímto bych rád poděkoval Ing. Václavu Janoščíkovi, Ph.D. za pomoc a čas, který mi věnoval při vedení této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o., za materiál, který nám poskytl.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 ADITIVNÍ VÝROBA	13
1.1 HISTORIE.....	13
1.2 SOUČASNOST.....	14
1.3 POSTUP PŘI PROTOTYPOVÉ VÝROBĚ	15
1.3.1 Předpříprava	15
1.3.2 Výroba.....	15
1.3.3 Dokončovací práce.....	16
1.4 MATERIÁLY	16
1.4.1 Polymery	16
1.4.2 Kov.....	17
1.4.3 Keramika	17
1.4.4 Bio materiály	17
1.5 TECHNOLOGIE 3D TISKU	18
1.5.1 FDM.....	18
1.5.2 SLA	19
1.5.3 SLS.....	20
1.5.4 LOM.....	21
1.5.5 Polyjet	22
1.6 ADITIVNÍ VS. KONVENČNÍ TECHNOLOGIE	23
1.6.1 Mechanické vlastnosti.....	23
1.6.2 Rychlost prototypové výroby vs. sériové.....	23
1.6.3 Kvalita	24
1.6.4 Efektivita a šetrnost.....	25
2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	26
2.1 PRINCIP VSTŘIKOVÁNÍ.....	26
2.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	27
2.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KVALITU A VLASTNOSTI VÝSTŘIKU.....	28
3 VLASTNOSTI POLYMERŮ	29
3.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	30
3.1.1 Molární hmotnost.....	30
3.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	30
3.2.1 Smrštění.....	31
3.2.2 Tahová zkouška.....	31
4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI FDM TIŠTĚNÝCH DÍLŮ	32
4.1 VLIV PROCESNÍCH PARAMETRŮ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI	32

4.1.1	Orientace tisku	32
4.1.2	Výška vrstvy.....	33
4.1.3	Výplň.....	34
4.1.4	Teplota.....	36
4.2	DOKONČOVACÍ PRÁCE.....	37
4.2.1	Povrchové úpravy.....	37
4.2.2	Annealing	39
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	40
5	NÁVRH EXPERIMENTU	41
5.1	ZKUŠEBNÍ MATERIÁLY	41
5.1.1	ABS Extrafill.....	41
5.1.2	CPE HG100.....	41
5.2	VÝPOČET VZORKŮ.....	42
5.3	ROZDĚLENÍ VZORKŮ.....	43
5.4	PŘÍPRAVA TISKU.....	43
6	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	45
6.1	VÝROBA METODOU 3D TISKU	45
6.1.1	ABS	46
6.1.2	CPE	46
6.2	METODA VSTŘIKOVÁNÍ	46
6.2.1	ABS	47
6.2.2	CPE	48
7	STATISTICKÁ ANALÝZA.....	49
7.1	PRŮMĚR	49
7.2	MEDIÁN	49
7.3	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA.....	50
7.4	VARIAČNÍ KOEFICIENT	50
8	ANNEALING.....	51
8.1	ABS	52
8.2	CPE.....	54
9	VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY	57
9.1	ABS.....	57
9.2	CPE.....	60
10	VÝSLEDKY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI	63
10.1	ABS.....	63
10.2	CPE.....	64
11	DISKUSE VÝSLEDKŮ	66

ZÁVĚR	68
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	69
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	72
SEZNAM OBRÁZKŮ	73
SEZNAM TABULEK.....	75
SEZNAM GRAFŮ	76
SEZNAM PŘÍLOH.....	77

ÚVOD

Pro výrobce a vývojáře produktů bylo navrhování prototypů složitým, zdlouhavým a drahým procesem, který při představování nového produktu často brzdil kreativní a vývojovou fázi. Technologie Rapid prototyping (rychlé prototypování) byla vynalezena, aby významně urychlila tento proces, ale vývojáři a uživatelé této technologie si uvědomili, že termín Rapid prototyping je neadekvátní a jednoznačně nepopisuje nynější aplikace této technologie. Vylepšení materiálů, přesnosti a kvality znamenají, že výrobky vyráběné touto technologií jsou téměř podobné finálnímu produktu. Faktem je, že se přímo touto technologií vyrábí mnoho součástí, takže je není možné označovat za prototypy. Termín rapid prototyping přehlíží základní principy těchto technologií v tom, že všechny díly vyrábí aditivní metodou. Nedávno vzniklý Technical Committee pod záštitou ASTM International souhlasil, že by se měla zavést nová terminologie. Ačkoliv se o tomhle stále polemizuje, ASTM standardy, které byly nedávno přijaty, teď užívají termín aditivní výroba. [1]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ADITIVNÍ VÝROBA

Aditivní výroba, nebo-li additive manufacturing (AM) je formalizovaný termín, kterému se taky jinak říká rapid prototyping nebo 3D tisk. Aditivní výroba označuje proces, při němž vzniká výrobek postupným nanášením tenkých vrstev na sebe. [1] Výhoda této technologie spočívá ve zkrácení výrobní doby z týdnů na dny, tím i v mnoha případech snižuje náklady. Vlastní výroba bývá většinou díky vysokým pořizovacím nákladům 3D tiskáren dražší, ale celkové náklady jsou v mnoha případech nižší. [2]

1.1 Historie

Technologie Rapid prototyping se poprvé objevila v 80. letech minulého století. Avšak skutečný počátek 3D tisku byl o pár let později, a to roku 1986, kdy byl vydán první patent pro fotopolymerní materiál, který vystavením UV záření vytvrdl - stereolitografický přístroj (SLA). V této době byl tento přístroj široké veřejnosti nepřístupný, protože to byla zcela nová technologie, která sloužila jen několika vybraným zákazníkům. V dalších letech se na trhu objevila konkurence, která vytvářela nové technologie, jako například LOM (Laminated Object Manufacturing), SGC (Solid Grounding Curing) a další. Začátky 3D tisku byly pomalé, tisklo se z jednoduchých materiálů a jen primitivní objekty. Zlom přišel roku 2004, kdy Adrian Bowyer objevil projekt RepRap - hnutí lidí, kteří volně šíří návody a data k 3D tiskárnám. Samotný název RepRap je zkratkou replicating rapid prototyper, což znamená, že je schopný sebereplikace a rychlého prototypování. RepRap je složený převážně z mnoha plastových dílů, které je možné vytisknout na jiném RepRapu (3D tiskárna tiskne součástky pro jiné 3D tiskárny). Tímto projektem byla zpřístupněna možnost 3D tisku i běžné veřejnosti po celém světě. Do dnes RepRap běží a stále se zdokonaluje. Další zásadní zlom nastal roku 2007, kdy byla na trhu objevena první komerčně dostupná 3D tiskárna pod 10,000 \$. Od této doby nabírá 3D tisk čím dál větší popularitu, stává se cenově dostupnějším a je vyvíjeno stále více nových technologií a materiálů. [3]



Obr. 1: První 3D tiskárna. [4]

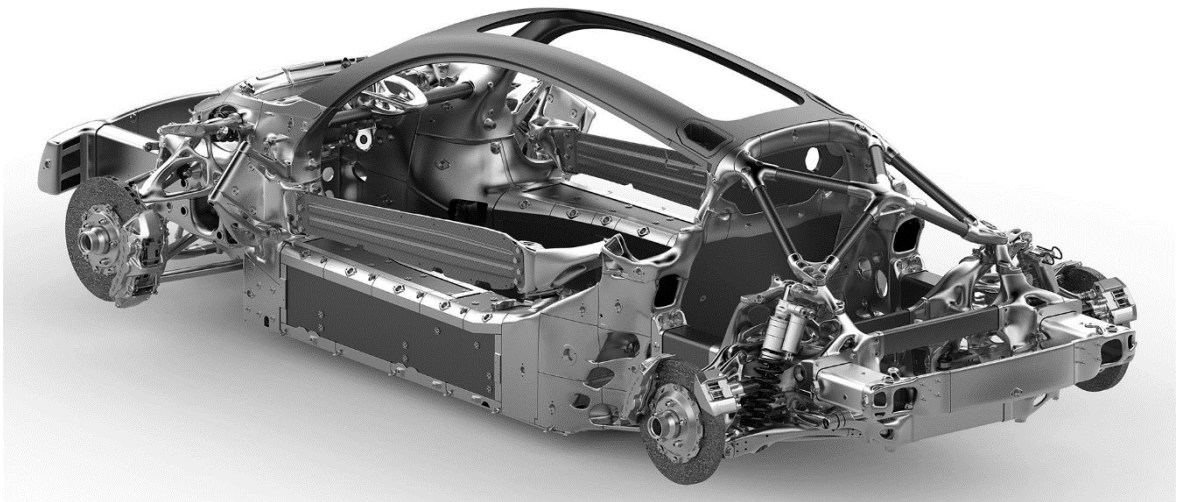
1.2 Současnost

Vývoj technologie 3D tisku prodělal dlouhou cestu za pár let. Nové materiály a technologie daly možnost 3D tisku angažovat se v různých průmyslových odvětvích, jako architektura, medicína, móda, bižuterie, umění, gastronomie, automobilový, letecký a kosmický průmysl.[5]

Uplatnění této technologie je široké ve všech oblastech lidské činnosti, například [5]:

- V gastronomii se touto technologií uvažuje o kompletní přípravě jídla, nutričně vyvážené, komplexní a zdravé stravě.
- Ve stavebním průmyslu může být využita k vytištění stavebních komponentů, doplňků a domů.
- Automobilky vidí potenciál ve výrobě náhradních dílů na zakázku. Odhaduje se, že si v průběhu příštích pěti let až 85% dodavatelů náhradních dílů bude zařazovat aditivní výrobu do svého byznysu jako doplňující výrobní metodu.

I přesto, že dnes může být vytištěn dům, jídlo nebo náhradní součástka, či jiné komponenty, čeká tuto technologii ještě celá řada let vývoje a budeme jen zvědavě čekat, co nového nám přinese. [5]



Obr. 2: Vytištěná kostra automobilu Czinger 21C. [6]

1.3 Postup při prototypové výrobě

Hlavní výhodou této technologie je rychlost výroby ve srovnání s konvenčními technologiemi. Jediným potřebným vstupem je 3D model, který je ve vhodném softwaru převeden na data výrobního procesu pro stroj ve formátu G-CODE (trajektorie, teplota extruze, množství použitého materiálu), který se následně postará o fyzickou realizaci modelu. [7] Rapid prototyping můžeme rozdělit na tři skupiny. [3]

1.3.1 Předpříprava

Zahrnuje vymodelování/naskenování tištěné součásti a výběr vhodného materiálu. K modelování 3D výrobků jsou používány softwary pro parametrické modelování ve 3D – Computer Aided Design (počítačem podporovaný design), jako například Fusion360, CATIA, SolidWorks, TinkerCAD. Hotový digitální model musí být převeden do .STL (Stereolitography) formátu. Následuje rozdělení modelu na jednotlivé vrstvy v rovině X-Y po celé výšce modelu v ose Z, kdy jednotlivá vrstva je definována tloušťkou vrstvy. Z jednotlivých vrstev je dále vytvořen program. Těmto softwarům, které digitální program vytvoří, se říká slicery (PrusaSlicer, Cura). Digitální program je exportován do formátu G-CODE, který nese informace o pracovních trajektoriích, které dokáže 3D tiskárna přečíst. [3]

1.3.2 Výroba

Pokud je digitální program uložen ve formátu G-CODE, může se přejít k výrobě součástky. Průběh výroby by měl být kontrolován, zda proces probíhá v pořádku. [3]

1.3.3 Dokončovací práce

Je-li díl úspěšně zhotoven, přichází jeho vyjmutí z tiskárny a dokončovací práce. Dokončovací práce jsou závislé na výrobní technologii a použitém materiálu. Pro správný výběr dokončovací práce musíme vědět, pokud nám jde pouze o estetiku dílu (povrchová úprava), nebo jestli chceme zlepšit jeho mechanické vlastnosti. U povrchových úprav se nejčastěji jedná o odstranění podpěr, broušení nebo lakování. [3]



Obr. 3: Postup při prototypování. [8]

1.4 Materiály

V současné době existuje široká škála různých typů materiálů, které jsou dodávány v různých stavech (tekutina, prášek, vlákno, pelety, granule, pryskyřice). [3] Existuje celá řada typů technologií 3D tisku, které zpracovávají různé materiály různými způsoby a stále se vyvíjejí nové - specifické materiály do specifických odvětví, jako třeba zubařství a jiné. V dnešní době jsou již, v průmyslových podmínkách, běžně zpracovávány materiály, jako kov, keramika, funkční plasty, písek, a jiné. Vyvíjí se také výzkum 3D tisku bio materiálů a různých druhů potravin. [9]

1.4.1 Polymery

Mezi běžně používané materiály pro tisk v podobě prášku patří nylon nebo polyamid, které jsou pevné, ohebné a odolné. [3] Tyto práškové materiály se dají zkombinovat například s práškovým hliníkem – alumid – odolný, silný, tvarově přesný a vhodný pro dlouhodobé zatěžování. [10]

Mezi nejznámější a nejpoužívanější polymerní materiály, ve formě struny, patří ABS a PLA. PLA získalo svoji oblibu díky jednoduchému tisku a bio-rozložitelnosti, nicméně není tak odolné jako ABS. Dnes se můžeme setkat i s tiskem kluzných materiálů z polytetrafluorethylenu (PTFE). Mezi speciální materiály se řadí i dřevěné kompozity – dřevěný materiál na polymerní matrici. [3]

1.4.2 Kov

Mezi nejběžnější tištěné kovy patří nástrojové oceli, měď, hliník a kobaltové deriváty. V posledních letech se do skupiny 3D tištěných kovů přidalo i stříbro a zlato, pevné materiály zpracované formou prášku. Setkat se s nimi můžeme třeba v bižuterii. Mezi nejpevnější kovové materiály, které se dají tisknout, patří i titan, který se v průmyslu už nějakou dobu používá tam, kde je důležitá nízká hmotnost a velká pevnost dílu (automobilový a letecký průmysl, ale i lékařství). [3]

1.4.3 Keramika

Keramika je relativně novou skupinou materiálů, které se dají tisknout. S keramickými tištěnými materiály by se mělo zacházet jako s klasickou keramikou. Po dotisknutí by měla následovat tepelná úprava a glazurování. [3]

1.4.4 Bio materiály

Skupina těchto materiálů prochází obrovským vývojem v oboru medicíny. Je studována živá tkáň a aplikace, které by mohly transplantované orgány vytisknout. Další výzkum probíhá v oblasti zaměřující se na jídlo, v němž je maso uvedeno jako hlavní příklad. [3]



Obr. 4: Vytištěný model srdce. [11]

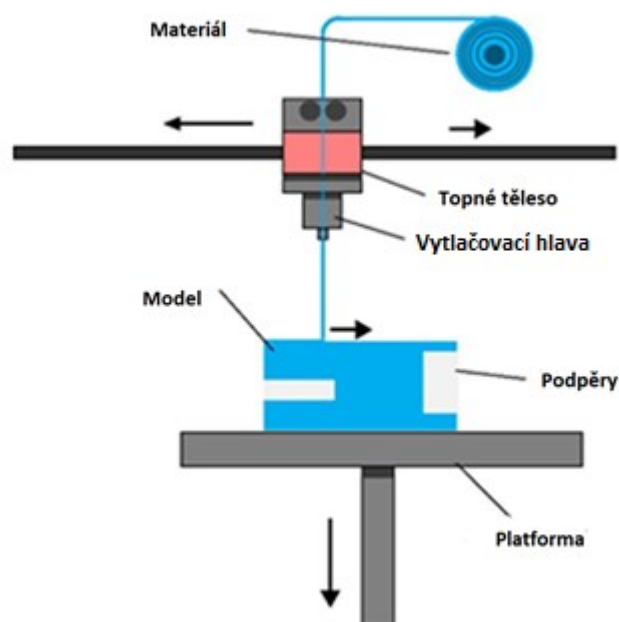
1.5 Technologie 3D tisku

V dnešní době zažívá 3D tisk rozmach, který je převážně zapříčiněn vypršením některých patentů a mnohé technologie jsou již volně šiřitelné (open source). Toto dalo možnost lidem založit si firmy, které jsou zaměřeny na výrobu 3D tiskáren. Současně je na trhu mezi těmito firmami velká konkurence a cena tiskáren pomalu klesá. V budoucnu je docela možné, že si bude moci každá rodina doma vyrobit potřebný díl pomocí 3D tiskárny. [12] I přesto, že technologií 3D tisku je mnoho, v této práci se zaměřím pouze na technologie, které využívají polymerní materiál. Mezi nejznámější patří:

1.5.1 FDM

Technologii Fused Deposition Modeling (depozice termoplastické taveniny) vynalezl S. Scott Crump na konci 80. let minulého století a komerčně se začalo s výrobou roku 1990. [13] Dnes tato technologie představuje nejvyšší potenciál výroby se schopnostmi, které mohou konkurovat konvenčním polymerním zpracovatelským technologiím. [14]

Tato technologie spočívá v nanášení vrstev roztaveného termoplastického materiálu na sebe. Materiál je extrudován z trysky, kde je zahříván na teplotu tavení. Nejznámějšími a nejpoužívanějšími polymerními materiály této technologie je ABS a PLA. Převísle části tisknutého modelu by měly mít podpěry, abychom u těchto částí dosáhli kvality, kterou požadujeme. [13]

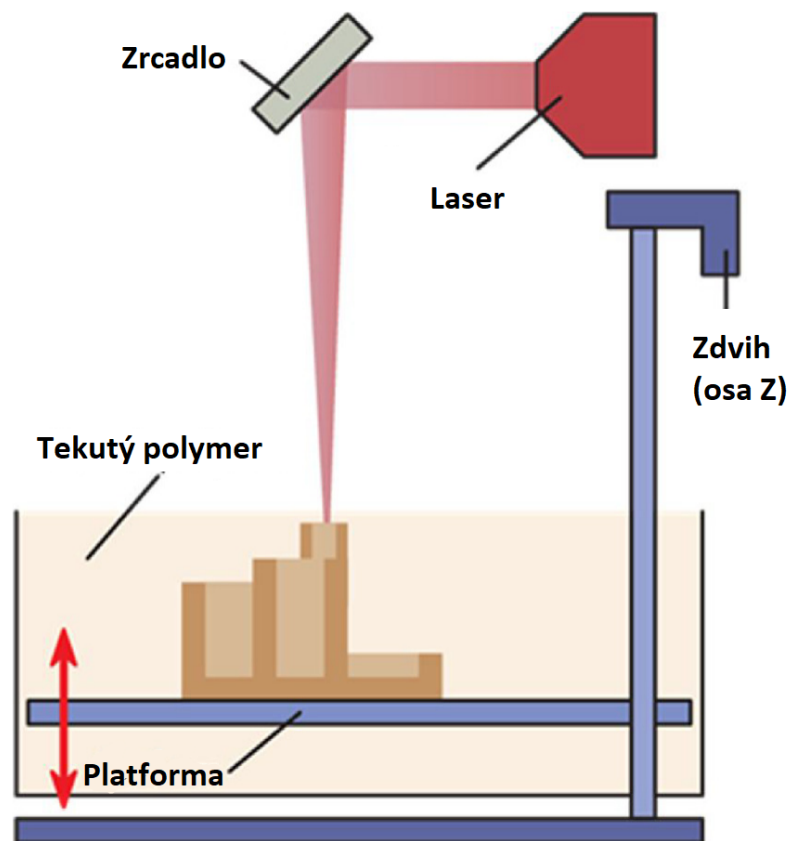


Obr. 5: Proces FDM. [15]

I když se může zdát princip FDM tisku prostý, je zde mnoho parametrů, které mají vliv na výsledný výrobek, jako například podávací rychlost filamentu, šířka extruze a tloušťka vrstev. Abychom získali požadovanou kvalitu výrobku, musí být tyto parametry nastaveny s ohledem na materiál a druh FDM tiskárny. [14]

1.5.2 SLA

Stereolitografie je vůbec první technologií aditivní výroby, která byla vynalezena. Principem této technologie je vytvrzování tekuté plastické pryskyřice, nejčastěji epoxidové nebo akrylové, pomocí ultrafialového záření o specifické vlnové délce. Tomuto vytvrzovacímu procesu se říká fotopolymerizace. [15] [16]

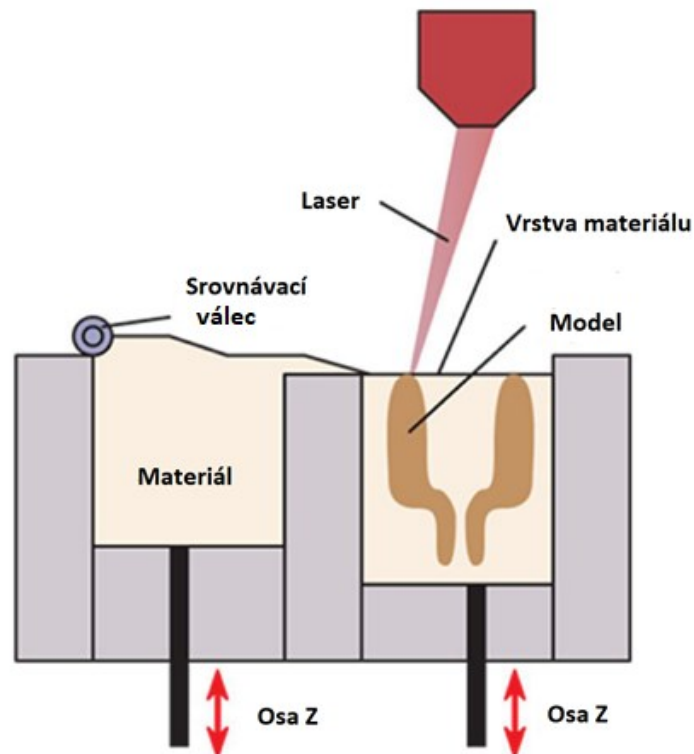


Obr. 6: Proces SLA. [15]

Před začátkem procesu je platforma ponořena o 0,05-0,15mm do vany s pryskyřicí. Hloubka, o kterou je platforma ponořena, definuje výšku vrstvy. Jakmile je první 2D vrstva laserem vytvrzena, je platforma s čerstvě polymerizovaným materiálem znovu ponořena o stejnou hodnotu, laser vytvrdí další vrstvu, která je spojena s první vrstvou a proces se opakuje. Výsledkem je výrobek, který je mimořádně hladký. [15]

1.5.3 SLS

Selective Laser Sintering (selektivní laserové slinování) je typ Powder Bed Fusion (prášková fúze), kdy za pomoci vysoko-výkonnostního směřovaného zdroje tepla (nejčastěji laseru), se buď částečně (slinování) nebo zcela (tání) zpevňuje vrstva prášku. Materiál ve formě prášku může být polymer, pryskyřice nebo kov. Technologie byla vynalezena na Texaské univerzitě v Austinu, USA. [1]



Obr. 7: Proces SLS. [15]

Platforma je snížena o výšku vrstvy v ose Z a váleček na ni nanese vrstvu prášku. Prášek je díky výkonným laserům roztaven a pomocí molekulární difúze se speče a následuje zpracování další vrstvy prášku. Celý proces může probíhat v uzavřeném prostředí s dusíkem, aby se minimalizovala oxidace a degradace materiálu. Tloušťka vrstvy je závislá na rozměrech prášku, typicky 0,075-0,1mm. Hotové díly se nechají pomalu vychladnout v tiskárně. V případě že jsou výrobky vyndány hned po dokončení tisku, vystaveny venkovní teplotě a atmosféře, může dojít k degradaci prášku a znehodnocení modelu. [1] Prášek, který se nevytverdil, poslouží jako podpěra a na konci procesu je odstraněn. Tento prášek může být opakovaně použit. Zásadní vliv na kvalitu výrobku mají jak vlastnosti a typ prášku (velikost částic), tak i rychlost a druh laseru. Přesto, že by se pro SLS teoreticky mohl použít jakýkoliv termoplast ve formě prášku, jsme limitováni kvůli komplexnímu chování a molekulové

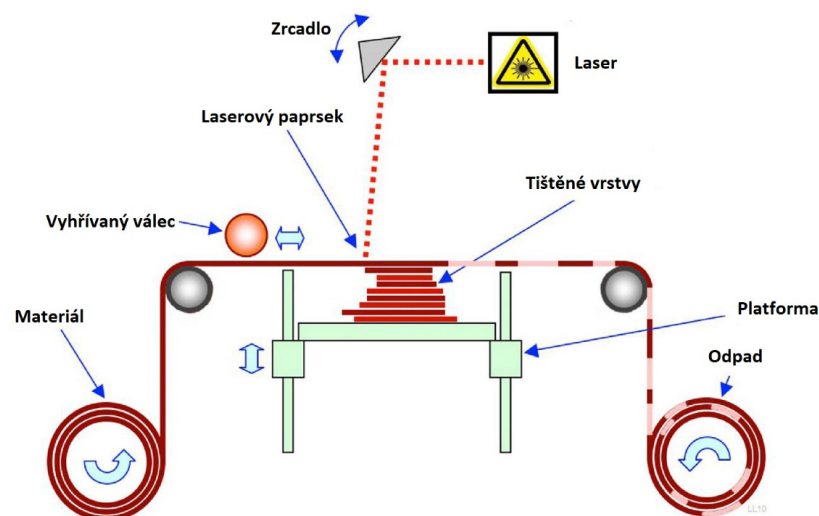
difúzi materiálu v průběhu procesu. Mezi nepoužívanější materiály pro technologii SLS patří PCL (polycaprolactone) a PA (polyamide). [16]

1.5.4 LOM

Laminated Object Manufacturing (výroba laminovaných objektů) byla uvedena roku 1991 a i dnes je široce využívána. [1] Průběh tisku je složitější než předešlé technologie. Skládá se z materiálu ve formě fólie nebo papíru, který je odvíjen z cívky, následně je zahřát a požadovaný tvar je vyříznut laserem. Materiál je vrstven na sebe a vytváří 3D model. [15] Ve své podstatě může být použit jakýkoli materiál ve formě fólie, který se dá lepit. Mezi materiály, které se dají touto technologií tvářet patří jak polymery, tak papír a kovy. [1]

Nejpopulárnější technika laminování vrstev spočívá v papíru, který se pojí díky polymernímu lepidlu. Tloušťka vrstvy papíru může být 0,07 až 0,2mm. Jelikož je papír ve více vrstvách vcelku pevný a těžký, výrobky bývají pevné. Na dokončovací práce se používají techniky jako u klasického dřeva (broušení, barvení, lakování). [1]

Proces výroby se může lišit. Buď je materiál jako první nařezán na potřebné vrstvy a poté přilepen tzv. Form-then-bond (“tvarovat poté lepit”), nebo naopak Bond-then-form (“lepit poté tvarovat”). [1] Nevýhodou této technologie je velký odpad. Design modelu s převisy není problém, protože materiál se podpírá sám. Nicméně, u komplexních tvarů je odstranění nechtěného materiálu časově náročné a složité. Technologie LOM je známá tím, že kvalita povrchu není dobrá. Přesnost, hlavně v ose z, závisí na tloušťce fólie a přilnavosti. [15]

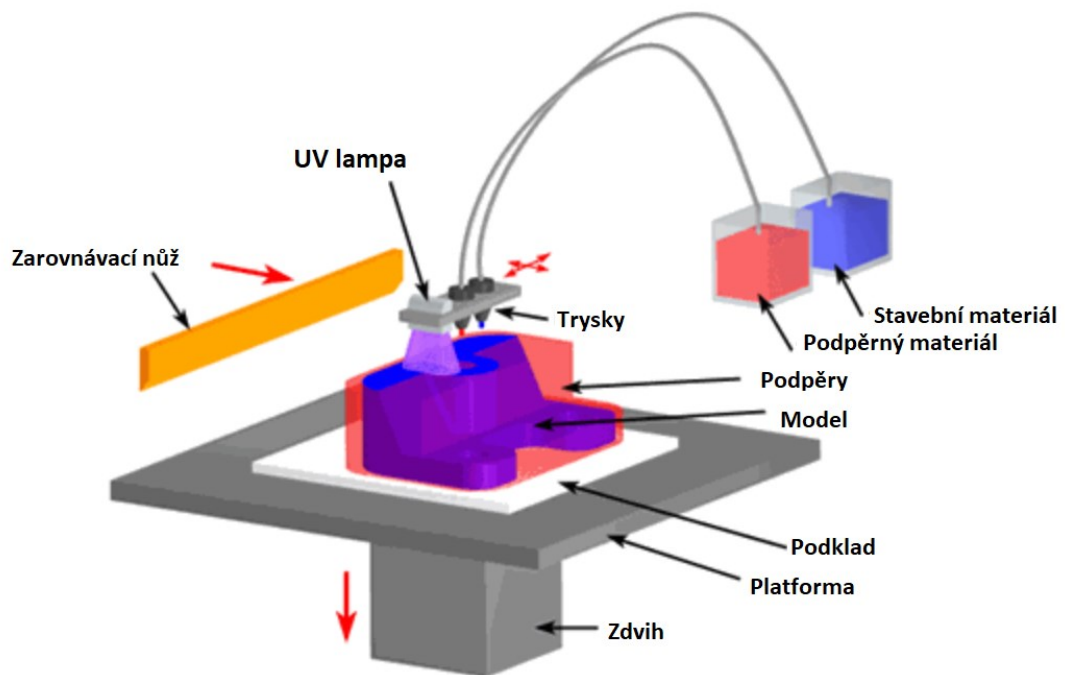


Obr. 8: Proces LOM. [15]

1.5.5 Polyjet

Začátky této technologie sahají do roku 1994, kdy tehdejší společnost Sanders Prototype (nyní Solidscape) představila tiskárnu, která tiskla vosk, který byl zahřát do tekuté formy. Později se zaměřila na akrylátové fotopolymery. Tekutý monomer byl pomocí několika stovek trysek nanášen v kapičkách na platformu a pomocí ultrafialového záření polymerizován. Materiály v pevném skupenství musí být zahřáty na skupenství kapalné, aby se tisk mohl uskutečnit. Na výrobek může mít vliv mnoho faktorů, např. hustota materiálu, povrchové napětí nebo design trysek, ale největší problém je viskozita materiálu. U vysoko-viskózních materiálů se musí viskozita snížit buď zahřátím nebo pomocí rozpouštědla. Dnes se studují materiály, které by se v budoucnu touto technologií daly tisknout, jako kovy a keramika. [1]

Technologie Polyjet je považována za zdokonalenou klasickou inkoustovou tiskárnu (inkjet), která existuje již více než půl století. Složitější modely potřebují podpěry, které se dají manuálně odstranit. Vrstvy, které touto technologií vznikají jsou mimořádně tenké. Dotvrzování výrobku v rámci dokončovacích prací není nutné. Mezi výhody této technologie patří vysoká kvalita finálního produktu, schopnost tisknout s více materiály a vytvářet vícebarevné výrobky. [15]



Obr. 9: Proces Polyjet. [17]

1.6 Aditivní vs. konvenční technologie

Pro využití aditivní technologie v aplikacích reálného světa by měl mít výrobek stejné nebo velmi podobné mechanické vlastnosti jako díl, který chceme nahradit a nebo který je vyroben konvenční metodou. Mechanické vlastnosti u aditivní technologie mohou být ovlivněny jak výrobní metodou, tak samotným materiálem. [15]

1.6.1 Mechanické vlastnosti

U aditivní výroby se setkáváme s anizotropií vyrobených dílů, oproti konvenčním metodám, kde dostáváme homogenní výrobek. Anizotropie, nebo-li směrová rozdílnost rozměrových změn, je způsobena především orientací makromolekul a plniva, včetně krystalických útvarů u částečně krystalických termoplastů. Tloušťka vrstev (šířka, výška, průměr), materiál, orientace tisku a další parametry mají vliv na mechanické vlastnosti u technologie FDM. Mechanická anizotropie pro FDM bývá největší mezi všemi druhy aditivní výroby a to ~50%. [15]

Mezi faktory, které ovlivňují mechanické vlastnosti Stereolitografie patří dokončovací práce, jako dotvrzení s různými vlnovými délkami, žíhání různými teplotami a tloušťka vrstev. Mechanická anizotropie u Stereolitografie (SLA) je velmi nízká ~ 1%. [15]

U SLS má na mechanické vlastnosti vliv výkon a rychlost laseru, orientace dílu, teplota podložky a prášek nový nebo znovu použitý. Mechanická anizotropie pro SLS je relativně nízká ~10%. [15]

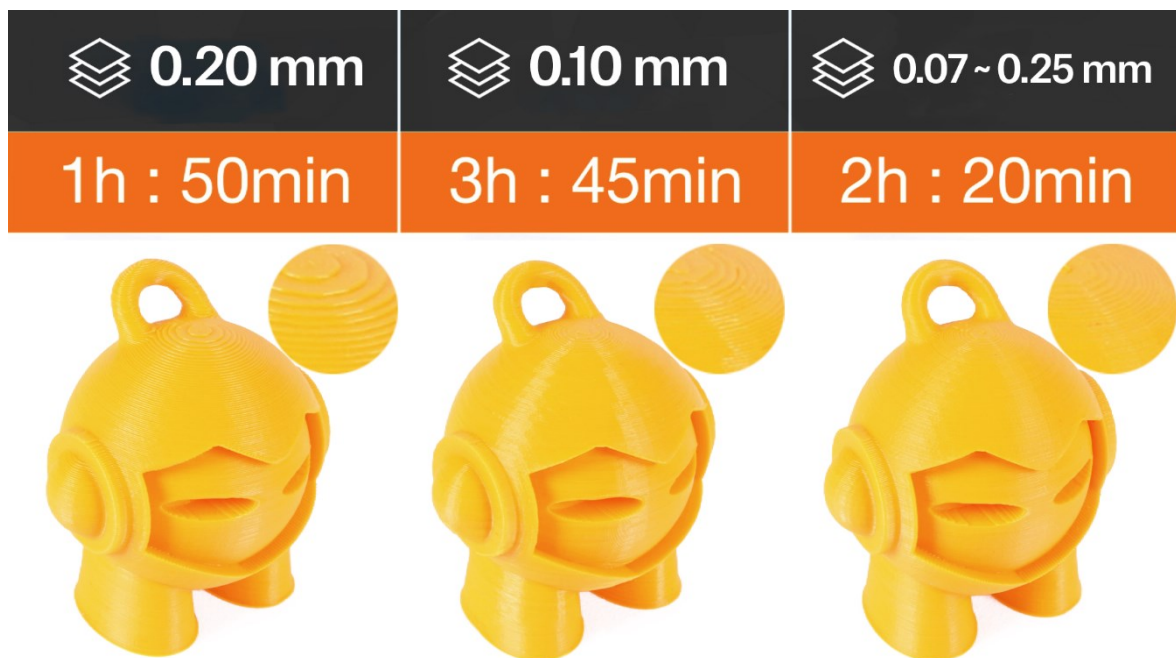
Mechanická anizotropie u Polyjet je ~2%. U Polyjet a SLA je anizotropie nízká, protože tištěný tekutý polymer je na sebe vrstven hustěji a vytvrzování UV zářením je rovnoměrné. [15]

1.6.2 Rychlost prototypové výroby vs. sériové

U technologie vstřikování musí být před samotnou výrobou zhotovena a schválená vhodná forma. Design formy je určován tvarem a kvalitou vyráběného dílu. Vstřikovací forma je sama o sobě velmi složitý systém obsahující mnoho komponentů, které musí odolávat opakovaným napětím a vyšším teplotám. Je nutné si uvědomit, že výroba vstřikovací formy není jednoduchý proces, který se odráží i na ceně. Proto se můžeme setkat s různými kompromisy a levnějšími díly, které jsou ale na úkor kvalitě nebo neefektivnosti procesu. Inženýři by měli usilovat o to, aby forma vyráběla za co nejméně času a peněz díly nejlepší kvality. Samotná doba vstřikovacího cyklu závisí na vstřikovaném objemu. Vstřikovací

cyklus může trvat jak zlomek sekundy, tak i několik desítek sekund. Výhodou vstřikovací technologie je velkosériová výroba. Podle násobnosti formy se na jeden vstřikovací cyklus může vyrobit několik výrobků najednou. [18]

Výhodou aditivní technologie jsou absence výroby formy (3D tisk žádnou nepotřebuje) a celkový proces je urychlen, jelikož k vytváření modelů je používán počítač. Doba výroby je prakticky nezávislá na složitosti tvaru. [2] Rychlost výroby pak záleží na výšce vrstev, velikosti a objemu, který vytváříme. U 3D tisku je běžné, že výroba může zabrat u malých dílů několik minut, u větších i celý den. [1]



Obr. 10: Závislost výšky vrstvy na čase výroby. [19]

1.6.3 Kvalita

Rovnoměrná a tvarová přesnost u vstřikování je ovlivňována zejména těmito faktory [20]:

- konstrukce vstřikovací formy a její temperační systém
- vstřikovaný materiál
- technologické parametry vstřikování
- podmínky použití vstřikovaného dílu.

Můžeme se setkat i s defekty, které touto technologií vznikají ve výrobku. Mezi běžné patří vzduchové bubliny, nedotečený materiál a propadliny. [20] Konstruktoři forem musí brát ohled na smrštění vstříknutého materiálu, když chladne. Hodnota smrštění se liší vlastnostmi materiálu, ale vstřikovací stroj typicky vstříkne o 1 až 10% taveniny navíc. [18]

U aditivní výroby se smrštění materiálu neprojevuje, výrobek má prakticky konstantní (předvídatelnou) přesnost. Všechny tvarové plochy jsou vyráběny s přesností daného stroje a velikosti kroku tisku. Navíc kvalita a přesnost může být nastavena, což je velká výhoda oproti konvenčním technologiím. U vstřikování musíme počítat s tím, že forma bude produkovat pouze jeden typ výrobku se stejnou kvalitou. Jakkoliv budeme chtít díl vyrábět jinak, forma se bude muset nákladně upravit, a nebo vyrobit zcela nová. [2]

1.6.4 Efektivita a šetrnost

Aditivní tiskárny jsou univerzálním výrobním prostředkem, parametrem jsou rozměry pracovního prostoru tiskárny a použitý materiál. Do tiskového prostoru lze vložit více výrobků najednou. Tím se podstatně zvýší efektivnost stroje, zároveň ale i tiskový čas. Tiskárny jsou šetrné k životnímu prostředí, protože pracují s menším objemem materiálu a vytváří méně odpadu, který je navíc často recyklovatelný. Současné 3D tiskárny jsou pro svoji univerzálnost vhodné pro kusovou nebo malosériovou výrobu. Touto technologií lze také vyrábět mechanismy nebo díly, které v sobě mají volně pohybující se části. [2]



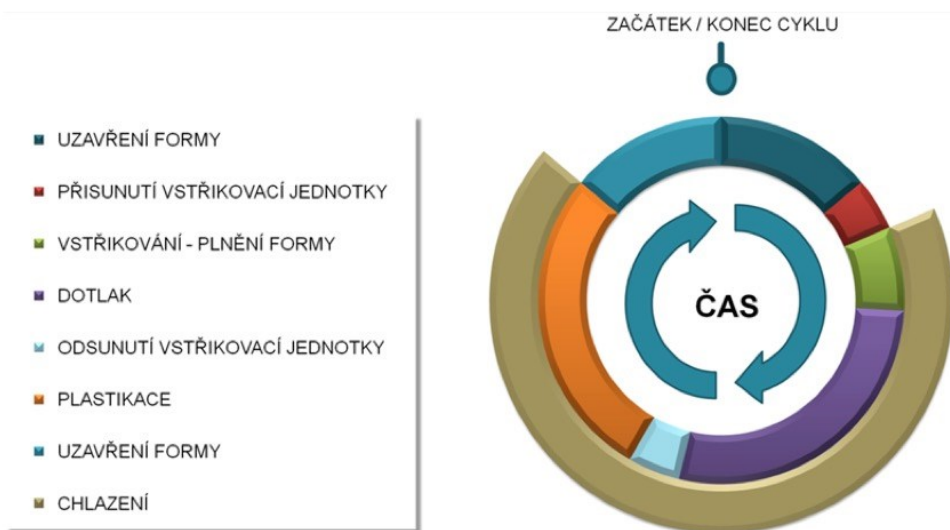
Obr. 11: Tisk více dílů najednou. [26]

ve formě tuhne ve finální výrobek. Následuje otevření vstřikovací formy, výrobek je vyhozen a celý cyklus se opakuje. [23]

2.2 Vstřikovací cyklus

Doba vstřikovacího cyklu se liší podle vstřikovaného objemu. Samotné vstřikování/plnění formy zabere v cyklu malé množství času. Doba plnění se pohybuje od zlomku sekundy po několik sekund v závislosti na vstřikovaném objemu. Vysoká vstřikovací rychlost má příznivý vliv na orientaci makromolekul, ale hrozí přehřátí materiálu a následná degradace. [18]

Doba plnění by měla být co nejkratší, protože materiál rychle chladne a nemusel by zaplnit celou dutinu formy. Po vstříknutí materiálu následuje stlačování formy (dotlak), kdy tlak prudce stoupne. Pokud by tlak zůstal stejný, došlo by ke vzniku tlakové špičky, zvětšení hmotnosti a rozměrů výstřiku a k vysokému namáhání formy. Doba plastikace je čas, který potřebuje materiál, aby došlo k zplastikování a rovnoměrnému zhomogenizování. Doba chlazení představuje největší část, která může trvat prakticky celý vstřikovací cyklus. Závisí na tloušťce stěny výstřiku, druhu polymeru, teplotě taveniny a teplotě formy. Fáze chlazení ovlivňuje nejenom strukturu (orientaci makromolekul, krystalizaci, vnitřní pnutí), ale také kvalitu povrchu. Vstřikovací cyklus musí být co nejkratší, protože čím déle trvá, tím se i zvedá cena dílu. [18]



Obr. 13: Vstřikovací cyklus. [22]

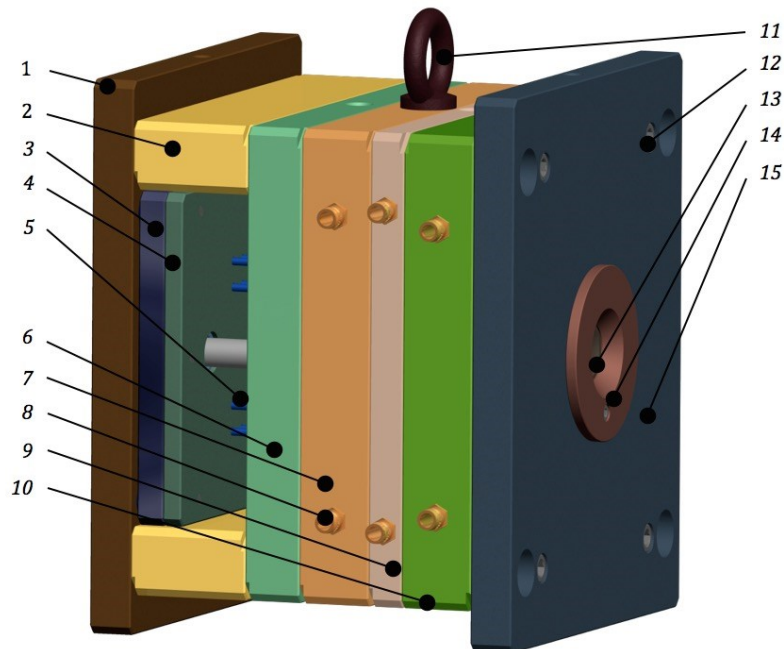
2.3 Faktory ovlivňující kvalitu a vlastnosti výstřiku

O mechanických vlastnostech a kvalitě výstřiku rozhodují technologické parametry, druh polymeru, konstrukce formy a volba stroje. Z technologických parametrů má na vlastnosti výstřiku největší vliv [23]:

- vstřikovací tlak
- teplota taveniny
- rychlost plnění
- výše a doba trvání dotlaku
- teplota formy.

Z hlediska druhu polymeru:

- smrštění polymeru
- velikost vnitřních pnutí
- tekutost a rychlost plastikace polymeru.



Obr. 14: Vstřikovací forma. [22]

1 – upínací deska pohyblivé části vstřikovací formy, 2 – rozpěra, 3 – hlavní vyhazovací deska, 4 – přidržovací vyhazovací deska, 5 – vyhazovač, 6 – podpěrná deska, 7 – „B“ deska, 8 – přípojka chlazení, 9 – „C“ deska, 10 – „A“ deska, 11 – manipulační oko, 12 – hlavní montážní šrouby, 13 – vtoková vložka, 14 – středící kroužek pevné části vstřikovací formy, 15 – upínací deska pevné části vstřikovací formy

3 VLASTNOSTI POLYMERŮ

Molekuly jsou tvořeny skupinami atomů, které mají mezi sebou silné vazby, ale relativně slabé vazby k sousedním molekulám. Polymery obsahují tisíce až miliony atomů v molekulách, které jsou velké a říkáme jim makromolekuly. Polymery jsou složeny z velkého množství malých molekul tzv. monomerů - můžeme si je představit jako velké budovy a monomery jako cihly. Monomery jsou jednoduché organické molekuly obsahující dvojně vazby nebo minimálně dvě aktivní funkční skupiny. Přítomnost dvojných vazeb nebo funkčních skupin se chová jako síla, která spojuje jeden monomer s druhým a vytváří polymerní molekulu. Např. monomery ethyleny jsou vysoce reaktivní, protože mají dvojnou vazbu. Tento proces transformace monomeru na polymer se nazývá polymerizace. [24]

Jestliže monomer obsahuje pouze dvě místa (funkce) schopná vytvářet kovalentní chemickou vazbu, vznikají polymery lineární. Při větším počtu funkčních míst mohou vznikat polymery rozvětvené nebo prostorově zesíťované. Základní stavební (monomerní) jednotka charakterizuje chemickou strukturu polymeru, která má zásadní vliv na jeho chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti. [24]

Polymery můžeme rozdělit do tří základních skupin:

- (a) Elastomery - Vysoce elastické polymery, které lze za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení. Tato deformace je převážně vratná. Dominantní skupinou elastomerů jsou kaučuky, z nichž se vyrábí pryže (nespisovně guma).
- (b) Termoplasty - Za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při zvýšené teplotě se stávají plastickými a tvarovatelnými. Změna z plastického do tuhého stavu je opakovaně vratná.
- (c) Reaktoplasty – Polymery, které se teplem, zářením nebo působením katalyzátoru vytvrdí. Vytvrzení znamená vytvoření prostorové sítě v materiálu, díky které takový polymer získává zajímavé vlastnosti, především je netavitelný a nerozpustný.
- (d) Termoplastické elastomery – Elastické polymery, za pokojové teploty mají vlastnosti elastomeru, ale jsou zpracovány jako termoplasty. Jsou houževnaté a dají se opakovaně zpracovávat.

3.1 Fyzikální vlastnosti

3.1.1 Molární hmotnost

Molární hmotnost patří k nejvýznamnějším strukturním charakteristikám polymerů. Hodnota molekulové hmotnosti rozhoduje o chování polymeru za různých podmínek. [24]

Vysoká molekulová hmotnost polymerů způsobuje, že jejich bod varu je ve všech případech vyšší, než je teplota jejich rozkladu (degradace). Z tohoto důvodu neexistuje u polymerů plynný stav. Polymery se mohou nacházet pouze v kapalném nebo tuhém stavu. Podle uspořádání makromolekulárních řetězců v tuhém stavu rozlišujeme vysoce uspořádaný stav – krystalický a téměř neuspořádaný stav – amorfní (sklovitý). [24]

3.2 Mechanické vlastnosti

Do mechanických vlastností polymerů se řadí komplex vlastností, které vykazují polymery vlivem působení vnějších (mechanických) sil. Tyto vlastnosti závisí především na fázovém stavu polymerů, teplotě, čase, velikosti a směru působení vnější síly. Mechanické vlastnosti polymerů jsou zjišťovány pomocí deformačních zkoušek, při nichž se vyhodnocuje vzájemný vztah čtyř proměnných veličin: napětí σ , relativní deformace ϵ , teplota T a čas t . [25]

Creepem“ (krípem) rozumíme izotermální časovou závislost relativní deformace v důsledku působení konstantního deformujícího napětí. Relaxace napětí je deformační zkouška, při níž v čase $t = 0$ je vzorek deformován na určitou konstantní deformaci ϵ_0 . Toto je maximální deformační napětí σ_0 , které potom pozvolna klesá. Pracovní (tahová) křivka – pomocí těchto zkoušek, závislosti napětí na deformaci, sledujeme deformační chování vzorků stejného průřezu vystavených jednosměrné deformaci ve směru vzorku měnící se konstantní rychlostí ($d\epsilon / dt = \text{konst.}$). [25]

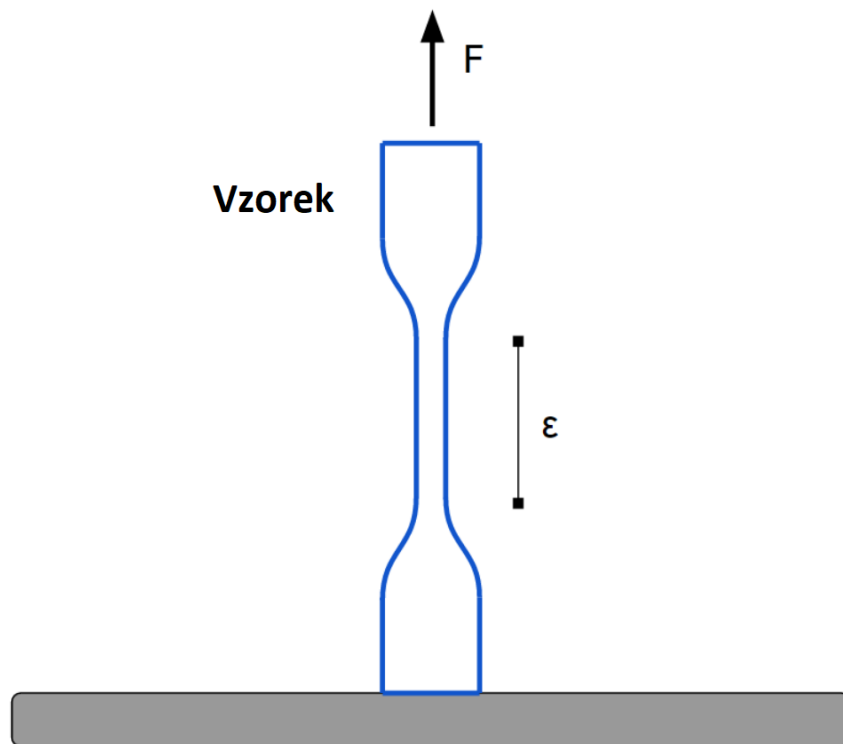
Dynamické zkoušky umožňují komplexnější studium viskoelastických vlastností polymeru. Na vzorek je vkládáno periodicky proměnné tahové nebo tlakové napětí nebo je vzorek periodicky deformován. Při vysokých frekvencích se materiál jeví jako dokonale elastická látka, naopak při nízkých frekvencích se uplatňují více viskoelastické vlastnosti. [25]

3.2.1 Smrštění

Všechny termoplasty se při ochlazení smrští. Některé i několikrát více než ostatní polymery. Tištěný model se může deformovat nebo se odlepit od platformy pokud je polymer ochlazen rychle během procesu tisku. Tento problém nastává u materiálů, které mají velkou hodnotu smrštění jako například ABS. ABS má také vyšší teplotu tání než PLA, to znamená, pokud je rychle ochlazen z teploty tání na pokojovou teplotu, smrští se více. [26]

3.2.2 Tahová zkouška

Konvenční způsob jak testovat polymery jsou tahové zkoušky. Tyto zkoušky jsou prováděny pod specifickými podmínkami. Zkoušený vzorek je upevněn mezi dvě čelisti. Čelisti se od sebe pomalu vzdalují od sebe a namáhají vzorek. Během tažení se měří posunutí a síla. Rychlost čelistí vzdalujících se od sebe je stanovena rychlosti deformace. [26]



Obr. 15: Měření napětí na vzorku. [26]

4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI FDM TIŠTĚNÝCH DÍLŮ

Fused deposition modeling (FDM) se značně prokázala jako dostupnější metoda 3D tisku, jak v ceně přístroje, tak v ceně materiálu, než průkopnická stereolitografie (SLA) a Selective laser sintering (SLS). [27]

Mechanické vlastnosti FDM tištěných dílů mohou být ovlivněny materiálem, tak i výrobní metodou. U materiálů má největší vliv na mechanické vlastnosti hustota, molekulární váha, výrobce a kvalita. [1] Pokud po výrobku chceme požadované vlastnosti, nemělo by se na filamentu zbytečně šetřit, ale nakupovat u ověřených prodejců, kteří se mohou kvalitou zaručit.

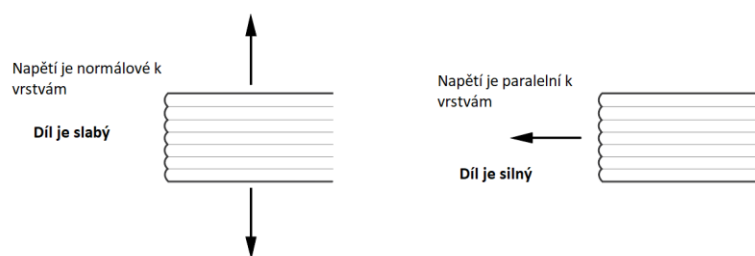
4.1 Vliv procesních parametrů na mechanické vlastnosti

Vliv na mechanické vlastnosti u výrobních metod bývá zapříčiněný orientací tisku, výplní, výškou vrstev, vzoru výplně, množstvím parametrů, dokončovací práce a další. Aby výsledný díl měl potřebné vlastnosti, musíme vědět, jestli výsledný výtisk bude v praxi namáhán, nebo sloužit jako dekorační doplněk. [15]

4.1.1 Orientace tisku

Vliv na mechanické vlastnosti má i orientace vláken filamentu ve výtisku. Před samotným tiskem bychom si měli uvědomit, jestli bude výsledný díl namáhán nebo ne. Některé 3D tiskárny (převážně FDM) produkují díly, které mají anizotropické vlastnosti, což znamená, že ve směru osy X a Y jsou pevnější než v ose Z. [28]

Pokud bude díl při použití zatěžován, měli bychom vědět jakým druhem namáhání a v jakém směru. Napětí, které působí v normále k vrstvám tisku bude vždy menší než napětí, které působí paralelně k vrstvám. Toto je zapříčiněno kvůli slabým vazbám mezi vrstvami. Správné nastavení orientace tisku nám může pomoci k získání 4-5krát silnějšího dílu. [28]



Obr. 16: Závislost směru síly působící na vrstvy. [28]

Pokud si představíme válec o průměru 10 mm a délce 30 mm, který je tisknut na tiskárně s vertikální centrální osou, tiskla by tiskárna takovýto díl sérií kruhů tištěných na sebe. Finální díl by měl díky tomu relativně hladký povrch. Pokud bychom ale stejný díl tiskli s horizontální centrální osou, tiskl by se sérií obdélníků vrstvených na sebe. To by mělo nepříznivý vliv na kvalitu povrchu, navíc povrch, který se dotýká platformy, bude plochý, ne zakulacený (obr.17). [28] Je proto tedy někdy nutné udělat kompromis mezi užitnými a designovými vlastnostmi výrobku.

Orientace může mít také velký vliv na délku času tisku. Pro příklad se může použít stejný válcový díl. Horizontální orientace zabere méně času než vertikální, protože počet vrstev je podstatně menší. U 100 μm tloušťky vrstvy by byl válec orientovaný horizontálně složen ze 100 vrstev, zatímco vertikální ze 300. Tento rozdíl se obzvlášť u větších dílů signifikantně ukáže na délce tisku. [28]



Obr. 17: Válec tištěný horizontálně a vertikálně. [28]

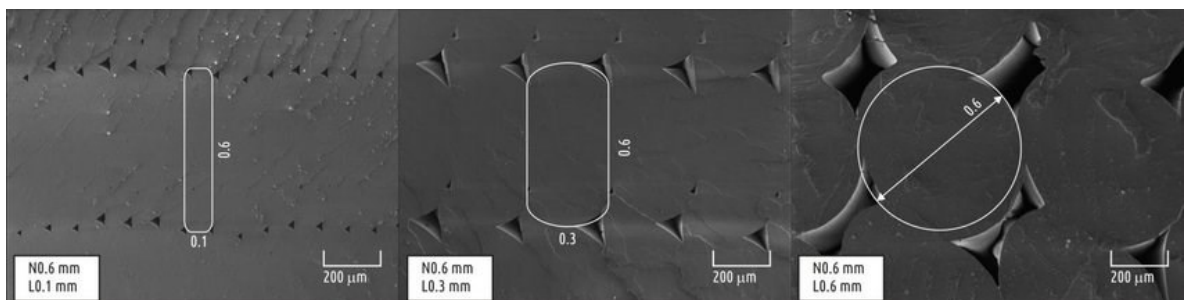
4.1.2 Výška vrstvy

Součásti získané pomocí FDM mají explicitní anizotropii mechanických vlastností, což je způsobeno charakteristikou procesu vkládání vláken roztaveného termoplastického materiálu na sebe. Síla FDM dílů napříč vrstvami (osa Z) je výrazně nižší, než síla podél vláken (osa X-Y). [27]

Rozhraní mezi vrstvami FDM tisku jsou morfologicky velmi podobná místům, kde se potkají dvě čela taveniny u vstříknutých dílů nebo jsou svařená. Předchozí studie těchto rozhraní prokazují, že jejich mechanická výdrž je podstatně horší než výdrž homogenních

součástí vytvořených ze stejného materiálu a než objemové vlastnosti. Pokusy o výrazné zlepšení síly 3D tištěných částí se proto musí zaměřit na osu Z. S ohledem na to, nejdůležitější parametr proto není síla samotného materiálu, nýbrž síla a stabilita vazeb mezi vrstvami vzorku, což je do značné míry pro změnu určeno parametry tisku. Výzkum vlivu procesových parametrů na sílu vzorků v ose Z je doposud vzácný. [27]

Získaná data mohou být zobecněna pomocí následující formulace: čím vyšší je poměr mezi průměrem trysky a výškou vrstvy, tím více se jednotlivá vlákna tisknutého filamentu přibližují ideální kružnici (viz obr.). Čím menší je výška vrstvy, tím více průřez vrstev připomíná protáhlý obdélník. Tohle může být demonstrováno na obrázcích průřezů vzorků tištěných 0.6 mm tryskou s minimální (0.1 mm), průměrnou (0.3 mm) a maximální (0.6 mm) tloušťkou vrstvy. Nejdůležitější faktor definující sílu výsledné součástky je proto oblast kontaktu povrchu mezivrstev, která je definována poměrem průměru trysky k výšce vrstvy.[27]



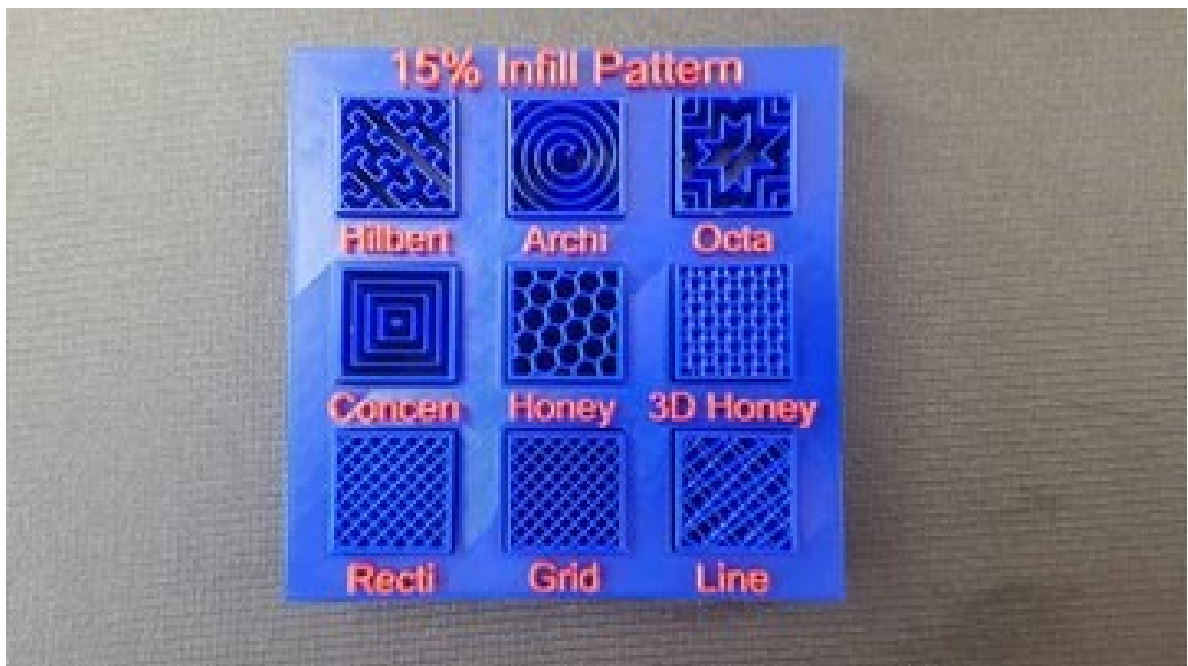
Obr. 18: Výšky tištěných vrstev pod elektronovým mikroskopem. [27]

Je to právě výška vrstev, která má největší vliv na soudružnost v rámci vrstvy. Síla dílu se sníží, zatímco se výška vrstvy zvýší u všech zkoumaných trysek v rámci celé škály testovaných hodnot výšek vrstev. V případě těchto zkoumaných vzorků se při změně výšky vrstvy z minima na maximum síla snížila cca 3,5x. Soudružnost mezi vrstvami je také významně ovlivněna průměrem trysky. Při konstantní výšce vrstvy tisknutí s většími tryskami vede ke zvýšení síly dílu. Výhody větších trysek jsou ještě zřetelnější u větší tloušťky vrstvy. [27]

4.1.3 Výplň

Je mnoho druhů tvaru, velikosti a vzorů výplně. Každý druh má rozdílnou pevnost, slabost a své použití. Přesto, že výplň může mít nespočet forem, jsou tady některé poměrně standartní vzory. [29]

Jelikož výplň zabírá vnitřní část výtisku, dává smysl, že výplň designovaná pro strukturu funguje lépe, než výplň pro estetiku. V tomto případě, druhy výplně zahrnující mřížky, linky, plástve - přímočaré nebo soustředěné vzory, fungují nejlépe. Pokud je hustota nastavena správně, dávají tyto vzory dílu dostatek objemu pro tisknutí mezi prostorem. Tím je dovoleno tisknout převalá místa přesněji a s menšími chybami. Vzory “octa” a “archi” (obr. 19) jsou vhodnější pro kruhové a zaoblené tvary, “Hilbert” a “3D honey” se hodí pro pravoúhlé tvary. [29]



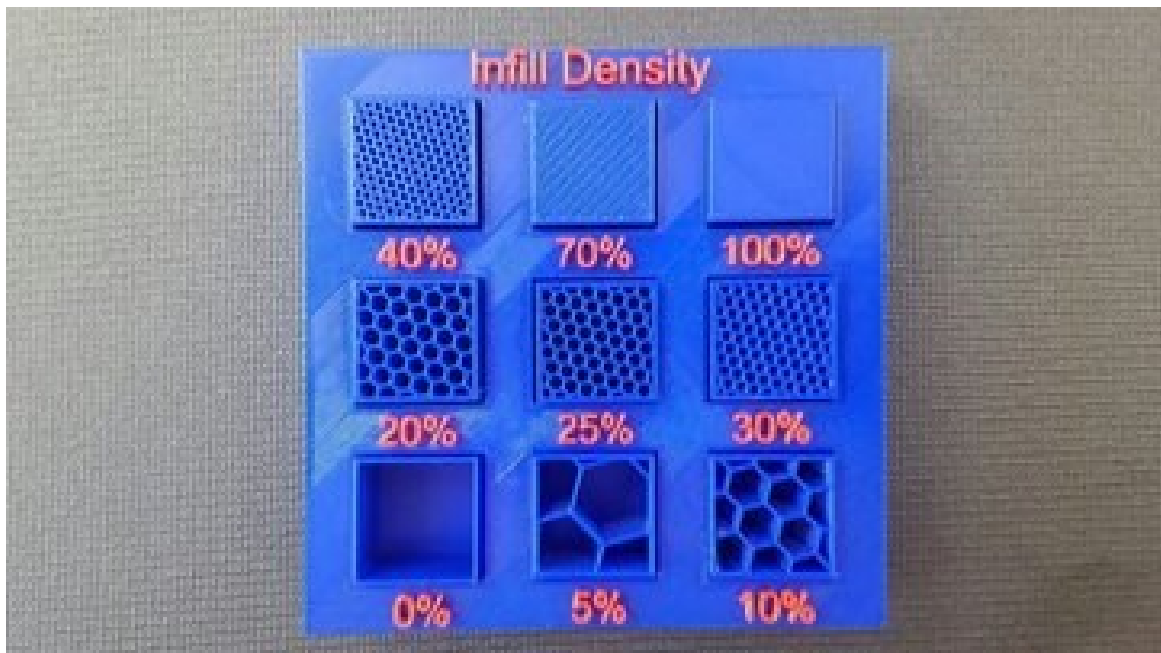
Obr. 19: Běžné výplně 3D tisku. [29]

Jakmile se rozhodneme, s jakým stylem výplně budeme tisknout, bude dalším krokem nastavení hustoty výplně - 0% výplně znamená dutý výtisk - 100% výplně znamená plný. Hustota výplně se jeví jako mimořádně užitečná a výhodná pro různé funkce. Jedno očividné použití je pro změnu hmotnosti výtisku. Čím je vyšší hustota výplně, tím větší bude hmotnost výrobku. Vyšší hustotou výplně také získáme pevnější výtisk, ale čas tisku a spotřeba materiálu se může navýšit. Oproti tomu nižší hustota výplně poskytne jednodušší a lehčí výrobek. [29]

Běžná hustota výplně se pohybuje mezi 20-25 %. To nám poskytne dobrou rovnováhu mezi odolností výrobku a spotřebou materiálu. Nejlepší rozsah je 10-15 %, pokud nás nezajímá struktura a pevnost, ale cena a spotřeba materiálu ano. Pokud je požadován vcelku pevný díl, měl by být rozsah výplně nastaven mezi 30-50 %. Když se ale nehledí na cenu a spotřebu materiálu, ale usiluje se o co nejpevnější výrobek, model měl by být tištěn se 100 % výplní. [29]

Běžně přehlíženo bývá nastavení směru výplně. Výchozí nastavení směru bývá 45°, takže motory na osách X a Y pracují zároveň. Výhodnější by ale bylo orientovat výplň pod jiným úhlem, aby bylo dosaženo maximální pevnosti nebo flexibility dílu, zejména tehdy, když jsou stěny tisku diagonální. [30]

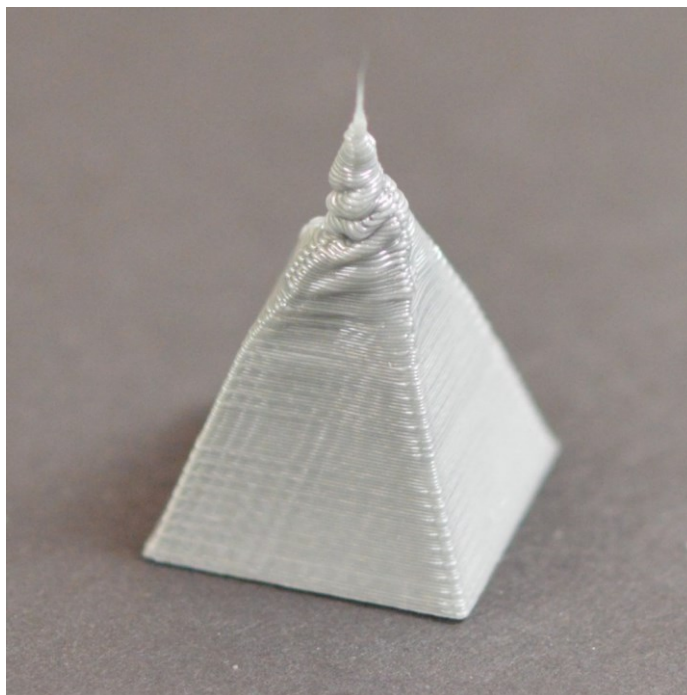
S tolika možnostmi a rozdíly mezi 3D tiskárnami by měla být výplň volena opatrně tak, aby byla vhodná pro naše potřeby. [29]



Obr. 20: Procentální hustota výplně. [29]

4.1.4 Teplota

Teplota tištěného materiálu u FFF 3D tisku bývá udávána v rozmezí 190 a 300°C. Je uvedeno mnoho faktorů, které ovlivňují teplotu, při které máme tisknout. Jedním z nich je materiál. Obecně, polymery s nízkou teplotou skelného přechodu potřebují nízkou teplotu extruze. Rozdíly chování materiálu v procesu tisku se odvíjí od druhu materiálu. Jev, který hraje důležitou roli u 3D tisku je, jak se tisknutý polymer chová potom, co byl extrudován. To záleží na teplotě tištěného materiálu a teplotě okolí. Pokud je materiál tištěn na převislé místo, může být v důsledku gravitace deformován, což způsobí odchylku od původní geometrie modelu. Této deformaci se můžeme částečně vyhnout nastavením teploty extrudovaného materiálu, nebo pomocí ventilátorů, které na čerstvě vytištěný polymer foukají studený vzduch a tím ho rychleji vytvrdí. [26]



Obr. 21: Díl tištěný se špatným chlazením. [31]

4.2 Dokončovací práce

Linie vrstev jsou obvykle přítomné u FDM výtisků. Pokud chceme hladký povrch, je proces dokončovacích prací důležitým krokem. Některé dokončovací práce mohou také přidat pevnost a zmírnit anizotropii dílu. [32]

4.2.1 Povrchové úpravy

Pískování

Pískování je velice efektivní proces, během kterého je proti předmětu pod vysokým tlakem pomocí vzduchu stříkán pískovací materiál (abrazivo). Jedná se tedy o abrazivní úpravu povrchu pomocí drobných částic, která vyhladí nebo zdrsňuje povrch předmětu a odstraní povrchové nečistoty. [33]

Broušení

Chceme-li vyhladit povrch výrobku, provádí se broušení. Broušením mohou být odstraněny buď nedostatky na povrchu dílu nebo zbytky po podpěrách. Doporučuje se, aby se brousilo mokřím brusným papírem. Vodou se sníží tření a tvorba tepla – tím se zabrání poškození dílu. Měli bychom mít na mysli, že pokud se brousí díly vyrobené z PLA nebo jiného materiálu, který při nižších teplotách taje, mělo by být broušení vždy prováděno ručně. Mezi nevýhody této dokončovací práce se řadí: [32]

- 1) špatné broušení složitějších dílů a detailů
- 2) změna přesnosti a rozměrů dílu.

Po broušení může následovat například leštění nebo barvení.

Vyhlazení parou

Některé polymerní materiály mohou být leptány určitým rozpouštědlem. Tato vlastnost je využívána za účelem získání velmi hladkého dílu. Materiál ABS je tímto velice známý a vyhlazení pomocí acetonových par se hojně využívá. Princip je jednoduchý; do nádoby se naleje aceton a poté se vloží díl tak, aby se nacházel nad acetonem. Výpary díl naleptají a po pár minutách je vytvořen hladký povrch. [34] Proces můžeme urychlit dodáním tepla. Nevýhodou této dokončovací práce je, že se díl může zničit, pokud ho necháme v parách dlouho. Tato metoda se může provést i u PLA s jiným rozpouštědlem, ale je podstatně těžší díl vyhladit než u ABS. Při využívání metody vyhlazení parou by měl brát zřetel na ochranu. Některé látky mohou být zdraví nebezpečné nebo hořlavé. [35]



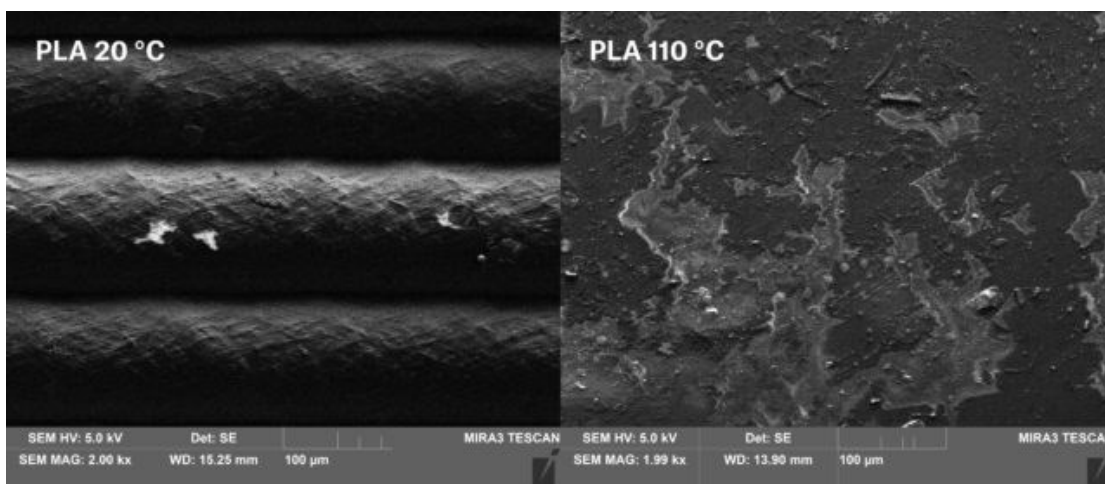
Obr. 22: Výtisk ABS nevyhlazený a vyhlazený acetonovou parou. [34]

Přesto, že vyhlazené modely mají o něco málo lepší vazby mezi vrstvami oproti nevyhlazeným dílům, nejsou pro tuto metodu funkční (mechanické) díly vhodné. Proces vyhlazování pomocí par může změnit rozměry a tvar (hlavně ostré hrany) a nezlepší mechanické vlastnosti dílu. Proto je tato metoda používána pouze k estetice výrobku. [32]

4.2.2 Annealing

Jedná se o proces, při kterém se díky zvýšené teplotě zlepši pevnost, tažnost a teplotní odolnost dílu. Žihání se vyplatí u dílů s jednoduchými tvary, které potřebují zlepšit sílu v tahu či mechanické odolnosti. [36]

U 3D tisku je materiál rychle zahřát nad teplotu tání, extrudován a potom rychle ochlazen. Jelikož jsou polymery špatnými tepelnými vodiči, zahřívání a chlazení je nerovnoměrné, což vytváří napětí v tisknutém dílu. Toto napětí se objevuje v mikrostruktuře tisknutého polymeru. Před vytisknutím je struktura polymeru z větší části amorfni a neuspořádaná. Jakmile se ale tištěný polymer rychle ochladí, mikrostruktura se přetvoří do krystalické formy s velkými krystaly. Tyto krystaly způsobují v polymeru náchylnost k selhání. Jelikož jsou tyto krystaly velké, linie mezi krystaly se mohou snadno zlomit a ovlivnit pevnost a celistvost tištěného dílu. Například u správného žihání PLA je výsledkem pevnější a tužší díl. Pevnost se může zvýšit až od 40% a tuhost o 25%. Smrštění u žihání PLA materiálu může být až do 5%. [37] Běžně používané materiály pro 3D tisk podléhají změnám rozměrů a tvaru už při relativně nízkých teplotách (okolo 70° C). Chceme-li, aby byl zachován tvar a velikost modelu, měl by být výrobek poprvé vyžihán, změřeny změny rozměrů, díl vytisknut znovu v upraveném měřítku a znovu vyžihán. Tak je dosaženo pevnějšího dílu s požadovanou velikostí. [36]



Obr. 23: PLA nevyžihané a vyžihané pod el. mikroskopem. [36]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 NÁVRH EXPERIMENTU

Cílem bakalářské práce bylo zhotovit zkušební tělesa pomocí 3D tisku a vstříkování. U těchto těles se následně bude zjišťovat pevnost, konkrétně mez pevnosti v tahu v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1 a vrubová houževnatost v souladu s normou ČSN EN ISO 179-1. Také bylo zkoumáno, jak souvisí výška vrstev u 3D tisku s jeho mechanickými vlastnostmi a jestli je můžeme zlepšit pomocí annealingu.

5.1 Zkušební materiály

Pro experiment byly zvoleny materiály CPE HG100 a ABS Extrafill, které nám byly poskytnuty českou firmou Fillamentum Manufacturing s.r.o.. Firma začala fungovat roku 2012 a zaměřovala se převážně na výrobky pro automobilový průmysl. Od roku 2014 se věnuje technologii 3D tisku a dnes patří mezi světovou špičku v produkci kvalitních filamentů. Značí to i fakt, že materiál distribuuje do více než 62 zemí po celém světě.

5.1.1 ABS Extrafill

Materiál ABS je amorfnní termoplastický průmyslový kopolymer. Vyznačuje se svojí tuhostí, houževnatostí, odolností vůči kyselinám a teplotám do 105 °C. Je vhodný pro prototypy nebo funkční díly.

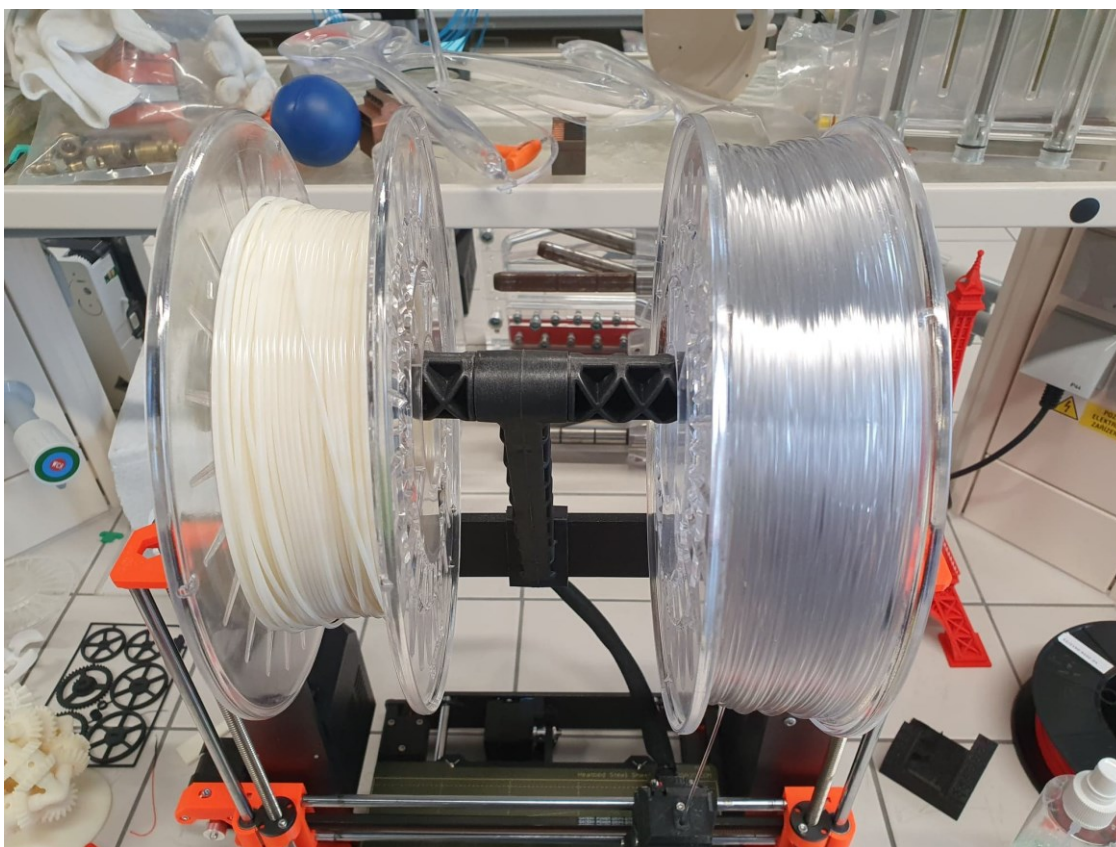
Materiál ABS je známý pro jeho horší tiskové vlastnosti. Pro tisk jsou potřebné vyšší teploty. Díky citlivosti na teplotní změny, které se projevují zkroucením modelu a následné špatné přilnavosti se doporučuje uzavřená komora. Komora by také měla být odvětraná, protože materiál ABS může obsahovat zdraví škodlivé výpary.

5.1.2 CPE HG100

Kopolymer na bázi kyseliny tereftalové, který je díky vynikající houževnatosti, vyšší tvrdosti a odolnosti vůči chemikáliím určen pro technické využití, funkční prototypy a mechanické součásti. Materiál se také vyznačuje vysokou pevností v tahu a průhledností u tenkostěnných modelů. Tento vylepšený PET (PETG) filament přináší kvalitní a snadný tisk. Oproti ABS je CPE bez nepříjemného a zdraví škodlivého zápachu, bez deformací a vyznačuje se výbornou přilnavostí k tiskové podložce.

Na rozdíl od ABS se CPE tolik nekroutilo a nebylo potřeba použít izopropylalkohol pro odmaštění podložky. Naopak vzorky držely na podložce tak pevně, že je občas bylo

složité odloupnout. Tento problém byl vyřešen nastříkáním přípravku na čištění oken na podložku, který na ní vytvořil film, díky kterému bylo odlepení tělísek jednodušší.



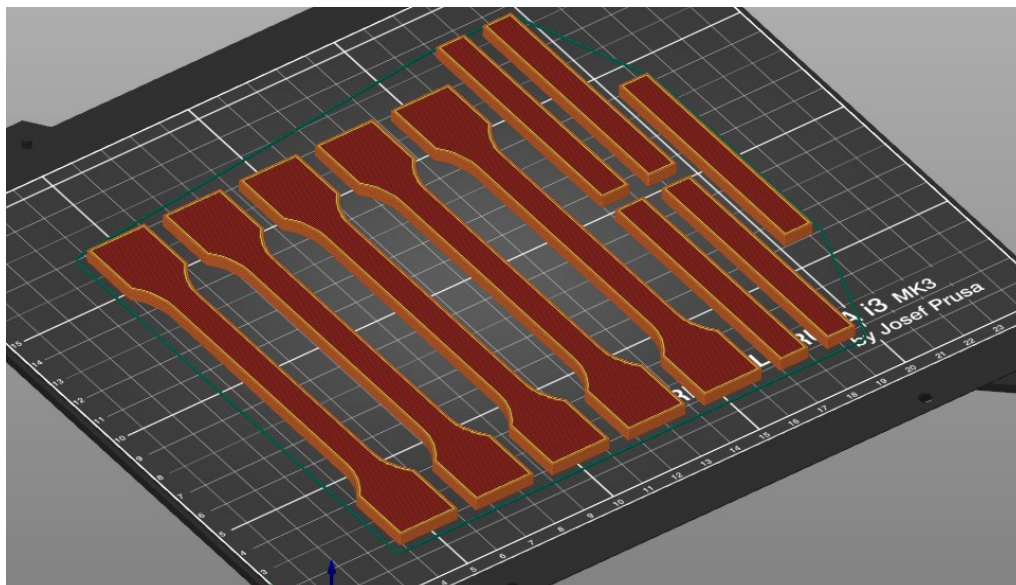
Obr. 24: Vlevo materiál ABS, vpravo CPE.

5.2 Výpočet vzorků

Cívky s materiálem, které byly použity pro výzkumné účely, mají každá po 750 g materiálu. Jako první věc bylo nutné vypočítat objem zkušebních těles a následně stanovit, kolik vzorků je možno vyrobit z jedné cívky materiálu. Při výpočtu byl brán ohled i na to, že se každý výtisk nemusí vydařit, proto bylo počítáno s 20 % z celkové hmotnosti materiálu jako s rezervou. Výsledkem u materiálu ABS je 50 vzorků pro tah (ČSN EN ISO 527-1) a 83 pro Charpyho kladivo (ČSN EN ISO 179-1). U materiálu CPE si můžeme dovolit 50 vzorků pro tah a 58 pro Charpyho kladivo.

Tab. 1: Počet vzorků z cívky.

Počet vzorků z jedné cívky	ČSN EN ISO 527-1	ČSN EN ISO 179-1
ABS (ks)	50	83
CPE (ks)	50	58



Obr. 25 Modely zkušebních těles pro tisk.

5.3 Rozdělení vzorků

Vzhledem k poměrně velkému počtu kusů, které jsme schopni z jedné cívky vyrobit, bylo rozhodnuto porovnávat nejen výšku vrstev, ale i rozdílné teploty při žihání. Pro každou teplotu při žihání bylo zvoleno 5 vzorků, stejně jako u výšky vrstev (viz. tab. 2). Bylo tedy potřeba vyrobit pomocí 3D tisku 80 vzorků z jednoho materiálu pro obě zkoušky, celkově 160 vzorků.

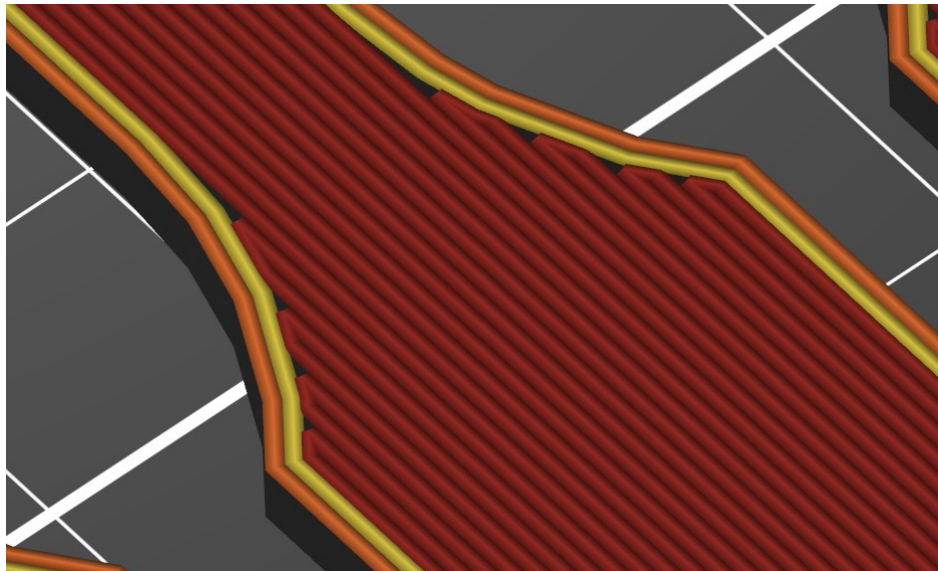
Tab. 2: Počet vzorků pro jednotlivá testování.

Výška vrstev	ČSN EN ISO 527-1	ČSN EN ISO 179-1
0,1 mm	5 ks	5 ks
0,2 mm	5 ks	5 ks
0,3 mm	5 ks	5 ks
žihání	ČSN EN ISO 527-1	ČSN EN ISO 179-1
°C	5 ks	5 ks
°C	5 ks	5 ks
°C	5 ks	5 ks
°C	5 ks	5 ks
°C	5 ks	5 ks

5.4 Příprava tisku

Jak již bylo zmíněno, na mechanické vlastnosti výtisku mají vliv jak výplň, tak i výška vrstev. Abychom docílili nejvyšší možné pevnosti a nejmenšího možného smrštění při annealingu, hustota výplně byla nastavena na 100 %. Jelikož je vzorek u tahové zkoušky

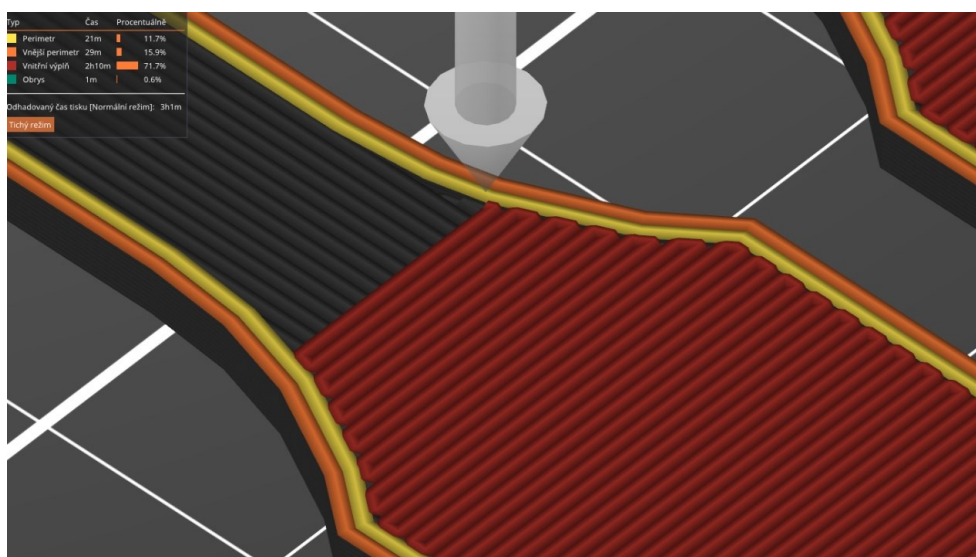
namáhán jednoose, byla zvolena podélná výplň. Tato varianta nebyla ideální, protože tištěný materiál nezaplňoval u rádiusů celou plochu. Tímto vzniklo kritické místo, ve kterém byl vzorek následně přetrhnut. (viz. Obr. 26)



Obr. 26: Kritické místo v rádiusu

Po zjištění této vady byla orientace výplně upravena, a to tak, že každá vrstva se překrývala s předchozí vrstvou pod úhlem 90°. Pro test byla vyzkoušena i tryska s průměrem otvoru 0,4 mm, avšak na výsledný vzorek neměla žádný vliv a rádius nebyl také zcela zaplněn.

Tato úprava zajistila, že se zkušební těleso při tahové zkoušce nepřetrhne ve slabých místech rádiusu, ale v polovině tělesa. Dalším parametrem, který může ovlivnit mechanické vlastnosti dílu jsou perimetry. Ty byly zvoleny dva.



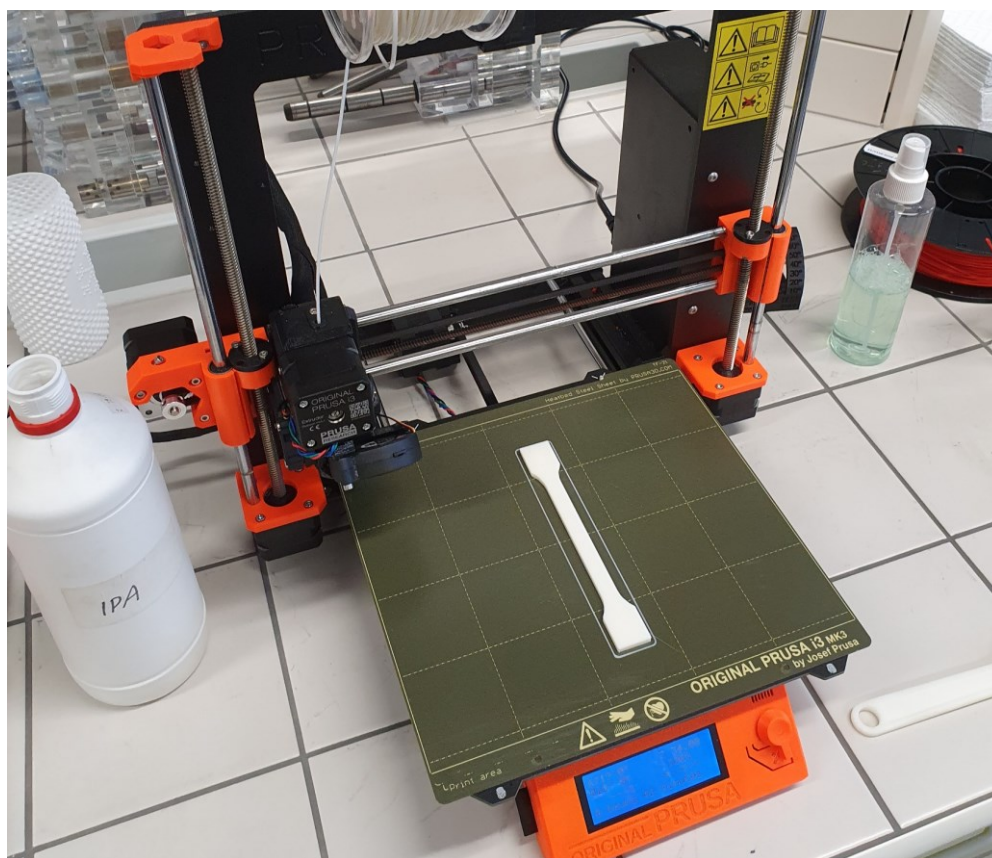
Obr. 27: Finální vzor výplně.

6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK

Zajímavým poznatkem bylo, že při 3D tisku se materiál CPE choval lépe, to znamená že měl lepší přilnavost k tiskové podložce a lépe se tisknul oproti ABS. U vstřikování to bylo obráceně. Zatímco se ABS vstřikovalo dobře, u materiálu CPE se projevovaly mírné komplikace, které se ale podařilo odstranit. Abychom získali uspokojivý vzorek, parametry pro vstřik CPE byly několikrát upraveny.

6.1 Výroba metodou 3D tisku

Pro výrobu tištěných vzorků je využita FDM tiskárna Prusa i3 MK3S+ s 0,6 mm tryskou. Tato tiskárna je nejnovější verzí celosvětově známých a oceňovaných 3D tiskáren od firmy Prusa Research. Ovládání této tiskárny je velice jednoduché a intuitivní. Tiskárna obsahuje automatický Mesh Bed Leveling pro vyrovnání nerovností podložky, senzor filamentu, tichý režim, zotavení ze ztráty napájení a rychlost tisku vyšší jak 200 mm/s. Samotná tiskárna získala ocenění Nejlepší 3D tiskárna na webu ALL3DP. MK3S je také nejlépe hodnocenou 3D tiskárnou roku 2019 podle prestižního magazínu MAKE. Jako slicovací software pro vytvoření G-CODE byl použit Prusa Slic3r, který je od stejného výrobce tiskárny.



Obr. 28: Tisk zkušebního tělesa.

Celkový čas, který tisk těles zabral, byl zhruba 69 hodin. V průběhu tisku jsme se setkali s nejedním nepovedeným výtiskem. Nepovedené výtisky byly způsobeny převážně špatnou přilnavostí, hlavně u materiálu ABS. Celkový čas tisku 160 vzorků i s chybami mohl být tedy okolo 80 hodin.

6.1.1 ABS

Pro tisk materiálu ABS byl zvolen přednastavený profil ABS od výrobce Prusa Slic3ru. Tento profil je nastavený s optimálními hodnotami a parametry pro tisk právě tohoto materiálu. Zkušební těleso mělo uspokojivou kvalitu (Obr. 28). Nastavení, které bylo pozměněno, bylo pouze v teplotě a vzoru výplně. Pro teplotu tiskové hlavy byla zvolena teplota 240 °C, pro tiskovou podložku 100 °C.

Jak bylo zmíněno výše, materiál ABS se vyznačuje horšími vlastnostmi tisku díky jeho horší přilnavosti. V našem případě byl použit pouze izopropylalkohol k odmaštění tiskové podložky za účelem lepší přilnavosti modelu. Tato metoda pomohla pouze částečně, proto bylo využito možnosti ve sliceru přidání skurtu (první vrstvy tělesa mají lem pro lepší přilnavost materiálu), který se dal následně lehce z hotových těles odstranit.

6.1.2 CPE

Nastavení tisku pro CPE bylo v podstatě podobné jako pro ABS, byly pouze pozměněny teploty. Výrobce doporučuje teplotu trysky 255-275 °C a tiskové podložky 70-85 °C. Teplota tiskové trysky byla nastavena na 270 °C a tisková podložka na 75 °C.

6.2 Metoda vstřikování

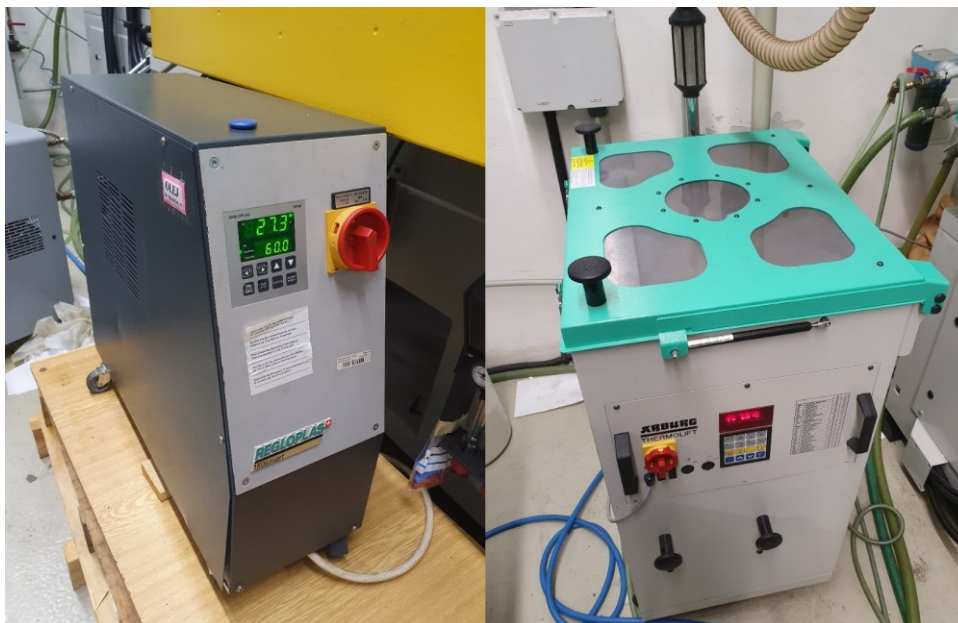
Pro vstřikování zkušebních těles byly použity stejné materiály od stejného výrobce, pouze ve formě granulátu, ze kterého se filament pro 3D tisk vyrábí.

Ještě před vstřikováním byl materiál sušen. Sušení materiálu je u vstřikování, ale i u 3D tisku velice důležité, protože materiál může být hydrofilní – váže na sebe vodu, a může mít negativní vliv jak na samotné zpracování, tak i na mechanické vlastnosti vyrobeného dílu.

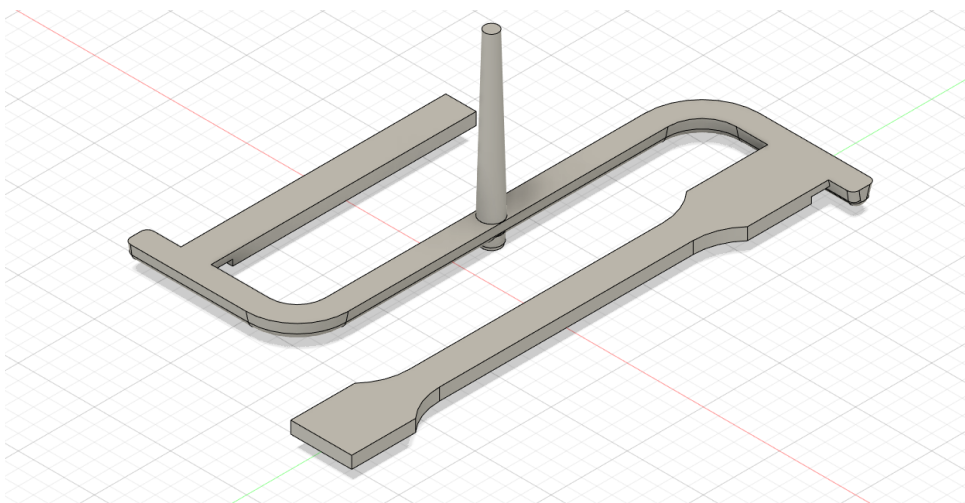
Každý materiál vyžaduje odlišnou teplotu a dobu sušení. Podle štítku na sušícím přístroji ARBURG Thermolit je pro ABS vhodné sušení při teplotě 80 °C po dobu 2 až 3 hodin. CPE podle technického listu od výrobce při teplotě 60 °C po dobu 3 až 4 hodin. Oba materiály byly sušeny současně, bylo tedy zvoleno sušení při teplotě 60 °C po dobu 3 hodin.

Sušení probíhalo v přístroji ARBURG Thermolit 100-2, což je sušička od stejného výrobce vstřikovacího stroje.

Pro vstřikované vzorky jsme využili vstřikovací stroj ARBURG Allrounder 470 E Golden electric. Arburg je německá společnost která patří k předním světovým výrobcům vstřikovacích strojů. Při vstřikování byla použita i temperace vstřikovací formy pomocí přístroje REGLOPLAS 150 smart.



Obr. 29: Temperační jednotka REGLOPLAS a sušička ARBURG Thermolit 100-2.



Obr. 30: Model zkušebních tělísek pro vstřikování.

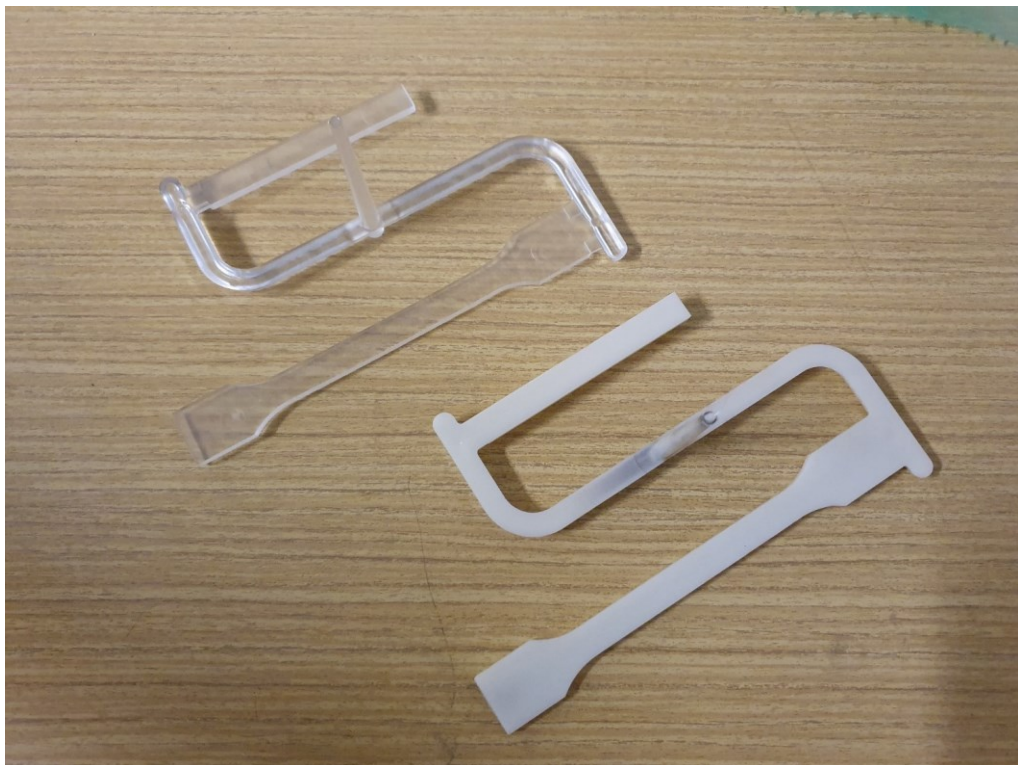
6.2.1 ABS

Temperace vstřikovací formy pro materiál ABS byla nastavena na 60 °C. Teplota taveniny na 250 °C. Doba chlazení tělesa ve formě byla nastavena na 30 sekund. Dráha dávkování

při vstřikování byla 40 mm při rychlosti 60 mm/s a tlaku 600 bar. Rychlost dotlaku byla nastavena na 95 mm/s při tlaku 500 bar po dobu 10 sekund.

6.2.2 CPE

Stejně jako při tisku, CPE vyžaduje i při vstřikování vyšší teploty. Technologické podmínky pro vstřik tohoto materiálu byly doladěny v závislosti na nastavení pro vstřik PETG a zároveň teploty pro tisk CPE. Teplota vstřikovací formy byla nastavena na 80 °C, teplota taveniny na 270 °C. Chlazení bylo nastaveno na dobu 30 sekund. Dráha dávkování byla 40 mm při rychlosti 60 mm/s a tlaku 700 bar. Rychlost dotlaku byla nastavena na 95 mm/s při tlaku 600 bar po dobu 10 sekund.



Obr. 31: Zhotovená zkušební tělesa metodou vstřikování.

Na Obr. 31 jsou vidět zkušební tělesa vyrobená metodou vstřikování. Bílé těleso je materiál ABS, průhledné CPE. Přestože vstřikování je cyklický proces a zhotovení těles trvá oproti 3D tisku zlomek času (v našem případě 40 sekund), vzorky, které vypadnou z formy stále nejsou finální. Z výrobku se musí odstranit vtokové a rozváděcí kanálky. Ty slouží k tomu, aby se dutina vstřikovací formy zaplnila rovnoměrně. Po vyhození tělíska z vstřikovací formy se tyto kanálky musí odstranit, což znamená vyšší odpad než u 3D tisku, kde prakticky žádný není.

7 STATISTICKÁ ANALÝZA

Pro statistické vyhodnocení, jak hodnot deformací při žíhání, tak hodnot z mechanických zkoušek, byly použity základní statistické veličiny jako je aritmetický průměr, medián, směrodatná odchylka a variační koeficient. Medián byl použit z důvodu přesnější průměrné hodnoty, protože měřené vzorky byly testovány po malých sériích pěti kusů a aritmetický průměr může výsledek značně ovlivnit odlehlými hodnotami. Z tohoto důvodu byly znázorněny v následujících grafech hodnoty aritmetického průměru i mediánu. Jak moc jsou hodnoty odlehlé od průměru určuje směrodatná odchylka. Směrodatná odchylka je v grafu znázorněna tenkou svislou přímkou jak u hodnot aritmetického průměru, tak i u hodnot mediánu.

7.1 Průměr

Aritmetický průměr je statistická veličina, která vyjadřuje typickou hodnotu souboru mnoha dat. Aritmetický průměr je součet všech hodnot vydělený jejich počtem. Pojem aritmetického průměru se často využívá chybně. Jediná hodnota, která se výrazně liší od ostatních, může ovlivnit hodnotu aritmetického průměru tak, že vyjadřuje iluzorní údaje. V obdobných případech je mnohem vhodnější použít pro vyjádření typické hodnoty medián. Další možností je současně s průměrem uvést i směrodatnou odchylku.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

7.2 Medián

Medián je hodnota, jež dělí řadu vzestupně seřazených výsledků na dvě stejně početné poloviny. Platí tedy, že 50 % hodnot souboru je menších nebo rovných a 50 % hodnot je větších nebo rovných mediánu. U mediánu hraje roli, jestli je počet prvků sudý nebo lichý. V případě, že je počet prvků lichý, hodnoty musíme seřadit od nejmenší po největší a medián bude hodnota přesně uprostřed. Pro sudý počet prvků bude medián aritmetickým průměrem dvou středních hodnot. Výhodou mediánu je, že není ovlivněn odlehlými hodnotami a dá se použít pro všechny hodnoty, které lze nějakým způsobem seřadit.

$$Me(X) = x_{(N+1)/2} \quad (2)$$

7.3 Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka určuje, jak moc jsou hodnoty rozptýleny či odchýleny od průměru hodnot. Je-li malá, jsou si prvky souboru většinou navzájem podobné, a naopak velká směrodatná odchylka signalizuje velké vzájemné odlišnosti. Směrodatná odchylka je rovna odmocnině z rozptylu.

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

7.4 Variační koeficient

Variační koeficient je charakteristikou variability rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny. Používá se v případě, když chceme posoudit relativní velikost rozptýlenosti dat vzhledem k průměru a někdy se uvádí v procentech. Je definován jako podíl směrodatné odchylky a aritmetického průměru.

$$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (4)$$

8 ANNEALING

K žihání byla použita elektrická pec Binder FD 53. Žihány byly pouze vzorky vytištěné vrstvou 0,1 mm, jelikož se tato výška vrstev používá nejvíce kvůli hladšímu povrchu vyráběného dílu. Při této výšce vrstvy se materiál na sebe vrství hustěji než při vyšších výškách vrstev, ve výrobku je méně vzduchových bublin a deformace při žihání jsou nejnižší. Všechny zkušební vzorky byly žihány po dobu 30 minut při různých teplotách.



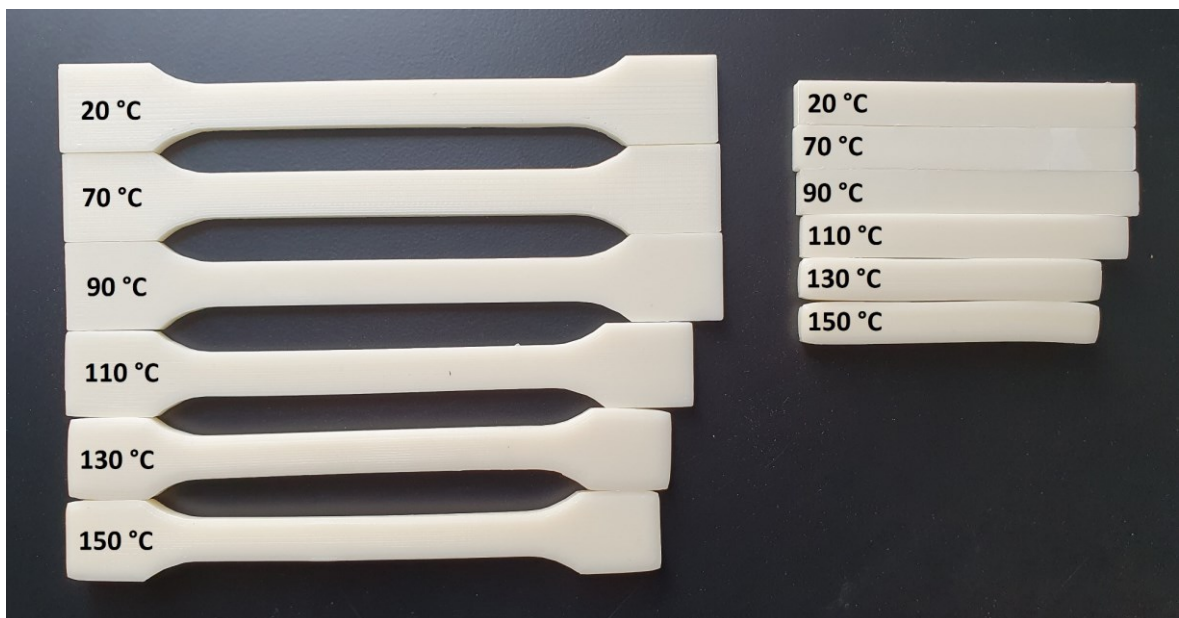
Obr. 32: Elektrická pec Binder FD 53.

Binder FD 53 je základní model sušáren s nucenou cirkulací vzduchu v komoře. Mikroprocesorový regulátor umožňuje teplotu od + 5 °C nad teplotou okolí do + 300 °C s definovanou rychlostí náběhu teploty, má také integrovaný časovač pro vypínání v intervalu od 0 do 99.59 hodin nebo trvalý provoz. Start ohřevu (i času) je manuální, programovat lze ovšem rychlost nárůstu teploty (např. 5 °C/min) a čas vypnutí. Přístroj má zabudovaný ventilátor k intenzivnímu oběhu vzduchu v komoře, díky kterému se výrazně zkracuje doba náběhu na požadovanou teplotu. Ventilátor nelze vypnout, komora má v zadní části odvětrávací trubici o průměru 50 mm.

8.1 ABS

U materiálu ABS byla jako první věc zjištěna teplota skelného přechodu (T_g) a následně zvoleny teploty pro žihání s rozdílem $20\text{ }^\circ\text{C}$ nad teplotou skelného přechodu i pod ní. Teplota skelného přechodu byla zjištěna z technických listů od výrobce, kde výrobce udává $105\text{ }^\circ\text{C}$. Teplota byla námi zaokrouhlena na $110\text{ }^\circ\text{C}$ z časových důvodů společného žihání zároveň s materiálem CPE. Proto byly zvoleny teploty žihání $70\text{ }^\circ\text{C}$, $90\text{ }^\circ\text{C}$, $110\text{ }^\circ\text{C}$, $130\text{ }^\circ\text{C}$ a $150\text{ }^\circ\text{C}$.

Následující obrázek zobrazuje rozměrové změny těles, způsobené právě rozdílnými teplotami žihání. Horní těleso ($20\text{ }^\circ\text{C}$) není žiháno a slouží pouze k lepší vizualizaci deformací, které právě při žihání vznikly.



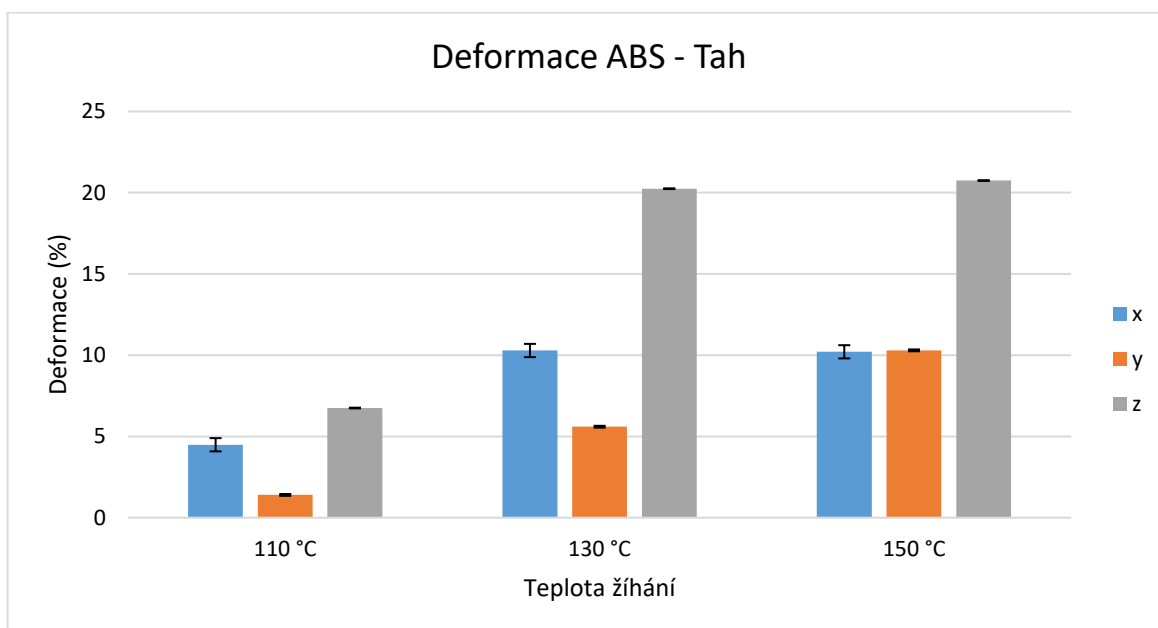
Obr. 33: Horní těleso nežihané, zbytek žiháný (ABS).

Materiál se do T_g nijak výrazně nedeformuje. Značné deformace se začínají objevovat až po T_g s tím, že teplota $150\text{ }^\circ\text{C}$ způsobila značné zkroucení tělesa a materiál se začal roztékat.

Všechna žihaná tělesa byla změřena digitální posuvkou, data převedena na procenta a vložena do grafu. Souřadnicový systém značí délku tělesa (x), šířku tělesa (y) a výšku tělesa (z). Z dat uvedených v grafech pro tělesa tahové zkoušky (graf 1) i Charpyho kladiva (graf 2) je zřetelně vidět, že největší deformace vznikaly v ose Z , jelikož jde o charakteristický rozměr. Tělesa v této ose nabývala na výšce až o 23 %. Díky tomu, že vzorek musí mít po žihání stejný objem, v osách X a Y se materiál smršťoval.

Tab. 3: Deformace ABS – Tah.

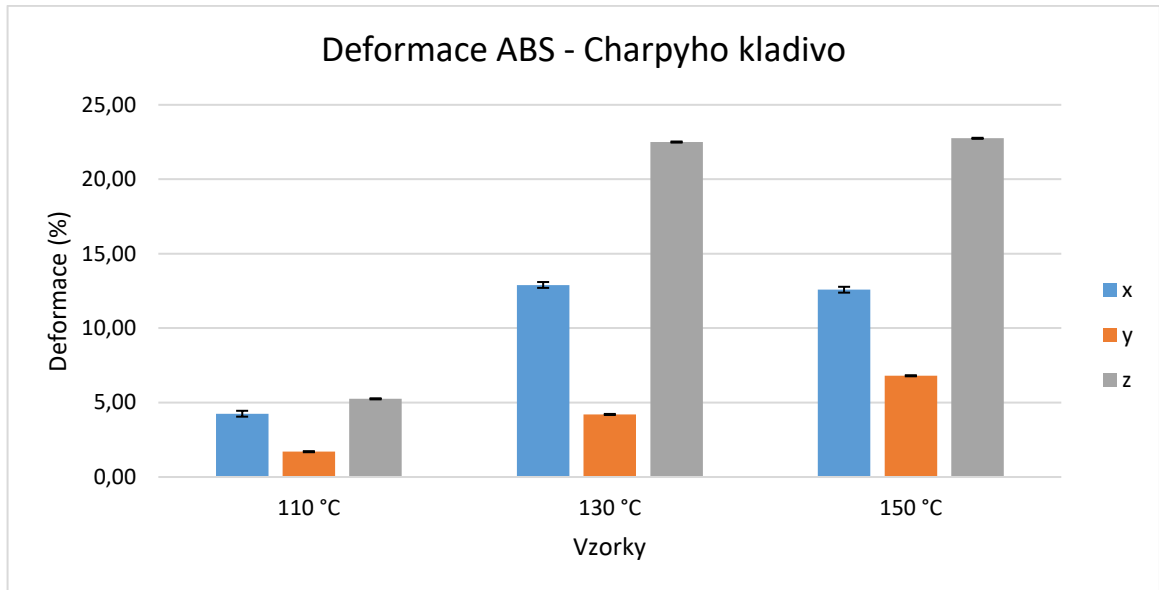
ABS	110 °C			130 °C			150 °C		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
n = 5									
\bar{x} [mm]	143,27	9,86	4,27	134,57	9,44	4,81	134,69	8,97	4,83
\tilde{x} [mm]	143,22	9,86	4,28	134,15	9,40	4,80	134,45	9,00	4,84
S_x [mm]	0,23	0,04	0,06	1,64	0,20	0,02	0,58	0,10	0,06
v_x [%]	0,16	0,42	1,30	1,22	2,11	0,46	0,43	1,09	1,17
Δ [%]	- 4,49	- 1,40	+ 6,75	- 10,29	- 5,60	+ 20,25	- 10,21	- 10,30	+ 20,75



Graf 1: Deformace vzorků ABS – tah v %.

Tab. 4: Deformace ABS – Charpy.

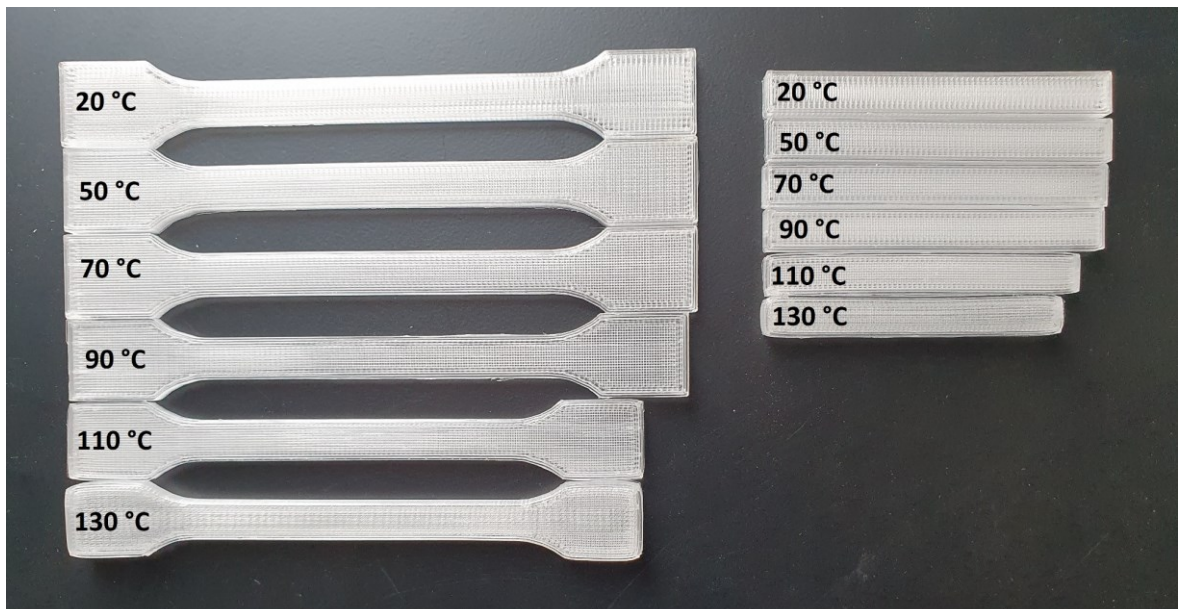
ABS	110 °C			130 °C			150 °C		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
n = 5									
\bar{x} [mm]	76,60	9,83	4,21	69,68	9,58	4,90	69,94	9,32	4,91
\tilde{x} [mm]	76,60	9,80	4,20	69,80	9,60	4,90	70	9,30	4,90
S_x [mm]	0,21	0,04	0,02	0,52	0,08	0,10	0,45	0,08	0,09
v_x [%]	0,28	0,45	0,53	0,74	0,87	2,04	0,64	0,90	1,82
Δ [%]	- 4,25	- 1,70	+ 5,25	- 12,90	- 4,20	+ 22,50	-12,58	- 6,80	+ 22,75



Graf 2: Deformace vzorků ABS – Charpyho kladivo.

8.2 CPE

U žíhání materiálu CPE byl použit stejný postup jako u ABS, lišily se pouze teploty žíhání. Výrobce uvádí teplotu skelného přechodu 90 °C. Teploty byly zvoleny následovně: 50 °C, 70 °C, 90 °C, 110 °C a 130 °C. Následující obrázek znázorňuje, stejně jako u ABS, horní těleso nežíhané a zbytek těles žíhaných.



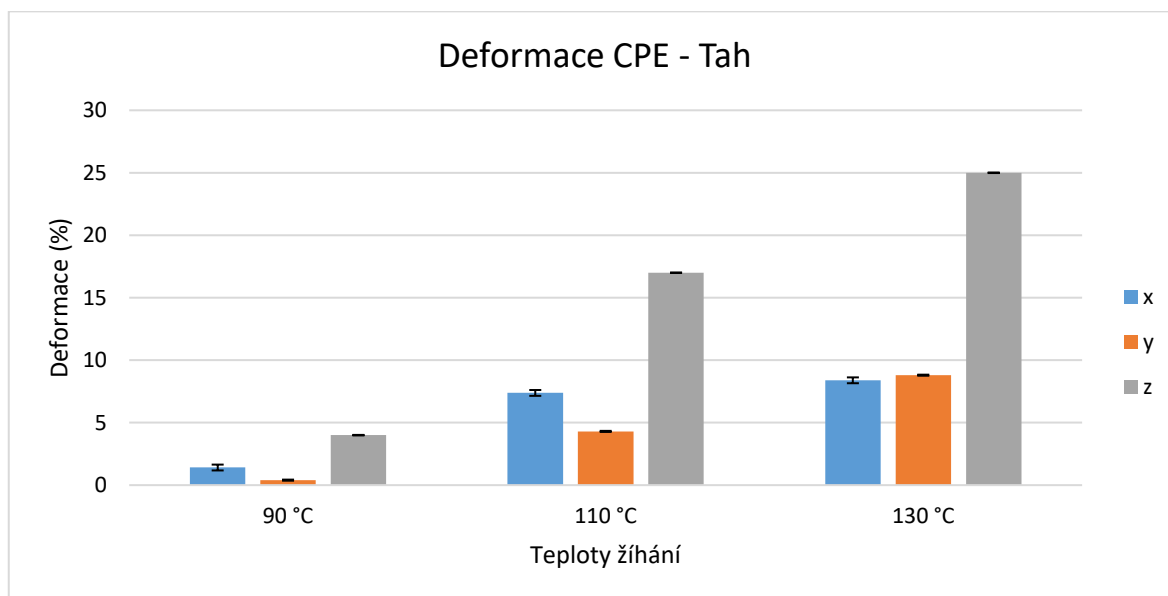
Obr. 34: Horní těleso nežíhané, zbytek žíhaný (CPE).

Můžeme si všimnout, že při žíhání na teplotu T_g (90 °C) u CPE nevznikají tak velké deformace jako u ABS (105 °C). Nicméně materiál se začínal tavit a výrazně měnil svůj tvar

už při teplotě 130 °C. Největší změny byly vidět na výšce tělesa, která se zvětšila a při teplotě 130 °C dosáhla deformace až 25 %.

Tab. 5: Deformace CPE – Tah.

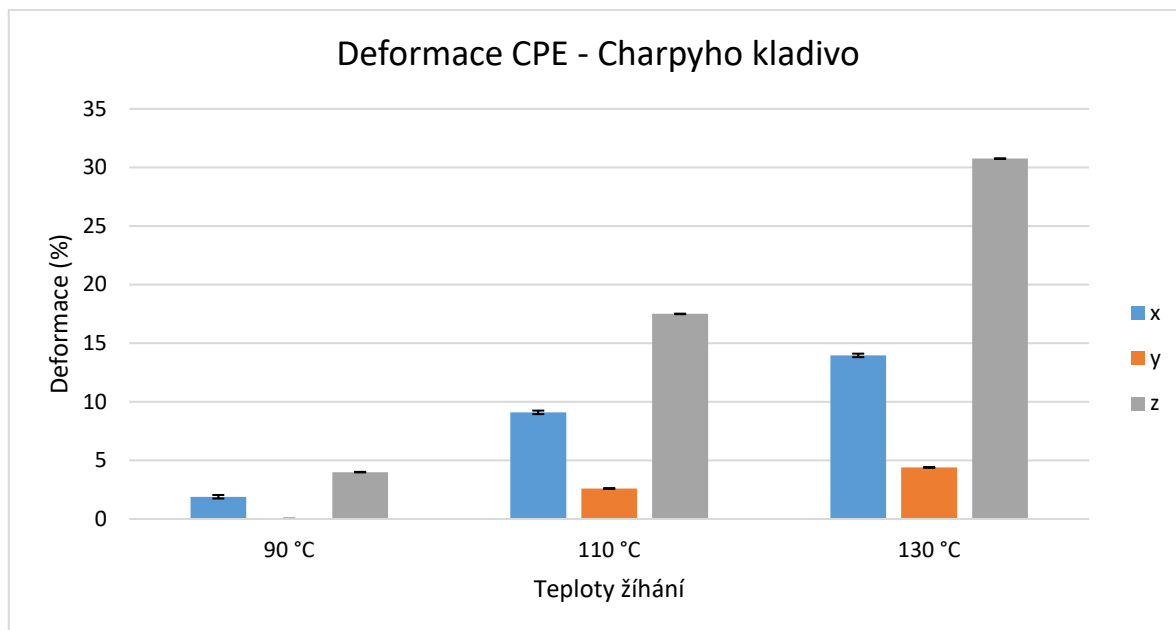
CPE	90 °C			110 °C			130 °C		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
n = 5									
\bar{x} [mm]	147,89	9,96	4,16	138,93	9,57	4,68	137,41	9,12	5,00
\tilde{x} [mm]	147,88	10,00	4,20	138,70	9,53	4,70	137,32	9,10	5,00
S_x [mm]	0,07	0,05	0,05	0,71	0,09	0,04	0,62	0,11	0,03
v_x [%]	0,05	0,55	1,32	0,51	0,89	0,93	0,45	1,25	0,58
Δ [%]	- 1,41	- 0,40	+ 4,00	- 7,38	- 4,30	+ 17,00	- 8,39	- 8,80	+ 25,00



Graf 3: Deformace vzorků CPE - tah v %.

Tab. 6: Deformace CPE – Charpy.

CPE	90 °C			110 °C			130 °C		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
n = 5									
\bar{x} [mm]	78,48	10,00	4,16	72,72	9,74	4,70	68,83	9,56	5,23
\tilde{x} [mm]	78,50	10,00	4,20	72,70	9,70	4,70	68,98	9,60	5,25
S_x [mm]	0,15	0,00	0,05	0,10	0,05	0,00	0,64	0,11	0,08
v_x [%]	0,19	0,00	1,32	0,14	0,56	0,00	0,93	1,13	1,60
Δ [%]	- 1,90	0,00	+ 4,00	- 9,10	- 2,60	+ 17,50	- 13,96	- 4,40	+ 30,75



Graf 4: Deformace vzorků CPE – Charpyho kladivo v %.

9 VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY

Tahová zkouška testovacích vzorků byla prováděna na přístroji ZwickRoell 1456 v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1 s rychlostí posunu čelistí 50 mm/min. Tahové zkoušky byly zaměřeny převážně na Youngův modul pružnosti, sílu potřebnou k přetržení a mez pevnosti. Získané hodnoty byly porovnány s hodnotami od výrobce. Výsledky pro jednotlivé materiály jsou rozebrány níže v podobě tabulek a grafů.



Obr. 35: Tahová zkouška.

Podstata tahové zkoušky spočívá v protahování zkušebního tělesa ve směru své hlavní podélné osy konstantní zkušební rychlostí do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí (zatížení) nebo deformace (prodloužení) dosáhnou předem zvolené hodnoty. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení.

Podle normy ISO 527 se musí pro každý z požadovaných směrů zkoušení zkoušet minimálně pět zkušebních těles. Počet měření smí být větší než pět, jestliže je požadovaná větší preciznost střední hodnoty.

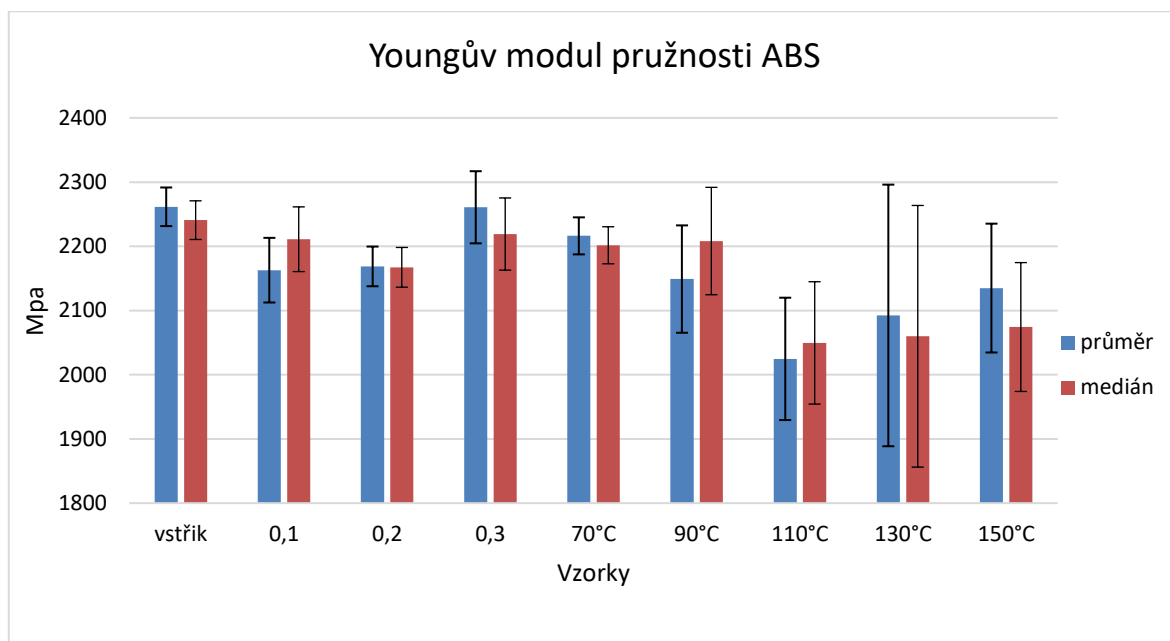
9.1 ABS

Z hodnot tahové zkoušky materiálu ABS je zřetelně vidět, že žíhání zkušebních těles má vliv na mechanické vlastnosti v řádu procent. Jediné hodnoty, které se blíží hodnotám

vstřikovaného tělesa jsou hodnoty ze žíhání vzorku při teplotě 150 °C. Avšak těleso se při této teplotě téměř taví a výrazně mění svůj tvar.

Tab. 7: Hodnota Youngova modulu pružnosti ABS.

n = 5	vstřik	0,1	0,2	0,3	70°C	90°C	110°C	130°C	150°C
\bar{x} [MPa]	2261,54	2162,82	2168,72	2260,80	2216,26	2148,98	2024,68	2092,36	2134,96
\tilde{x} [MPa]	2240,70	2211,00	2167,30	2219,10	2201,60	2208,20	2049,60	2059,90	2074,30
S_x [MPa]	60,18	100,72	61,85	112,32	57,68	167,23	190,52	407,44	200,67
v_x [%]	2,66	4,66	2,85	4,97	2,60	7,78	9,41	19,47	9,40

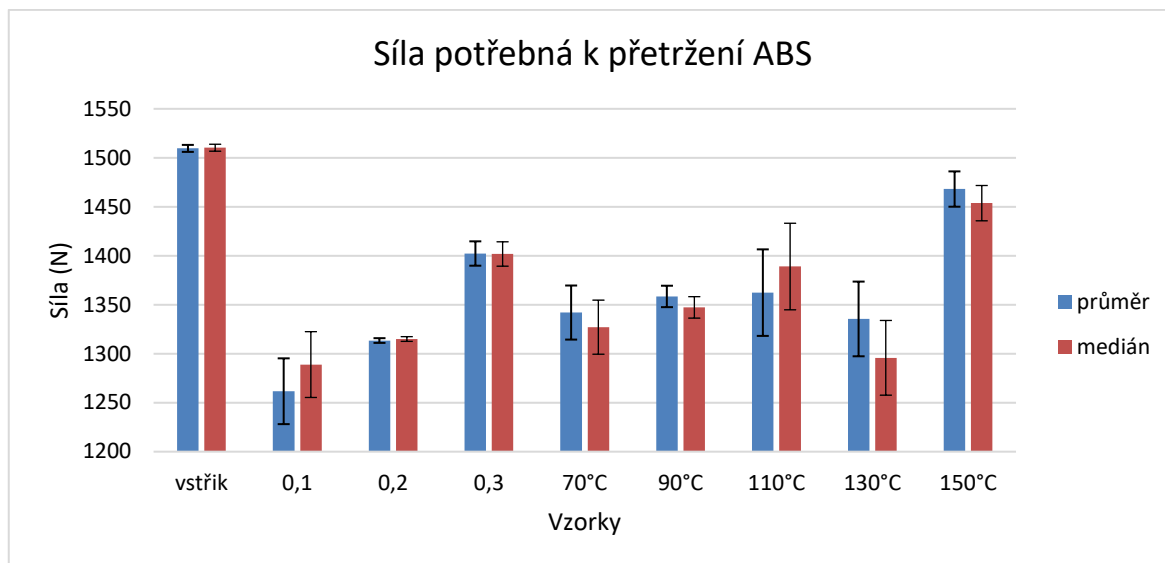


Graf 5: Youngův modul pružnosti vzorků ABS.

Tištěné těleso s výškou vrstev 0,1 mm má v námi naměřených datech nejhorší výsledky vůbec. Síla potřebná k přetržení pro vstřikované vzorky se pohybuje okolo 1500 N, této hodnotě se přibližuje pouze těleso žíhané teplotou 150 °C. Síla potřebná k přetržení vzorků tištěných vrstvou 0,3 mm, je v průměru 1400 N.

Tab. 8: Síla potřebná k přetržení ABS.

n = 5	vstřik	0,1	0,2	0,3	70°C	90°C	110°C	130°C	150°C
\bar{x} [N]	1509,60	1261,68	1313,44	1402,28	1342,02	1358,46	1362,34	1335,48	1468,10
\tilde{x} [N]	1510,30	1288,90	1315,00	1401,80	1327,10	1347,30	1389,00	1295,80	1453,70
S_x [N]	7,13	67,18	4,81	24,85	55,22	21,88	88,37	76,26	36,05
v_x [%]	0,47	5,32	0,37	1,77	4,11	1,61	6,49	5,71	2,46

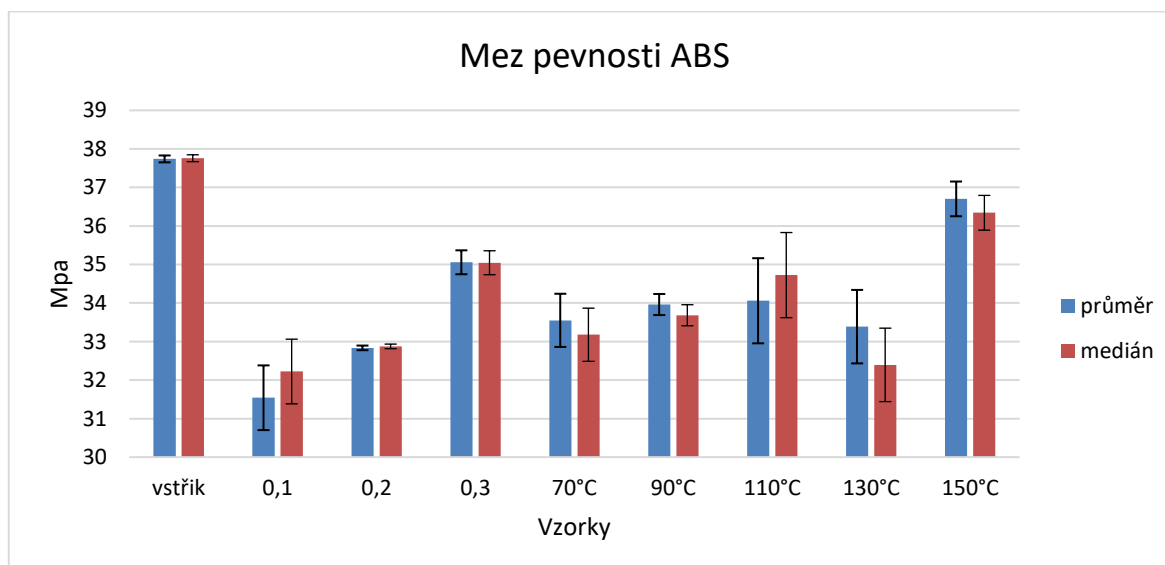


Graf 6: Síla potřebná k přetržení vzorků ABS.

Mez pevnosti vstřikovaných vzorků ABS se pohybuje okolo 38 MPa. Nejbližše této hodnotě se přiblížilo tištěné žíhané těleso 0,1 mm při teplotě 150 °C. Následuje nežíhané těleso s výškou vrstev 0,3 mm s průměrnou hodnotou 35 MPa. Těleso s nejnižšími hodnotami bylo nežíhané tištěné těleso s výškou vrstev 0,1 mm (31,5 MPa).

Tab. 9: Mez pevnosti vzorků ABS.

n = 5	vstřik	0,1	0,2	0,3	70°C	90°C	110°C	130°C	150°C
\bar{x} [MPa]	37,74	31,54	32,84	35,06	33,55	33,96	34,06	33,39	36,70
\tilde{x} [MPa]	37,76	32,22	32,88	35,05	33,18	33,68	34,73	32,40	36,34
S_x [MPa]	0,18	1,68	0,12	0,62	1,38	0,55	2,21	1,91	0,90
v_x [%]	0,47	5,32	0,37	1,77	4,11	1,61	6,49	5,71	2,46



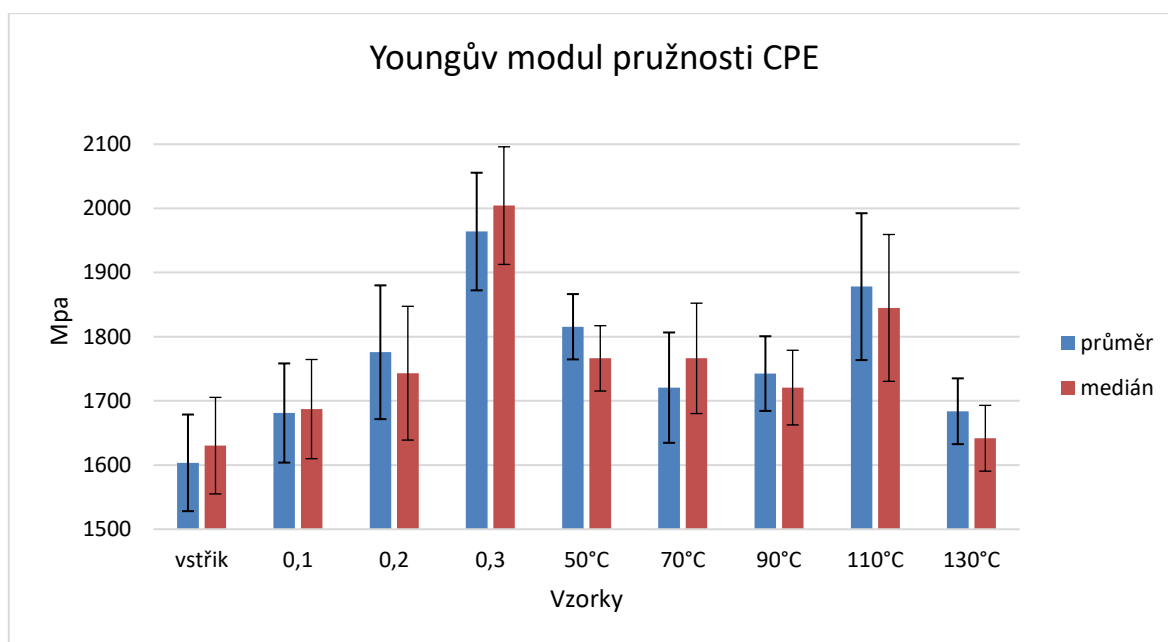
Graf 7: Mez pevnosti vzorků ABS.

9.2 CPE

Materiál CPE se při mechanických zkouškách chová neočekávaně. Ve všech následujících grafech dominuje nežíhané tištěné těleso s výškou vrstev 0,3 mm. Tištěné těleso s výškou vrstev 0,1 mm dosahuje nejmenších hodnot u síly potřebné k přetržení, ale i u pevnosti v tahu.

Tab. 10: Hodnoty Youngova modulu materiálu CPE

n = 5	vstřík	0,1	0,2	0,3	50°C	70°C	90°C	110°C	130°C
\bar{x} [MPa]	1603,44	1681,12	1775,80	1963,90	1815,54	1720,62	1742,56	1878,04	1683,86
\tilde{x} [MPa]	1630,20	1687,20	1743,20	2004,30	1766,30	1766,30	1720,70	1844,90	1641,80
S_x [MPa]	150,57	154,57	208,42	183,31	101,76	172,02	116,40	228,81	102,52
v_x [%]	9,39	9,19	11,74	9,33	5,60	10,00	6,68	12,18	6,09

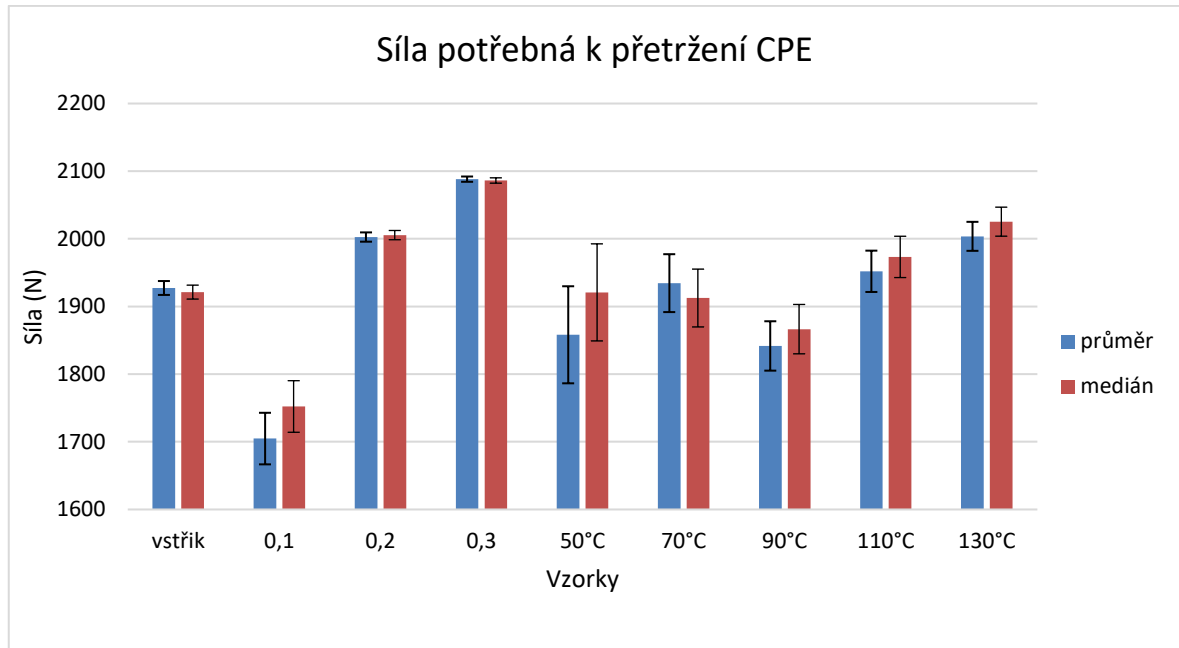


Graf 8: Youngův modul pružnosti vzorků CPE.

U síly potřebné k přetržení dosahují žíhaná tělesa v průměru hodnotu 1918 N. Nežíhané těleso s vrstvou 0,1 mm průměrné hodnoty 1704 N. Nejvyšších hodnot dosahuje těleso nežíhané s výškou vrstev 0,3 mm a to 2088 N.

Tab. 11: Síla potřebná k přetržení vzorků CPE.

n = 5	vstřík	0,1	0,2	0,3	50°C	70°C	90°C	110°C	130°C
\bar{x} [N]	1927,34	1704,78	2002,64	2088,20	1858,16	1934,50	1841,68	1952,00	2003,68
\tilde{x} [N]	1921,30	1752,20	2005,50	2086,20	1920,80	1912,50	1866,50	1973,30	2025,40
S_x [N]	20,57	76,23	13,69	7,83	143,45	85,56	72,99	61,08	42,90
v_x [%]	1,07	4,47	0,68	0,37	7,72	4,42	3,96	3,13	2,14

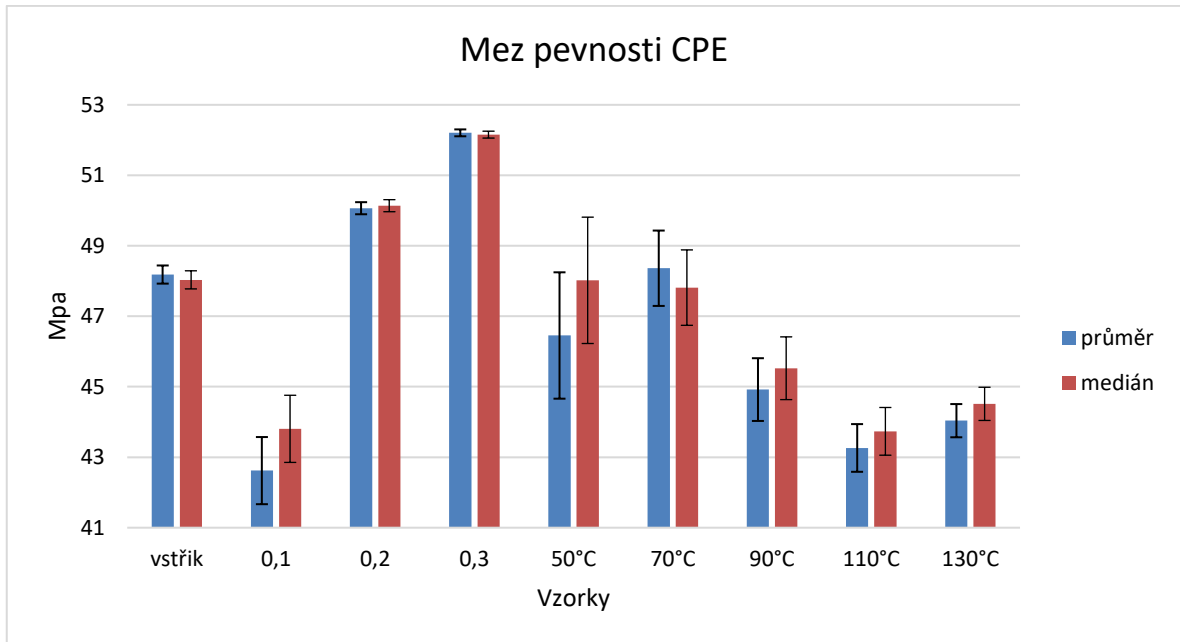


Graf 9: Síla potřebná k přetržení vzorků CPE.

Výška vrstev 0,3 mm dosahuje mez pevnosti 52 MPa, následuje výška vrstvy 0,2 mm s hodnotou 50 MPa. Vstříkované těleso, které by mělo mít mez pevnosti nejvyšší, dosahuje hodnot pouze 48 MPa. Nejnižších hodnot dosahuje opět výška vrstev 0,1 mm s hodnotami 42,6 MPa. Žíhaná tělesa mají mez pevnosti v průměru 45,4 MPa, z toho nejlepších výsledků dosahuje žíhání při teplotě 70 °C s hodnotou 48,4 MPa a zároveň si těleso udržuje při této teplotě svůj rozměr. Žíhání nad teplotu skelného přechodu u materiálu CPE nemá na mez pevnosti téměř žádný vliv.

Tab. 12: Mez pevnosti vzorků CPE.

n = 5	vstřík	0,1	0,2	0,3	50°C	70°C	90°C	110°C	130°C
\bar{x} [MPa]	48,18	42,62	50,07	52,21	46,45	48,36	44,92	43,26	44,04
\tilde{x} [MPa]	48,03	43,81	50,14	52,16	48,02	47,81	45,52	43,73	44,51
S_x [MPa]	0,51	1,91	0,34	0,20	3,59	2,14	1,78	1,35	0,94
v_x [%]	1,07	4,47	0,68	0,37	7,72	4,42	3,96	3,13	2,14



Graf 10: Mez pevnosti vzorků CPE.



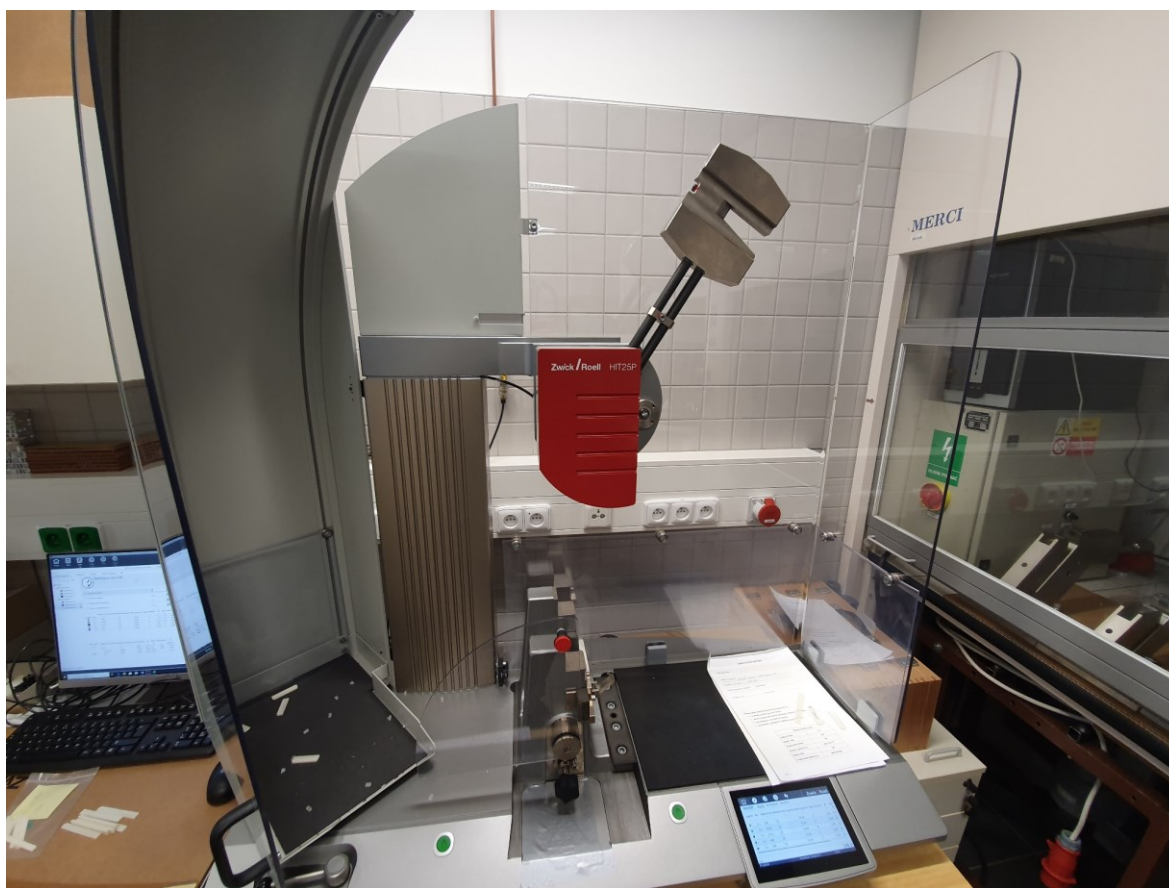
Obr 36: Zkušební tělesa podrobená tahové zkoušce.

Tělesa na Obr 36 jsou výsledkem tahové zkoušky. Obě tělesa na obrázku jsou vyrobena metodou vstřikování. Vrchní průhledné těleso je materiál CPE, které dosahuje značné elongace. Bílé těleso ve spodní části obrázku je ABS. Výrobce udává pro ABS mez pevnosti 33 MPa podle normy ISO 527. Námí naměřená data se s touto hodnotou shodují. Pro CPE udává výrobce mez pevnosti 48 MPa. Námí naměřená data se pohybují v rozmezí od 42–52 MPa. Nejblíže hodnotám, které uvádí výrobce, se blíží vstřikovaný vzorek, následuje vzorek žíhaný teplotou 70 °C.

10 VÝSLEDKY VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI

Vrubová houževnatost, nebo-li zkouška pomocí Charpyho kladiva, byla provedena na přístroji ZwickRoell HIT25P v souladu s normou ČSN EN ISO 179-1. Zkušební těleso umístěné vodorovně na podpěrách je přeraženo úderem rázového kladiva, přičemž směr rázu je veden středem vzdálenosti mezi podpěrami; zkušební těleso je ohýbáno vysokou, nominálně konstantní rychlostí. V našem případě zkouška probíhala rázem na užší stranu za použití zkušebního tělesa opatřeného vrubem ISO 179-1/1eA. Směr rázu je veden na opačnou stranu, než na které je umístěn vrub.

Zkouškou vrubové houževnatosti zjišťujeme množství energie, které tělese absorbuje při vzniku lomu. Výsledky pro jednotlivé materiály jsou rozebrány níže.



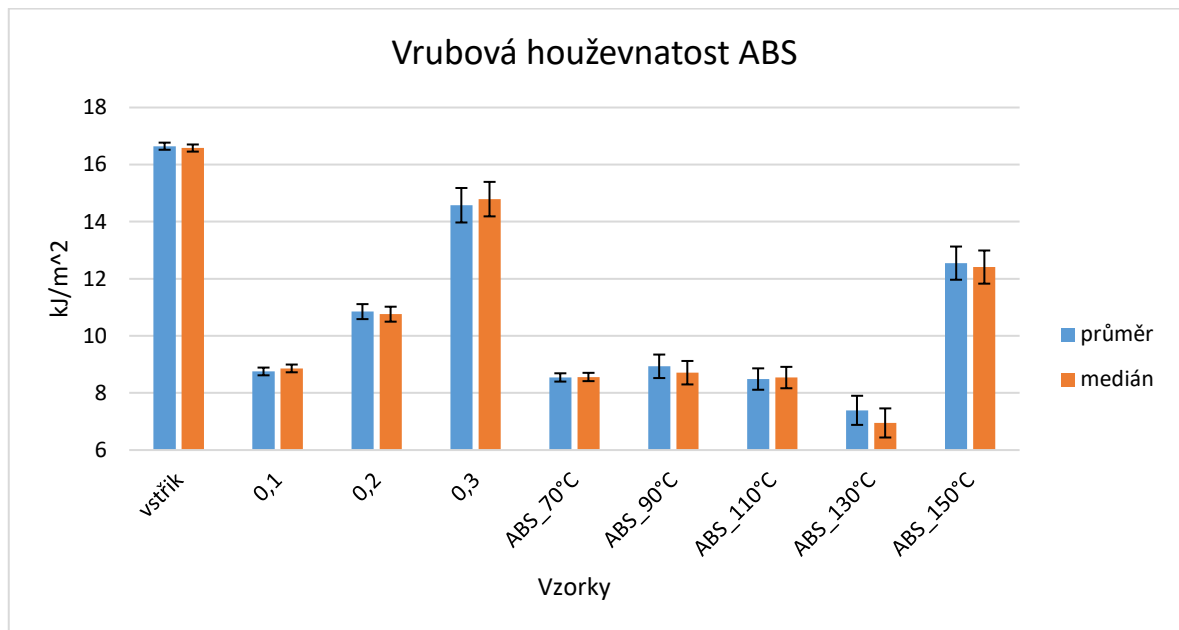
Obr. 37: Přístroj ZwickRoell HIT25P.

10.1 ABS

Vstříkované ABS dosahuje nejvyšších hodnot a to $16,6 \text{ kJ/m}^2$. Následuje tištěná vrstva výšky $0,3 \text{ mm}$ s hodnotami $14,6 \text{ kJ/m}^2$. Nejhorší výsledky má opět tištěný vzorek s výškou vrstev $0,1 \text{ mm}$ s výsledkem necelých 9 kJ/m^2 .

Tab. 13: Hodnoty vrubové houževnatosti ABS.

n = 5	vstřík	0,1	0,2	0,3	70°C	90°C	110°C	130°C	150°C
\bar{x} [kJ/m ²]	16,64	8,75	10,85	14,58	8,54	8,93	8,49	7,39	12,55
\tilde{x} [kJ/m ²]	16,58	8,86	10,76	14,79	8,56	8,71	8,54	6,95	12,41
S_x [kJ/m ²]	0,25	0,27	0,52	1,21	0,29	0,82	0,75	1,02	1,16
v_x [%]	1,50	3,10	4,83	8,29	3,40	9,21	8,83	13,80	9,26



Graf 11: Vrubová houževnatost ABS.

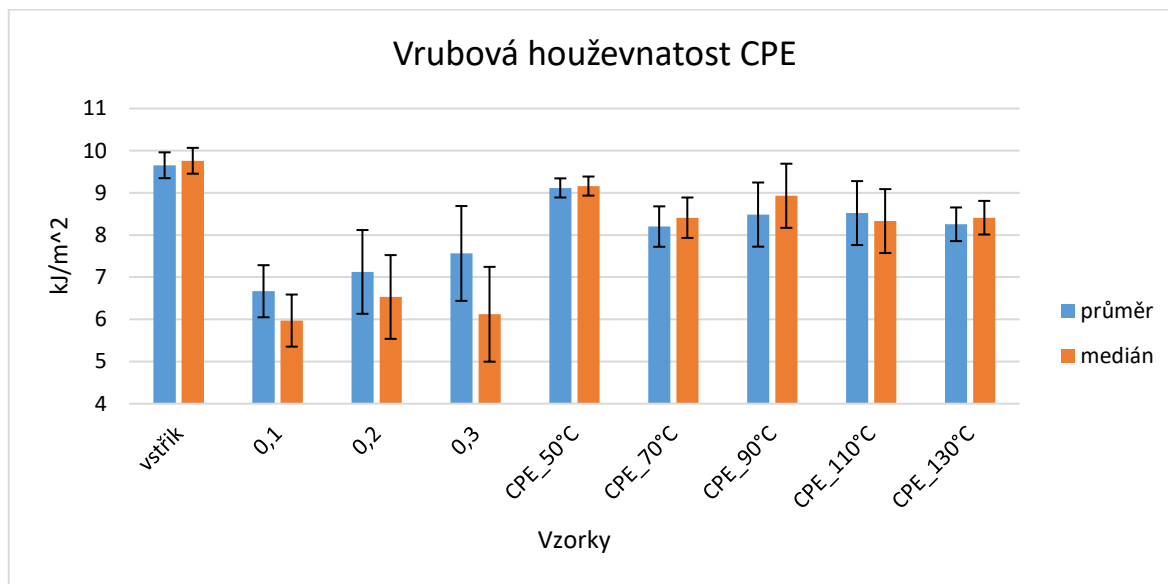
Výsledky žíhaných těles jsou do teploty 130 °C podobné a to okolo 8,5 kJ/m². Dosažení teploty skelného přechodu (105 °C) nemá na mechanické vlastnosti u ABS žádný vliv. Výsledky se začínají lišit až od teploty 130 °C, kdy vychází pouze 7,4 kJ/m². Nejvyšší naměřené hodnoty jsou u vzorku žíhaného na 150 °C a to v průměru 12,6 kJ/m². I když jsou hodnoty u tohoto žíhaného tělesa nejvyšší, stále lépe obstálo těleso tištěné s výškou vrstvy 0,3 mm (14,6 kJ/m²).

10.2 CPE

Vstříkovaný materiál CPE má z námi naměřených dat pro rázovou houževnatost nejlepší výsledky, a to 9,7 kJ/m². Výška tištěných vrstev nemá velký vliv na mechanické vlastnosti tělesa narozdíl od materiálu ABS, a výsledky se pohybují v rozmezí 6,7 až 7,6 kJ/m². Konkrétně výška vrstvy 0,1 mm má průměrnou hodnotu 6,7 kJ/m², výška vrstvy 0,2 mm 7,1 kJ/m² a nejlepší výsledek po vstříkování má opět výška vrstvy 0,3 mm s průměrnou hodnotou 7,6 kJ/m².

Tab. 14: Hodnoty vrubové houževnatosti CPE.

n = 5	vstřík	0,1	0,2	0,3	50°C	70°C	90°C	110°C	130°C
\bar{x} [kJ/m ²]	9,65	6,67	7,12	7,56	9,12	8,20	8,48	8,52	8,25
\tilde{x} [kJ/m ²]	9,76	5,97	6,53	6,12	9,16	8,41	8,93	8,33	8,41
S_x [kJ/m ²]	0,61	1,24	1,99	2,25	0,45	0,96	1,52	1,52	0,80
v_x [%]	6,35	18,55	27,89	29,74	4,97	11,68	17,93	17,79	9,67



Graf 12: Vrubová houževnatost CPE.

Z Graf 12 je vidět, že žíhaný materiál CPE se chová odlišně než žíhané ABS. Hodnoty jsou vcelku ustálené v rozmezí 8 až 9 kJ/m². Oproti nežíhanému CPE jsou tedy hodnoty průměrně o 25% vyšší. Nejlepších hodnot dosahuje CPE žíhané na 50 °C a to 9,1 kJ/m², což je 37 % nárůst oproti nežíhaným vzorkům při nulové deformaci vzorku.

11 DISKUSE VÝSLEDKŮ

U tahových zkoušek materiálu ABS má nejlepší mechanické vlastnosti těleso vyráběné technologií vstřikováním. U tištěných vzorků je zřejmé, že výška vrstev ovlivňuje mechanické vlastnosti dílu. Žíhání těles zkoušených tahovou zkouškou zlepšuje mechanické vlastnosti o jednotky procent.

U vstřikovaného materiálu ABS je síla potřebná k přetržení 1500 N a oproti tištěné vrstvě výšky 0,3 mm, která dosahuje jako druhá nejvyšších hodnot, má o 6,7 % lepší výsledek. Vrstva tištěná výškou 0,1 mm dosahuje nejmenších hodnot síly potřebné k přetržení a to o 16 % oproti vstřikovanému dílu. Žíhané vzorky do teploty 130 °C představují v průměru o 7 % nárůst síly potřebné k přetržení oproti vzorkům nežíhaným. Největších hodnot dosahuje vzorek žíhaný teplotou 150 °C a to sice o 16,4 % vyšších, než těleso nežíhané. Mez pevnosti je nejvyšší u vstřikovaného vzorku s hodnotou 37,7 MPa, což je o 7,1 % více než těleso tištěné s výškou vrstev 0,3 mm. Nejnižších hodnot dosahuje opět tištěný vzorek s výškou vrstev 0,1 mm a to o 16,5 % nižších než vzorek vstřikovaný. Vzorky žíhané mají v průměru o 8,9 % větší mez pevnosti než vzorky nežíhané. Vrubová houževnatost u materiálu ABS je nejvyšší u vstřikovaného vzorku (16,6 kJ/m²). Této hodnotě se opět přibližuje těleso tištěné vrstvou 0,3 mm s rozdílem 12 %. Největší rozdíl je u výšky vrstev 0,1 mm a to o 47,3 % méně oproti vstřikovanému vzorku. Žíhání nepředstavuje žádné zlepšení mechanických vlastností pro vrubovou houževnatost, pouze teplota 150 °C představuje nárůst o 44 % oproti vzorkům nežíhaným.

Výsledky pro materiál CPE naznačují, že nejlepší mechanické vlastnosti mají tištěné vzorky s výškou vrstev 0,3 mm, u síly potřebné k přetržení dokonce o 7,7 % více než u vzorků vstřikovaných, proto by se tento materiál měl studovat dále a podrobněji. Nejhůře dopadla výška vrstvy 0,1 mm, která se od vstřikovaného dílu liší o 11,6 % a od vrstvy 0,3 mm o 22,5 %. Žíhané vzorky mají v průměru o 12,6 % lepší výsledky co se týče síly potřebné k přetržení než, vzorky nežíhané s výjimkou teploty žíhání na 130 °C, která má hodnoty vyšší o 17,6 %. Mez pevnosti je nejvyšší opět u tištěného tělesa s výškou vrstev 0,3 mm, rozdíl od vstřikovaného vzorku činí 7,7 %. Nejmenší mez pevnosti má tištěné těleso s výškou vrstvy 0,1 mm, které se od vstřikovaného vzorku liší o 13 % a od výšky vrstvy 0,3 mm o 22,5 %. Nejvyšší mez pevnosti u žíhaných vzorků představuje teplota 70 °C, která je o 12,2 % vyšší než u těles nežíhaných. U vrubové houževnatosti dosahuje nejvyšších hodnot těleso vstřikované, následuje tištěné s výškou vrstvy 0,3 mm s rozdílem 21,6 %. Oproti ABS, kde vrubová houževnatost společně s výškou vrstvy roste zhruba o 30 %, u CPE roste

vrubová houževnatost zhruba jen o 7 %. Nejmenších hodnot dosahuje tištěná vrstva s výškou 0,1 mm a od vstříkovaného tělesa se liší o 31 %. Žíhané vzorky pro vrubovou houževnatost mají vcelku konstantní hodnoty, nejvyšší a nejnižší hodnota se liší pouze o 9,9 %. Nejvyšších průměrných hodnot dosahuje žíhaný vzorek 50 °C a oproti nežíhanému tělesu se liší o 37 %.

Žíháním tedy lze materiálu ABS zlepšit mechanické vlastnosti, řádově ale pouze o pár procent. Z naměřených dat se jeví žíhání teplotou 90 °C po dobu 30 minut jako nejvýhodnější, zároveň si těleso zachová své rozměry. Žíhání pro materiál CPE má větší smysl, mechanické vlastnosti můžeme výrazně ovlivnit a přitom zachovat stejný tvar dílu žíháním teplotou 70 °C po dobu 30 minut.

ZÁVĚR

Bakalářská práce slouží k porovnání mechanických vlastností dvou různých materiálů (ABS a CPE) od stejné firmy v závislosti na technologii výroby. Úvod do problematiky je popsán v teoretické části bakalářské práce zároveň s technologiemi, kterými byly testovací vzorky tvořeny – 3D tisk a vstřikování polymeru. Zároveň je zde popsáno, jak mechanické vlastnosti 3D tisku mohou být zlepšeny pomocí postprocessingu.

V praktické části bakalářské práce je zaznamenáno, jakým způsobem a kolik vzorků bude vyrobeno a následně celý postup výroby testovacích vzorků pro obě technologie. Zkoumány byly také vlivy annealingu (žihání) na mechanické vlastnosti vzorků.

Testování těchto vzorků bylo prováděno pomocí tahové zkoušky a zkoušky Charpyho kladivem. Výsledky byly statisticky analyzovány a převedeny do grafů. Studovanými veličinami u tahové zkoušky byl Youngův modul pružnosti, síla potřebná k přetržení vzorků a mez pevnosti. U zkoušky Charpyho kladivem vrubová houževnatost.

Z naměřených dat lze určit, že výška vrstev u obou materiálů má zásadní vliv na mechanické vlastnosti dílu. Nejvyšších hodnot u tahové zkoušky a vrubové houževnatosti u tištěných vzorků obou materiálů dosahuje výška vrstev 0,3 mm, naopak nejnižších hodnot výška vrstev 0,1 mm.

Z deformací vzorků materiálu ABS je zřejmé, že materiál zachovává rozměrovou přesnost do teploty 90 °C, u vyšších teplot se projevují značné deformace. Žiháním tohoto materiálu lze zlepšit mechanické vlastnosti dílu, ale rozdíl není nijak razantní, jak pro tahové zkoušky, tak pro vrubovou houževnatost.

Materiál CPE si své rozměry zachovává do teploty 70 °C. Žihání touto teplotou lze výrazně zlepšit mechanické vlastnosti dílu a dává větší smysl než pro materiál ABS. U hodnot materiálu CPE je však nutné dodat, že výsledky nejsou tak jednoznačné jako u ABS a je nutné ho studovat dále.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GIBSON, I. *ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES*. Second Edition. New York: Springer Science+Business Media, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.
- [2] Aditivní technologie pro Průmysl 4.0. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. Copyright © 2021 www.mmspektrum.com [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-technologie-pro-prumysl-4-0.html>
- [3] *Beginner's guide to 3D printing* [online]. 2015 [cit. 2020-11-09]. Dostupné z: <https://www.think3d.in/landing-pages/beginners-guide-to-3d-printing.pdf>
- [4] History of 3D Printing Timeline: Who Invented 3D Printing - 3D Insider. *3D Insider - Emerging Technology News Publication* [online]. Copyright © 3D Insider. All Rights Reserved. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://3dinsider.com/3d-printing-history/>
- [5] *3D Printing Industry-The Authority on 3D Printing & Additive Manufacturing: 3D Printing Applications* [online]. 2017 [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#08-applications>
- [6] Czinger. *Czinger* [online]. Dostupné z: <https://www.czinger.com/>
- [7] WANG, Weigo. *Reverse engineering: technology of reinvention*. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4398-0630-2.
- [8] 3D Printing - A revolution capable of changing the supply chain of the medical industry *Share and Discover Knowledge on SlideShare* [online]. 2014 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://pt.slideshare.net/carstenengel/3d-printing-a-revolution-capable-of-changing-the-supply-chain-of-the-medical-industry/10>
- [9] Materiály - 3dfactory.cz. *Úvod - 3dfactory.cz* [online]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/11/02/materialy/>
- [10] 3D Printing Materials | MakerBot. *3D Printers for Educators & Professionals | MakerBot* [online]. Copyright © 2009 [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/stories/design/3d-printing-materials/>
- [11] In: Sculpteo: *Medical 3D printing: 3D printed heart helping to save lives* [online]. 2018 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2018/06/18/medical-3d-printing-3d-printed-heart-helping-to-save-lives/>
- [12] Jak funguje stolní 3D tiskárna: Základní technologie 3D tisku | TonerPartner.cz. *Tonery a cartridge za super ceny | TonerPartner.cz* [online]. Copyright © 2021 TonerPartner.cz [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.tonerpartner.cz/clanky/jak-funguje-stolni-3d-tiskarna-zakladni-technologie-3d-tisku-24967cz39332/>
- [13] YEOLE, Shivraj a P. Chennakesava SAI. *Fused Deposition Modeling - Insights* [online]. 2014 [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/269702639_Fused_Deposition_Modeling_-_Insights

- [14] CAREIRO, O.S., A.F. SILVA a R. GOMES. *Fused deposition modeling with polypropylene* [online]. 2015 [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127515004037?via%3Dihub>
- [15] *Additive Manufacturing: Mechanical characterization of 3D-printed polymers* [online]. 2018 [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860417302749?via%3Dihub>
- [16] *Composites Part B: Engineering* [online]. 2017 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816321230?via%3Dihub>
- [17] POLYJET TECHNOLOGY – MKS Technologies Pvt Ltd.. *MKS Technologies Pvt Ltd. – A Future Technology Solution Company* [online]. Copyright © All rights reserved. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <http://www.mkstechgroup.com/polyjet-technology/>
- [18] O. KAZMER, David. *Injection Mold Desing Engineering*. 2nd Edition. Munich: Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-56990-570-8
- [19] Variable layer height function. *Prusa Knowledge Base* [online]. [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/en/article/variable-layer-height-function_1750
- [20] *Scientific Molding Pocket Guide* [online]. 3rd Edition. 2015 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.pdfdrive.com/injection-molding-reference-guide-injection-molding-reference-guide-e16257535.html>
- [21] Technologie vstřikování plastů [online]. [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>
- [22] BOBEK, Jiří. Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. 2015 [cit. 2020-12-06]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/01.html>
- [23] Katedra strojírenské technologie. *Vstřikování plastů* [online]. [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm#042
- [24] CHANDA, Manas. *Plastics Technology Handbook* [online]. Fifth Edition. CRC Press, 2018 [cit. 2020-12-05]. ISBN 978-1-4987-8621-8. Dostupné z: <https://www.pdfdrive.com/plastics-technology-handbook-fifth-edition-d184003674.html>
- [25] ŠVORČÍK, V. *Struktura a vlastnosti polymerů* [online]. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/polymvsauto/Struktura%20a%20vlastnosti%20polymeru%20-%20strucne_Svorcik.pdf
- [26] JOHANSSON, Frans. *Optimizing Fused Filament Fabrication 3D printing for durability Tensile properties & layer bonding* [online]. Sweden: Blekinge Institute of Technology, 2016 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/0Bxo6VdyjA6VPdTBtajJWR2IHcFU/view>

- [27] KUZNETSOV, Vladimir E, Alexey SOLONIN, Oleg D URZHUMTSEV a Richard SCHILLING. *Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process* [online]. 2018 [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: doi:10.20944/preprints201803.0036.v1
- [28] How does part orientation affect a 3D print? | 3D Hubs . *3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days* [online]. Copyright © 2021 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print/>
- [29] 3D Printing Infill: The Basics – Simply Explained | *All3DP. All3DP | World's #1 3D Printing Magazine* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/>
- [30] The Best Cura Infill Pattern (for Your Needs) | *All3DP. All3DP | World's #1 3D Printing Magazine* [online]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/>
- [31] Overheating. *Simplify3D Software | All-In-One 3D Printing Software* [online]. Copyright © [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/overheating/>
- [32] Post processing for FDM printed parts | 3D Hubs . *3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days* [online]. Copyright © 2021 3D HUBS B.V. All rights reserved. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts/>
- [33] Co je pískování? čím se pískuje? | *Pískovačka. Jsme specialisté na pískování a pískovačky | Pískovačka* [online]. Copyright © Pískovačka.cz, všechna práva vyhrazena [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje/>
- [34] Building an Acetone Vapor Bath for Smoothing 3D-Printed Parts – Sink Hacks. *Sink Hacks* [online]. Dostupné z: <http://sinkhacks.com/building-acetone-vapor-bath-smoothing-3d-printed-parts/>
- [35] Jak vyhladit 3D tisky pomocí chemického vyhlazování - Prusa Printers. *Prusa Printers - Official Prusa 3D printers community* [online]. Copyright © Prusa Research a.s. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/jak-vyhladit-3d-tisky-pomoci-chemickeho-vyhlazovani_36394/
- [36] Jak zesílit svůj výtisk žiháním - Prusa Printers. *Prusa Printers - Official Prusa 3D printers community* [online]. Copyright © Prusa Research a.s. [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: https://blog.prusaprinters.org/cs/jak-zesilit-svuj-vytisk-zihanim_32119/
- [37] How Annealing Makes Your 3D Prints Better — Fargo 3D Printing. *Fargo 3D Printing | 3D Printer Filament, Parts, & Upgrades* [online]. Copyright ©2021 [cit. 16.01.2021]. Dostupné z: <https://www.fargo3dprinting.com/annealing-makes-3d-prints-better/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ASTM	- American Society for Testing and Materials (Americká společnost pro testování a materiály)
AM	- Additive Manufacturing (aditivní výroba)
ABS	- Akrylonitrilbutadienstyren
PLA	- Kyselina polyléčná
PTFE	- Polytetrafluorethylen
PCL	- Polykaprolakton
FDM	- Fused Deposition Modeling (depozice termoplastické taveniny)
SLA	- Stereolitografie
SLS	- Selective Laser Sintering (selektivní laserové slinování)
LOM	- Laminated Object Manufacturing (výroba laminovaných objektů)
CPE	- Kopolymer na bázi kyseliny teretfalové
T _g	- Teplota skelného přechodu
PET	- Polyethylentereftalát
PETG	- Polyethylentereftalát glykol

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: První 3D tiskárna. [4]</i>	14
<i>Obr. 2: Vytiskovaná kostra automobilu Czinger 21C. [6]</i>	15
<i>Obr. 3: Postup při prototypování. [8]</i>	16
<i>Obr. 4: Vytiskovaný model srdce. [11]</i>	17
<i>Obr. 5: Proces FDM. [15]</i>	18
<i>Obr. 6: Proces SLA. [15]</i>	19
<i>Obr. 7: Proces SLS. [15]</i>	20
<i>Obr. 8: Proces LOM. [15]</i>	21
<i>Obr. 9: Proces Polyjet. [17]</i>	22
<i>Obr. 10: Závislost výšky vrstvy na čase výroby. [19]</i>	24
<i>Obr. 11: Tisk více dílů najednou. [26]</i>	25
<i>Obr. 12: Vstřikovací stroj. [22]</i>	26
<i>Obr. 13: Vstřikovací cyklus. [22]</i>	27
<i>Obr. 14: Vstřikovací forma. [22]</i>	28
<i>Obr. 15: Měření napětí na vzorku. [26]</i>	31
<i>Obr. 16: Závislost směru síly působící na vrstvy. [28]</i>	32
<i>Obr. 17: Válec tištěný horizontálně a vertikálně. [28]</i>	33
<i>Obr. 18: Výšky tištěných vrstev pod elektronovým mikroskopem. [27]</i>	34
<i>Obr. 19: Běžné výplně 3D tisku. [29]</i>	35
<i>Obr. 20: Procentální hustota výplně. [29]</i>	36
<i>Obr. 21: Díl tištěný se špatným chlazením. [31]</i>	37
<i>Obr. 22: Výtisk ABS nevyhlazený a vyhlazený acetonovou parou. [34]</i>	38
<i>Obr. 23: PLA nevyžíhané a vyžíhané pod el. mikroskopem. [36]</i>	39
<i>Obr. 24: Vlevo materiál ABS, vpravo CPE.</i>	42
<i>Obr. 25 Modely zkušebních těles pro tisk.</i>	43
<i>Obr. 26: Kritické místo v rádiusu</i>	44
<i>Obr. 27: Finální vzor výplně</i>	44
<i>Obr. 28: Tisk zkušebního tělesa.</i>	45
<i>Obr. 29: Temperační jednotka REGLOPLAS a sušička ARBURG Thermolit 100-2.</i>	47
<i>Obr. 30: Model zkušebních tělísek pro vstřikování.</i>	47
<i>Obr. 31: Zhotovená zkušební tělesa metodou vstřikování.</i>	48
<i>Obr. 32: Elektrická pec Binder FD 53.</i>	51
<i>Obr. 33: Horní těleso nežíhané, zbytek žíhaný (ABS)</i>	52
<i>Obr. 34: Horní těleso nežíhané, zbytek žíhaný (CPE)</i>	54

<i>Obr. 35: Tahová zkouška.</i>	<i>57</i>
<i>Obr 36: Zkušební tělesa podrobená tahové zkoušce.</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 37: Příklad ZwickRoell HIT25P.</i>	<i>63</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Počet vzorků z cívky.</i>	42
<i>Tab. 2: Počet vzorků pro jednotlivá testování.</i>	43
<i>Tab. 3: Deformace ABS – Tah.</i>	53
<i>Tab. 4: Deformace ABS – Charpy.</i>	53
<i>Tab. 5: Deformace CPE – Tah.</i>	55
<i>Tab. 6: Deformace CPE – Charpy.</i>	55
<i>Tab. 7: Hodnota Youngova modulu pružnosti ABS.</i>	58
<i>Tab. 8: Síla potřebná k přetržení ABS.</i>	58
<i>Tab. 9: Mez pevnosti vzorků ABS.</i>	59
<i>Tab. 10: Hodnoty Youngova modulu materiálu CPE.</i>	60
<i>Tab. 11: Síla potřebná k přetržení vzorků CPE.</i>	60
<i>Tab. 12: Mez pevnosti vzorků CPE.</i>	61
<i>Tab. 13: Hodnoty vrubové houževnatosti ABS.</i>	64
<i>Tab. 14: Hodnoty vrubové houževnatosti CPE.</i>	65

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1: Deformace vzorků ABS – tah v %.</i>	53
<i>Graf 2: Deformace vzorků ABS – Charpyho kladivo.</i>	54
<i>Graf 3: Deformace vzorků CPE - tah v %.</i>	55
<i>Graf 4: Deformace vzorků CPE – Charpyho kladivo v %.</i>	56
<i>Graf 5: Youngův modul pružnosti vzorků ABS.</i>	58
<i>Graf 6: Síla potřebná k přetržení vzorků ABS.</i>	59
<i>Graf 7: Mez pevnosti vzorků ABS.</i>	59
<i>Graf 8: Youngův modul pružnosti vzorků CPE.</i>	60
<i>Graf 9: Síla potřebná k přetržení vzorků CPE.</i>	61
<i>Graf 10: Mez pevnosti vzorků CPE.</i>	62
<i>Graf 11: Vrubová houževnatost ABS.</i>	64
<i>Graf 12: Vrubová houževnatost CPE.</i>	65

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Technický list materiálu ABS

Příloha 2: Technický list materiálu CPE

PŘÍLOHA 1: TECHNICKÝ LIST MATERIÁLU ABS

Datasheet



ABS Extrafill “transparent”

Description:

Fillamentum ABS Extrafill is a material for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.

The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.

ABS filament is a polymer which is ideal for the production of the first functional samples before serial production for functional prototyping, manufacturing tools, but also for the production of goods for everyday use.

This material can be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances. The use of the material in the food or medical industry is not recommended.

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of ± 0.05 mm, which is strictly controlled throughout the production.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,08 g/cm ³	ISO 1183	23 °C
Melt volume index	3,0 cm ³ /10 min	ISO 1133	200 °C, 5 kg
Diameter tolerance	+ 0,05 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	42 MPa	ISO 527	at yield, 50 mm/min
	33 MPa	ISO 527	at break, 50 mm/min
Elongation at break	40 %	ISO 527	50 mm/min
Flexural strength	57 MPa	ISO 178	2 mm/min
Flexural modulus	1900 MPa	ISO 178	2 mm/min
Izod impact strength	14 kJ/m ²	ISO 180-1A	23 °C, notched
	7 kJ/m ²	ISO 180-1A	-30 °C, notched
Charpy impact strength	14 kJ/m ²	ISO 179	23 °C, notched
	7 kJ/m ²	ISO 179	-30 °C, notched

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Heat distortion temperature	77 °C	ISO 75-A	1,8 MPa
Vicat softening temperature	104 °C	ISO 306	50 °C/h, 1 kg
	95 °C	ISO 306	50 °C/h, 5 kg
Coefficient of linear thermal expansion	$9,0 \times 10^{-4}$	ISO 11359	

Printing properties	Recommended	Notes
Print temperature	220-240 °C	Recommended settings! it may differ according to the printer and the object.
Hot pad	80-105 °C	Try your own settings before printing.
Bed adhesive	3Dlac, glue stick	

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.

The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.
nam. Miru 1217, 768 24 Hulín
Czech Republic

(+420) 720 060 947
helpdesk@fillamentum.com
www.fillamentum.com

PŘÍLOHA 2: TECHNICKÝ LIST MATERIÁLU CPE

Datasheet



CPE HG100

Description:

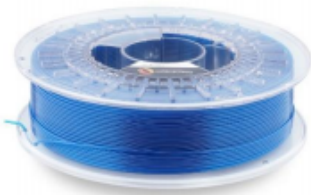
Filament from co-polyester can be with advantages used for 3D printing of technical objects. The material is durable and tough. CPE has higher tensile, flexural and impact strength, better thermal and chemical resistance in comparison with ABS or PLA filaments.

Thanks to its ease of processing this type of filament is an excellent choice for your prints requiring better properties. Another advantage of the material is less odor produced during the printing and less shrinkage as compared with ABS.

This co-polyester contains bio-based monomer and can be recycled. Therefore, it is a human-friendly and eco-friendly material. For all the colours we guarantee the certificate for food contact.

Filament has great optical properties, very high gloss and clarity. The transparency and strength are also preserved in thin-wall prints from transparent colours.

Filamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance +/- 0,05 mm, which is strictly controlled throughout production.



Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.

The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,25 g/cm ³	ASTM D792	
Melt flow index	1,6 g/10 min	ASTM D1238	230 °C, 1,2 kg
	5,9 g/10 min	ASTM D1238	230 °C, 3,8 kg

Diameter tolerance	+ 0,05 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	47 MPa	ASTM D638	at yield, 50 mm/min
	48 MPa	ASTM D638	at break, 50 mm/min
Elongation at break	150 %	ASTM D638	50 mm/min
Flexural strength	71 MPa	ASTM D790	1,27 mm/min
Flexural modulus	1860 MPa	ASTM D790	1,27 mm/min
Izod impact strength	no break	ASTM D256	23 °C, notched
Rockwell hardness	115	ASTM D785	R-Scale

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Heat distortion temperature	80 °C	ASTM D648	0,455 MPa
Glass transition temperature	90 °C	ASTM D1525	

Optical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Haze	< 1,0 %	ASTM D1003	
Transmittance	90 %	ASTM D1003	

Printing properties	Recommended	Notes
Print temperature	255-275 °C	Recommended settings! It may differ according to the printer and the object.
Hot pad	70-85 °C	Try your own settings before printing.
Bed adhesive	Magigoo	Use of adhesive is necessary to prevent damage of the pad!
Conditions to re-dry	60 °C, 3-4 hours	Moisture sensitive! Keep in protective bag. If stringing occurs, the filament is too moist.

Filamentum Manufacturing Czech s.r.o.
nam. Miru 1217, 768 24 Hulín
Czech Republic

(+420) 720 060 947
helpdesk@fillamentum.com
www.fillamentum.com