



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Bakalářská práce

Experimentální hodnocení mechanických vlastností polymeru
zpracovaného technologií FDM

2019

Jiří Bidlo



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bidlo** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **457612**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Experimentální hodnocení mechanických vlastností polymeru zpracovaného technologií FDM

Název bakalářské práce anglicky:

Experimental evaluation of mechanical properties of polymer processed by FDM technology

Pokyny pro vypracování:

Zásady pro zpracování:

1. Vypracujte přehledný úvod do technologie Fused Deposition Modeling a jejích aplikací.
2. Zpracujte metodiku normalizované zkoušky ISO 527 - Plastics - Determination of tensile properties.
3. Provedte tahové zkoušky u několika skupin vzorků, vyhodnoďte naměřená data a porovnejte zjištěné mechanické vlastnosti mezi skupinami.

Rozsah práce: cca 30 stran A4

Seznam doporučené literatury:

1. Norma ISO ISO 527 - Plastics - Determination of tensile properties
2. Suchý, T.: Biomechanika III - statistika, podklady pro přednášky

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Růžička, Ph.D., ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Pavel Růžička, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.4.2019

Datum převzetí zadání

Bidlo

Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora	Jiří Bidlo
Název BP	Experimentální hodnocení mechanických vlastností polymeru zpracovaného technologií FDM
Anglický název	Experimental evaluation of mechanical properties of polymer processed by FDM technology
Akademický rok	2018/2019
Obor studia	TZSI
Ústav / Odbor	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky / Odbor biomechaniky člověka
Vedoucí práce	Ing. Pavel Růžička, Ph.D.
Bibliografické údaje	počet stran: 57 počet obrázků: 43 počet tabulek: 16 počet příloh: 0

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením tahových vlastností vzorků vyrobených pomocí technologie Fused Deposition Modeling. V první části je vysvětlena technologie 3D tisku, zejména FDM. Ve druhé části jsou vyhodnoceny výsledky tahových zkoušek provedených na jednotlivých vzorcích.

Klíčová slova 3D tisk, ABS, ANOVA, aditivní výroba, Fused Deposition Modeling, mechanické vlastnosti

Abstract:

This bachelor thesis deals with evaluation of tensile properties of samples produced using Fused Deposition Modeling technology. The first part explains 3D printing technology, especially FDM. In the second part the results of tensile tests performed on individual samples are evaluated.

Keywords 3D printing, ABS, ANOVA, additive manufacturing, Fused Deposition Modeling, mechanical properties

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu literatury.

V Praze, dne 8. 8. 2019

Jiří Bidlo

Za cenné rady, ochotu a věnovaný čas děkuji vedoucímu práce Ing. Pavlu Růžičkovi, Ph.D.
Za asistenci při mechanických zkouškách děkuji Ing. Radku Sedláčkovi, Ph.D. Za podporu při psaní
bakalářské práce děkuji své rodině a přítelkyni.

Obsah

1	Seznam použitých veličin a jednotek	9
2	Úvod	10
3	Fused Deposition Modeling a jeho aplikace	11
3.1	Aditivní výroba.....	11
3.1.1	Úvod	11
3.1.2	Historie 3D tisku	12
3.1.3	Technologie aditivní výroby a její rozdělení.....	12
3.1.4	Způsoby 3D tisku	13
3.1.5	Výhody a nevýhody aditivní technologie.....	15
3.1.6	Využití 3D tisku	16
3.2	FDM	17
3.2.1	Úvod	17
3.2.2	Vytlačování materiálu	19
3.2.3	Výplň.....	20
3.2.4	Rozdělení 3D tiskáren	21
3.2.5	Komponenty FDM tiskárny.....	22
3.2.6	Materiály	24
3.2.7	Shrnutí	26
4	Výtah z normy ČSN EN ISO 527	27
4.1	ČSN EN ISO 527-1	27
4.1.1	Podstata a metody zkoušky	27
4.1.2	Zkušební zařízení	28
4.1.3	Zkušební tělesa.....	29
4.1.4	Postup.....	31
4.1.5	Výpočet a vyjádření výsledků	32
5	Tahové zkoušky a jejich vyhodnocení	34
5.1	Použitá zařízení a laboratoř	34
5.2	Zkušební vzorky.....	34
5.2.1	Tvar a rozměry	34
5.2.2	Materiál a výroba.....	35
5.3	Příprava zkoušky	38

5.4	Průběh zkoušky	38
5.5	Zpracování naměřených hodnot	39
5.5.1	Modul pružnosti v tahu E	39
5.5.2	Pevnost v tahu σ_{max}	41
5.5.3	Statistické zpracování naměřených hodnot	42
6	Závěr.....	50
7	Seznam obrázků	53
8	Seznam tabulek.....	55
9	Literatura	56

1 Seznam použitých veličin a jednotek

v	[mm · min ⁻¹]	zkušební rychlost
f_{min}	[Hz]	minimální záznamová frekvence sběru dat
f_{sila}	[Hz]	záznamová frekvence dat při měření síly
l_0	[mm]	počáteční měřená délka zkušebního tělesa
Δl	[mm]	prodloužení zkušebního tělesa
L	[mm]	upínací vzdálenost mezi čelistmi
r	[mm]	minimální rozlišení signálu poměrného prodloužení
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
A	[mm ²]	plocha průřezu zkušebního tělesa
ε	[-]	poměrné prodloužení
L	[mm]	upínací vzdálenost mezi čelistmi
σ_0	[MPa]	předpětí
SD	[j.]	směrodatná odchylka
σ	[MPa]	napětí
σ_{max}	[MPa]	maximální napětí, mez pevnosti v tahu
F	[N]	zatěžující axiální síla
F_{max}	[N]	maximální zatěžující axiální síla
SS	[-]	součet čtverců
MS	[-]	průměrný čtverec
F	[-]	hodnota Fisherova rozdělení (F-distribution)
P	[-]	pravděpodobnost nulové hypotézy
F_{krit}	[-]	tabulková kritická hodnota

2 Úvod

V dnešní době je aditivní technologie stále na vzestupu a používá se v čím dál tím větší míře. Dalo by se říct, že začít s 3D tiskem může téměř každý, stačí jen relativně malý vstupní kapitál. Dle mého názoru má 3D tisk jako výrobní technologie velkou budoucnost a stojí za to se jím zabývat.

Tato práce se zabývá konkrétně technologií Fused Deposition Modeling a tiskem polymeru ABS. Mechanické vlastnosti klasických materiálů jako jsou například kovy jsou už v dnešní době dobře popsány, ale zkoumání vlastností polymerů zatím není tak rozsáhlé. Důvodem může být fakt, že u polymerů závisí mechanické vlastnosti na mnoha různých faktorech jako například na způsobu výroby. Polymery se také v dřívějších dobách tolik nepoužívaly, zatímco například kovy se používají už po staletí.

V první části práce jsem teoreticky popsal technologii 3D tisku a následně konkrétně Fused Deposition Modeling. Druhá část se skládá z výtahu z normy ČSN EN ISO 527 Plasty-Stanovení tahových vlastností. Ve třetí části jsem vyhodnotil výsledky tahových zkoušek testovacích vzorků a ověřil platnost tří hypotéz, které zde teď uvedu.

1. Ovlivňuje úhel, při kterém tiskneme, sledované hodnoty?
2. Ovlivňuje směr kladení výplně sledované hodnoty?
3. Ovlivňuje natočení vzorku (plochý, na hraně) sledované hodnoty?

Poslední část mé práce je pak závěr, kde shrnu výsledky svého snažení.

3 Fused Deposition Modeling a jeho aplikace

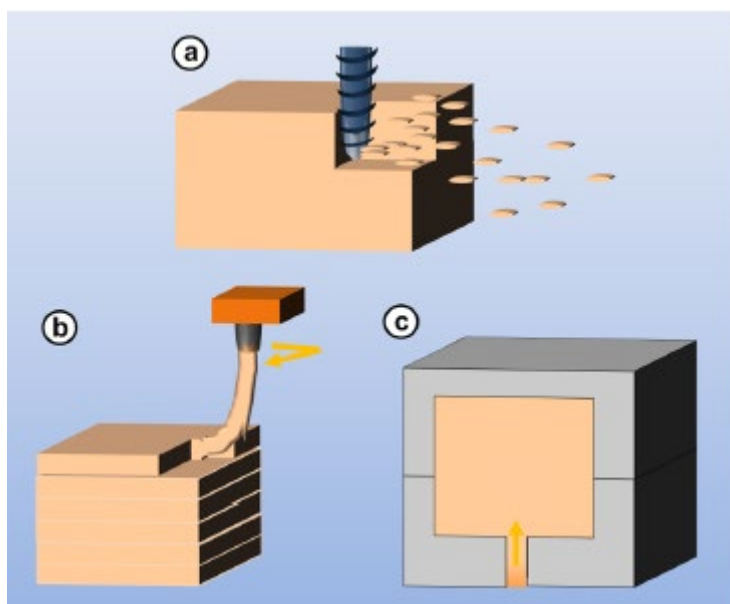
V této části bakalářské práce se budu zabývat technologií aditivní výroby a následně blíže popíši technologii Fused Deposition Modeling.

3.1 Aditivní výroba

V první části této kapitoly stručně popíšu technologii aditivní výroby.

3.1.1 Úvod

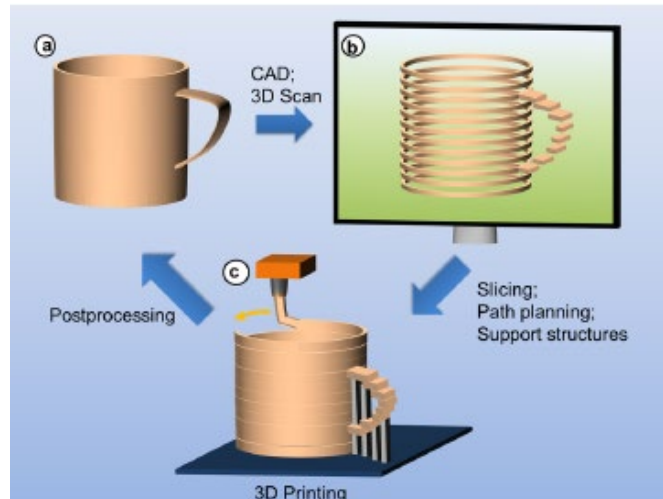
Fused deposition modeling je jedna z technologií aditivní výroby neboli 3D tisku. Dříve se tato technologie také nazývala rapid prototyping, neboť se používala zejména pro výrobu prototypů. Nyní už jsou ale 3D tiskárny mnohem dostupnější a z 3D tisku se stal rovnocenný soupeř klasických výrobních technologií, jako jsou například subtraktivní a formativní výrobní technologie. [1]



Obr. 1- Porovnání (a) subtraktivní, (b) aditivní a (c) formativní výrobní technologie [2]

Technologii 3D tisku lze v současné době zpracovávat téměř všechny druhy materiálu od polymerů až po kovy. Základním rozdílem oproti klasickým výrobním technologiím je, že výroba probíhá postupným kladením vrstev materiálu na sebe. Tento způsob výroby je typický jen pro 3D tisk. Proces výroby lze rozdělit do několika kroků. Prvním krokem je vytvoření 3D modelu, který je následně digitálně rozřezán na jednotlivé vrstvy. K částem, které by nebylo možné vytisknout, jsou přidány podpory a následně jsou nastaveny parametry tisku, jako například rychlost tisku nebo tloušťka jedné vrstvy. Souřadnice daného objektu a jeho jednotlivých vrstev jsou převedeny na pohyb tiskové hlavy.

Následně proběhne samotný tisk a v některých případech postprocessing. 3D tisk je ideální pro výrobu prototypů, neboť umožňuje relativně rychlou výrobu požadovaného objektu a po otestování může být objekt jednoduše upraven a znovu vytisknut. [2]



Obr. 2- Základní princip aditivní výroby [2]

3.1.2 Historie 3D tisku

Odvětví 3D tisku patří mezi nejmladší výrobní technologie. Jeho počátky sahají do druhé poloviny 20. století, konkrétně do roku 1984. Tento rok Charles W. Hull objevil schopnost fotopolymerů vlivem UV záření ztuhnout do pevné vrstvy a položil tak základy stereolitografie (SLA). V roce 1986 si tento vynález nechal patentovat a vytvořil stereolitografický aparát SLA-1, tedy první zařízení pro širokou veřejnost, které dokázalo tisknout ve 3D formátu. Dalším posunem v oblasti aditivní výroby byly technologie Fused Deposition Modeling (FDM) a Selective Laser Sintering (SLS), které objevil zakladatel společnosti Stratasys Scott Crump. V roce 2005 spatřil světlo světa projekt nazývaný RepRap. Hlavní myšlenkou tohoto projektu je výroba tiskárny, která je schopná vytisknout většinu svých součástí a je tedy schopná sama sebe zkopírovat. Tento nápad výrazně pomohl zvýšit dostupnost 3D tisku mezi obyčejnými lidmi. O rozvoj 3D tisku se velmi zasloužil také Josef Průša, jehož společnost je jedním z lídrů na trhu s 3D tiskárnami. [3] [4] [5]

3.1.3 Technologie aditivní výroby a její rozdělení

Všechny technologie 3D tisku jsou založeny na stejném principu – na postupném nanášení vrstev materiálu na sebe. V současné době neexistuje žádná technologie 3D tisku, která by byla univerzální a vhodná pro všechna použití. Proto je třeba pečlivě zvážit, co budeme na tiskárně tisknout a co od ní požadujeme.

Nejjednodušším rozdělením aditivní výroby je rozdělení dle zpracovávaného materiálu na:

- aditivní metody zpracovávající kov;
- aditivní metody zpracovávající keramiku;
- aditivní metody zpracovávající polymer, případně kompozit. [2]

Další dělení je podle podoby výchozího materiálu a způsobu, jakým je zpracováván:

- materiál v podobě tiskové struny je extrudovaný tiskovou hlavou skrz rozehrátou trysku (FDM);
- tekutý materiál je vytvrzován v rámci vrstvy na definovaných oblastech (SLA);
- materiál v podobě jemného prášku je sinterován laserem (SLS). [1]

Process categories	Technology	Materials
Binder Jetting	3D Printing	Metal Polymer Ceramic
	Ink-jetting	
	S-Print	
	M-Print	
Direct Energy Deposition	Direct Metal Deposition	Metal: powder and wire
	Laser Deposition	
	Laser Consolidation	
	Electron Beam Direct Melting	
Material extrusion	Fused Deposition Modeling	Polymer
Material Jetting	Polyject	Photopolymer Wax
	Ink-jetting	
	Thermojet	
Powder bed fusion	Selective Laser Sintering	Metal Polymer Ceramic
	Selective Laser Melting	
	Electron Beam Melting	
Sheet lamination	Ultrasonic Consolidation	Hybrids Metallic Ceramic
	Laminated Object Manufacture	
Vat photopolymerization	Stereolithography	Photopolymer Ceramic
	Digital Light Processing	

Obr. 3- Rozdělení aditivní výroby [6]

3.1.4 Způsoby 3D tisku

V této kapitole se krátce zmíním o některých konkrétních technologiích aditivní výroby. Záměrně vynechám technologii FDM, které se budu následně věnovat podrobněji.

SLA (stereolitografie)

SLA je nejstarší metodou 3D tisku. Je založena na principu vytvrzování světlocitlivého polymeru pomocí světla. Stůl, na kterém probíhá tisk, je ponořený v nádrži obsahující daný polymer.

Po vytištění každé vrstvy se stůl posune a proběhne vytvrzení v další vrstvě. Tloušťka vrstvy u této metody je 0,05-0,2 mm. Tisk je v porovnání s FDM tiskárnami detailnější, ale typicky trvá déle a tisková plocha je menší. Tyto tiskárny si najdou uplatnění především v medicíně a šperkařství. Tisk je takřka ideálně hladký, detailní a nejsou na něm tak patrné vrstvy materiálu, jako je tomu u FDM tiskáren. Nevýhodou této technologie může být menší tisková plocha oproti FDM tiskárnám, a především toxicita pryskyřice. Je třeba se vyvarovat kontaktu pryskyřice s pokožkou a dýchání výparů během tisku. [1] [7]

Existují tři hlavní kategorie SLA procesu, které se liší způsobem osvětlení a vytvrzováním fotopolymery, a to konkrétně:

- pomocí laseru;
- pomocí digitálního projektoru;
- pomocí UV LED a maskování celé vrstvy LCD displayem. [1]

SLS (selective laser sintering)

Principem této metody je nanášení práškového polotovaru, jeho následného natavování a spojování (sintrování) pomocí laseru. Během tisku nové vrstvy vždy válec nanese vrstvu jemného prášku a ten se laserem sintruje v místech, která mají být součástí konečného výtisku. Tisk končí tak, že je celý model zasypaný v tiskovém materiálu. Proto je třeba při tvorbě dutého modelu vytvořit otvory umožňující vysypání nevytvrzeného materiálu, který je poté možné použít pro další tisk. Odpad tiskového materiálu je proto u této technologie minimální. Umožňuje výrobu jak z plastových, tak kovových prášků. Výhodou je velmi nevýrazné vrstvení materiálu. [1] [7]

LOM (laminated object manufacturing)

Tato metoda se od ostatních technologií 3D tisku výrazně odlišuje používaným polotovarem. Tím je nejčastěji papír, který je z jedné strany potažený polyetylenem. Ten slouží jako pojivo při zažehlení, ale existují i varianty zpracovávající fólie z jiných plastů, a dokonce i z kovů. Tato fólie je navinuta přes celý pracovní prostor, zažehlena válcem, k již už vytvořené části výrobku a následně je z ní laserem vyříznut obrys vrstvy. Mezi největší výhody této technologie patří schopnost vyrábět i velké součásti a možnost zpracovávat různé druhy materiálu, jako je například papír, různé druhy polymerů nebo kovy. [7]

3.1.5 Výhody a nevýhody aditivní technologie

Rychlost

Už z názvu rapid prototyping lze odvodit, že aditivní technologie je vhodná pro rychlou výrobu prototypů, neboť není potřeba vyvíjet žádné nástroje a výrobní čas se skládá pouze z návrhu objektu v CADu a samotného tisku. [8]

Složitost součástí

Složité tvarové prvky mohou být vytvořeny rovnou při tisku objektu a bez potřeby speciálních nástrojů a výrobních postupů. Na rozdíl od jiných výrobních procesů má složitost součástí malý vliv na výrobní čas. Při tváření nebo odlévání nemusí složitost součástí ovlivnit dobu cyklu, ale čas může vyžadovat například výroba formy. Při obrábění mají tvarové složitosti vliv přímo na dobu cyklu a mohou vyžadovat dražší vybavení nebo nástroje. [8]

Typy materiálů

3D tiskem jsme schopni vyrábět díly prakticky ze všech materiálů. Některé procesy navíc mohou vyrábět součásti z více materiálů. [8]

Nízkoobjemová výroba

Jiné výrobní způsoby nejsou pro výrobu s nízkým počtem kusů vzhledem k vysokým počátečním nákladům vhodné. Aditivní výroba vyžaduje pouze minimální nastavení a vyrábí součást přímo z CAD modelu, což umožňuje nízké náklady na výrobek při nízkoobjemové výrobě.

I přes všechny tyto výhody nemůže aditivní výroba plně nahradit konvenční výrobní postupy. Pro následující případy je stále vhodnější použití obrábění, odlévání a dalších výrobních postupů. [8]

Velké součásti

Aditivní procesy jsou nejvhodnější pro relativně malé díly, protože doba výstavby je do značné míry závislá na velikosti dílů. Větší rozměry v rovině X-Y budou vyžadovat více času pro tisk každé vrstvy a větší rozměr na směru osy Z bude vyžadovat více vrstev, které musí být vytisknuty. U tváření a odlévání je typicky výrobní čas ovlivněn tloušťkou součásti a u obrábění je závislý na materiálu a složitosti součásti. [8]

Vysoká přesnost a povrchová úprava

V současné době se procesy výroby aditivní technologií nemohou shodovat s přesností a povrchovou úpravou nabízenou obráběním. V důsledku toho mohou části vyrobené pomocí aditivní technologie vyžadovat sekundární operace v závislosti na jejich zamýšleném použití. [8]

Velkoobjemová výroba

Aditivní technologie se sice s postupem času stále vylepšují, ale i přesto jsou konvenční technologie preferovány pro velkoobjemovou výrobu. Při velkých výrobních objemech jsou náklady na kus výrazně nižší a doby cyklů kratší než u aditivní technologie. [8]

Materiálové vlastnosti

Při aditivní výrobě sice můžeme použít mnoho různých typů materiálů, ale možnosti výběru konkrétního materiálu mohou být omezené. V důsledku toho nemusí mít dostupné materiály požadované vlastnosti. Současné ceny materiálů používaných v aditivní výrobě jsou také mnohem větší než ceny materiálů pro běžné procesy. [8]

3.1.6 Využití 3D tisku

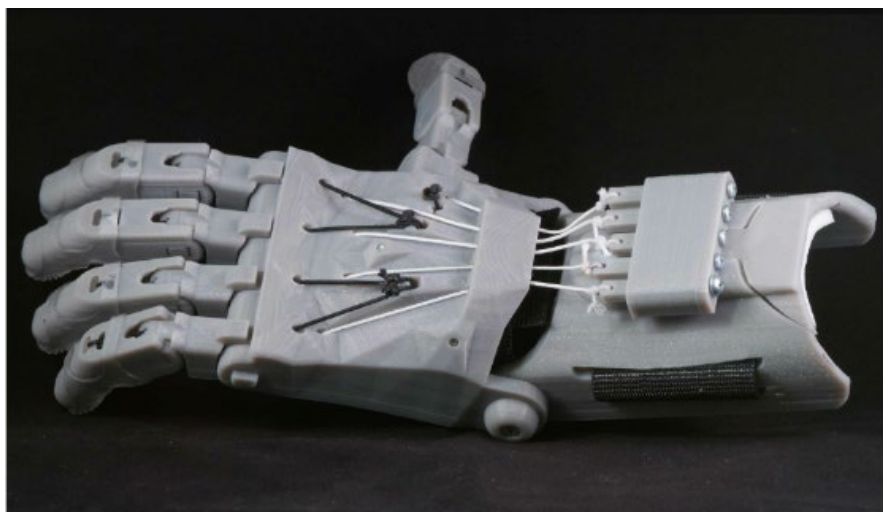
Jak už jsme si uvedli, 3D tisk byl zprvu využíván jako nástroj na výrobu rychlých a levných prototypů. Další využití přišlo s nástupem levnějších technologií a díky snížení cen. Ukázkovým příkladem je malosériová výroba. Pokud firma plánuje vyrábět sérii produktů, která je příliš malá na odůvodnění vysokých nákladů spojených s přípravou výroby, 3D tisk těchto produktů je často výhodnější variantou. Další výhodou je i fakt, že po získání zpětné vazby od zákazníka můžeme výrobek snadno upravit v CADu a hned tisknout. [1]

3D tisk je také velmi využíván v architektuře, a to nejen pro výrobu modelů. Objevují se dokonce i celé stavby, které jsou vytvořeny touto technologií. [3]



Obr. 4- Dům vyrobený pomocí aditivní technologie [9]

Další oblastí, kde se 3D tisk hojně využívá je zdravotnictví. Existuje mnoho případů, kdy byly pomocí aditivní technologie vyrobeny speciální protézy nebo zubní implantáty. Pro tyto účely se používá technologie 3D skenování, díky níž je možné vytvořit odpovídající implantát na míru daného pacienta. Další výzkum se dokonce zabývá tiskem kostí nebo kloubů.



Obr. 5- Implantát vyrobený pomocí aditivní technologie [10]

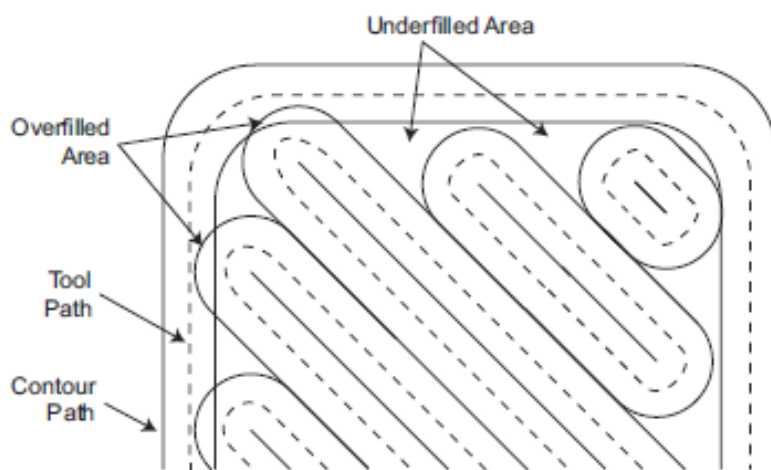
3.2 FDM

Tato část bakalářské práce se bude podrobněji zabývat technologií Fused Deposition Modeling.

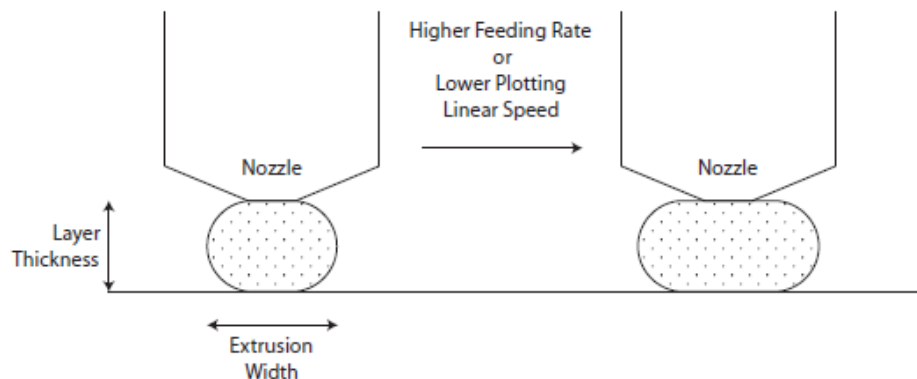
3.2.1 Úvod

Fused Deposition Modeling je nejrozšířenější a nejdostupnější technologií 3D tisku mezi širokou veřejností. Stavebním materiálem je polymer, jako například ABS nebo PLA, který je při průchodu

extrudérem roztaven a vytlačován stále ještě pevným polymerem. Extrudér se pohybuje podle předepsaných rozměrů tělesa a vrství polymer na podložku. V každé vrstvě nejprve začne obvodem a následně vyplní prostor uvnitř. Tento postup způsobí, že na okrajích výrobku mohou vznikat přesahy nebo naopak větší mezery. Na obr. 6 můžeme vidět dva extrémní případy. V prvním případě jsou sousední cesty extrudéru velmi blízko u sebe, což má za následek překrytí materiálu a špatné tvarové vlastnosti výsledného výrobku. Ve druhém případě jsou naopak cesty extrudéru od sebe vzdáleny, což způsobuje vznik mezer, a tedy menší nebo neexistující spojení mezi cestami extrudéru. V tomto případě může být narušena celistvost celého dílu a je proto nutné optimalizovat šířku dráhy extrudéru podle vlastností, které od výrobku očekáváme. Některé části tisknutého objektu musí být podpořeny podporami, které se po vytisknutí odlomí nebo jsou odstraněny rozpuštěním v roztoku, který nereaguje s materiálem použitým k vlastnímu tisku. Ačkoli se FDM může zdát jako snadný způsob výroby, existuje mnoho parametrů, které musíme nastavit, aby tisk správně fungoval. Jsou to například rychlost podávání filamentu, šířka a tloušťka natavené vrstvy nebo rychlost pohybu extrudéru. Jednotlivé parametry na sobě závisí, například se zvýšením rychlosti podávání filamentu nebo snížením rychlosti pohybu extrudéru můžeme zvýšit tloušťku natavené vrstvy, viz Obr. 7. Podobně jako u ostatních aditivních technologií začíná proces výroby modelem výrobku v CADu. Ten je pak rozdělen na jednotlivé vrstvy a postupně vytisknut. [1] [11]



Obr. 6- Ukázka přebytku a nedostatku materiálu [11]

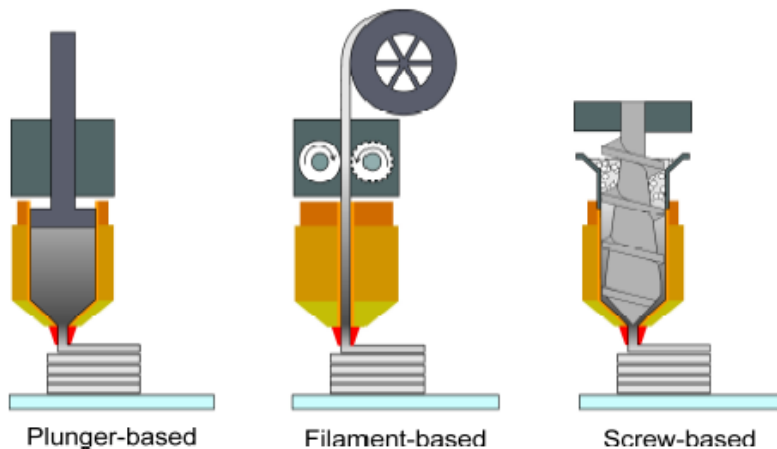


Obr. 7- Závislost tloušťky vrstvy na vstupních parametrech [11]

3.2.2 Vytlačování materiálu

U FDM se setkáváme se třemi způsoby vytlačování materiálu:

- pomocí pístu;
- pomocí filamentu;
- pomocí šneku.

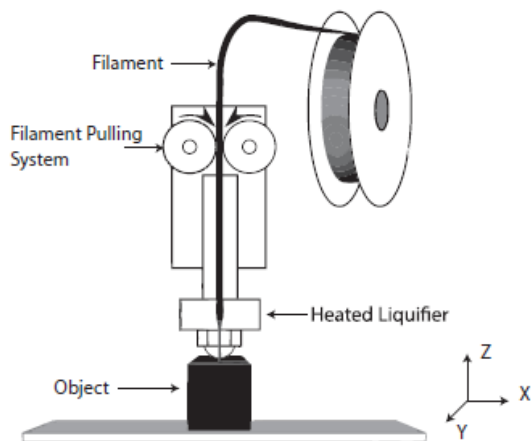


Obr. 8- Různé typy vytlačovacích mechanismů u FDM [12]

FDM za pomoci filamentu

Tento způsob je nejčastějším způsobem vytlačování materiálu. Tiskový materiál je ve formě tiskové struny (filamentu), která má nejčastěji průměr 1,75 mm. Dříve se používal také filament s průměrem 3 mm, nevýhodou byla ale menší přesnost v jeho dávkování. Struna je pomocí podávacího zařízení posouvána ze zásobníku. Oproti pryskyřici či jemnému prášku, jenž se využívají v dalších technologiích, je práce s filamentem jednoduchá a bezpečná. Na výtisku jsou patrné tiskové vrstvy.

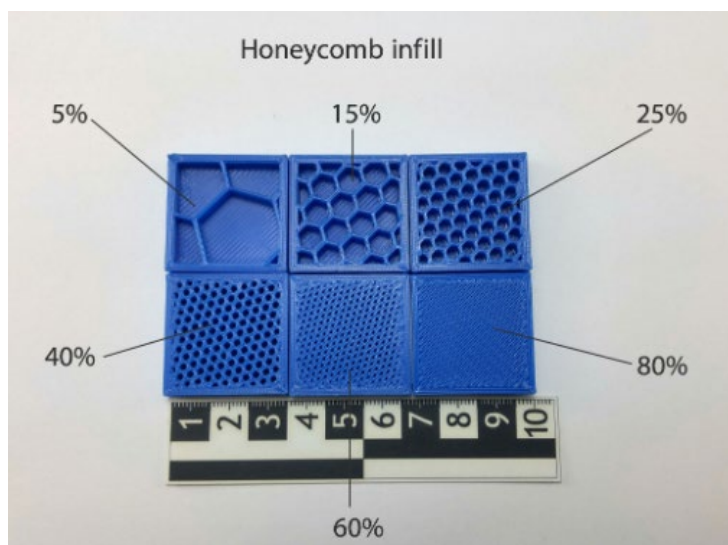
Jejich výška se při použití nejběžnější trysky s průměrem 0,4 mm pohybuje přibližně v rozsahu od 0,05 mm do 0,3 mm. [1]



Obr. 9- Zjednodušené znázornění technologie FDM [11]

3.2.3 Výplň

Důležitou vlastností FDM tiskáren je možnost výběru vnitřní struktury 3D tištěného modelu. Na výběr máme modely zcela vyplněné materiálem, které mají vysokou pevnost, nebo můžeme zvolit množství výplně v procentech a také tvar výplně. Tyto vlastnosti jsou vhodné, pokud potřebujeme, aby byl výrobek o něco lehčí, a není potřeba pevnost zcela vyplněného výrobku. Tato nastavení nemusíme řešit v samotném návrhu výrobku, neboť se o to postará tiskárna. [13]

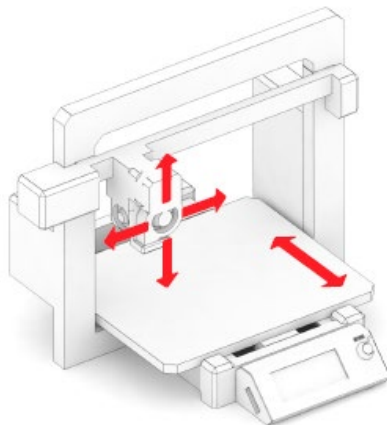


Obr. 10- Ukázka procentuálního poměru výplně [13]

3.2.4 Rozdělení 3D tiskáren

Kartézská tiskárna

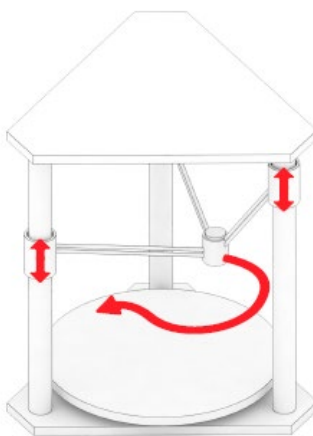
Kartézská tiskárna je založena na principu pohybu po třech lineárních osách. U námi používané tiskárny se extrudér pohybuje ve vodorovné rovině (v osách X a Y) a podložka ve směru svislé osy. Tisková podložka má proto u většiny tiskáren pravoúhlý tvar. [1]



Obr. 11- Kartézská tiskárna [1]

Delta tiskárna

Delta tiskárna využívá zavěšeného extruderu na třech ramenech, která jsou spolu spojena právě v místě extrudéru. Výhodou jsou rychlé pohyby a velký tiskový prostor především v ose Z. Naopak nevýhodou je nutnost vysoké přesnosti při stavbě a následné kalibraci tiskárny. [1]



Obr. 12- Delta tiskárna [1]

Polar tiskárna

Polar tiskárna je méně používaný systém založený na polárním pohybu tiskové hlavy po dvou osách a rotační podložce. Tento systém je konstrukčně velmi jednoduchý, ale převedení a příprava modelu pro tisk je naopak v tomto případě poměrně komplikovaná. [1]

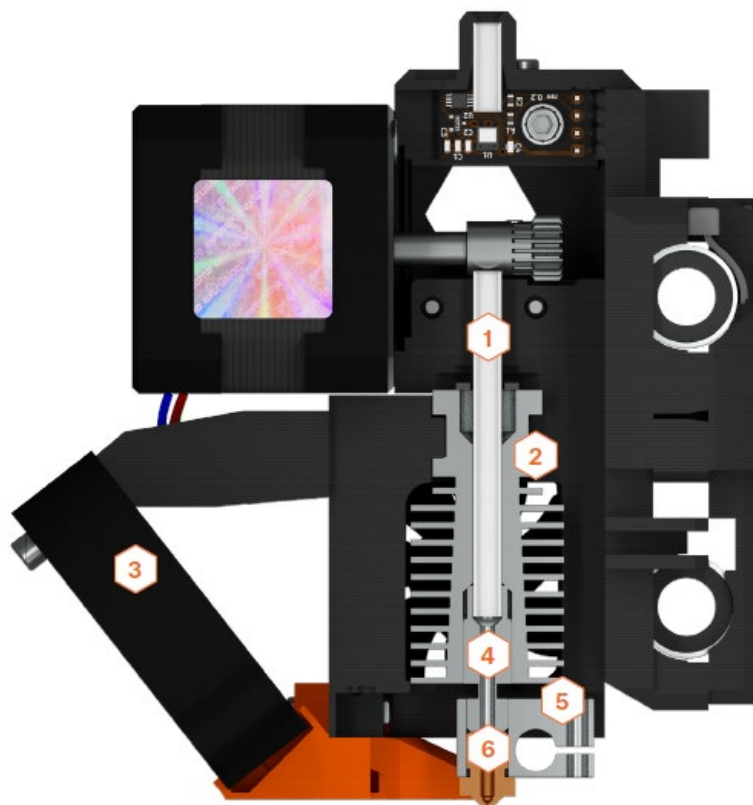


Obr. 13- Polar tiskárna [1]

3.2.5 Komponenty FDM tiskárny

Extrudér

Extruder neboli tisková hlava, slouží k nanášení jednotlivých tiskových vrstev. Do extrudéru putuje filament teflonovou trubičkou. Filament dále prochází přes heat sink neboli chladič, který má za cíl odvést teplo, které se šíří přes heat break a co nejvíce tak zmenšit oblast mezi pevným a roztaveným filamentem. Pro vyšší účinnost bývá na heat sink montován ventilátor. Heat break je ve své podstatě kus trubičky s vnějším závitem, která je v jednom místě výrazně zúžená, aby bylo docíleno co nejmenšího možného průřezu a tím pádem omezení přenosu tepla směrem nahoru, kde má být filament neroztavený. Heater block je vyroben z materiálu, který dobře vede teplo (nejčastěji hliník). V heater blocku je umístěno elektrické topné těleso a termistor pro zpětnou vazbu o aktuální teplotě. Na jeho úrovni je již materiál roztavený a je vytlačován přes trysku ven. [1]



Obr. 14- Průřez extrudérem [1] (1. Teflonová (PTFE) trubička, 2. Heatsink (chladič), 3. Tiskový ventilátor, 4. Heat break (izolátor), 5. Heater Block, 6. Tryska)

Vyhřívání podložka a stavební komora

Zabraňuje efektu postupného kroucení součástí při tisku z materiálů s výraznější tepelnou roztažností. [1]

Rám

Rám tvoří nosnou konstrukci 3D tiskárny. Jeho tuhost a přesnost zpracování má významný vliv na výslednou kvalitu tisku. Robustní a pevný rám omezuje vibrace a tím umožní rychlejší tisk bez známek snížení kvality tisku. [1]

Krokové motory

Krokové motory zajišťují veškeré mechanické pohyby extrudéru a tiskové podložky v 3D prostoru. Další motor zajišťuje podávání tiskového materiálu do extrudéru. Výhodou krokových motorů je definovaná velikost kroku. [1]

Řídící jednotka

Řídící jednotka se stará o chod celé tiskárny. Její funkcí je čtení a zpracování kódu (např. G-code nebo CMB), podle kterého se řídí pohyby jednotlivých krokových motorů, a který ovládá nahřívání podložky a trysky. [1]

3.2.6 Materiály

Technologií FDM se dá tisknout celá škála termoplastů. Mezi nejčastější používané termoplasty patří akrylonitril-butadien-styren (ABS), polylaktid (PLA), polykarbonát (PC) a polyamidy (PA). [2]

Materials	Extrusion temperature [°C]	Bed temperature [°C]
PLA	175 ÷ 220	60 ÷ 90
ABS	230 ÷ 260	80 ÷ 100
HIPS	220 ÷ 250	80 ÷ 110
PC	290 ÷ 315	110 ÷ 130
PA	240 ÷ 280	100 ÷ 120
TPU	195 ÷ 230	60 ÷ 90
PVDF	210 ÷ 215	120 ÷ 125
PEEK	360 ÷ 400	110 ÷ 120
PEI	330 ÷ 360	110 ÷ 160

Obr. 15- Některé materiály a teploty při jejich tisku [6]

ABS

ABS (akrylonitril-butadien-styren) je nejčastější termoplast používaný pro výrobu prakticky čehokoliv od hudebních nástrojů po automobilové komponenty. Lze ho recyklovat. ABS má vysokou schopnost adheze, takže umožňuje vysoké rychlosti tisku. ABS má velkou teplotní roztažnost a z toho vyplývá velká tendence se deformovat. Se zvyšující se velikostí výrobku roste i vzniklá deformace. Tato skutečnost může být eliminována pomocí vyhřívání podložky nebo komory. Je k dispozici v různých barvách. ABS byl prvním dostupným tiskovým materiálem. S vývojem 3D tisku se mění i nabídka materiálů a neustále se vylepšují jejich tiskové vlastnosti a kvalita. Jako nová alternativa k ABS byl vytvořen ASA (akrylonitril-styren-akryl), který má oproti ABS vyšší odolnost proti povětrnostním podmínkám a proti UV záření. [1] [6] [14]

PLA

PLA (polylaktid) je termoplastický alifatický polyester získaný z obnovitelných zdrojů, jako jsou kukuřičné škroby, takže je biologicky rozložitelný a kompostovatelný. Je cenově dostupný, snadno se používá a je také vhodný pro tisk malých a členitých objektů. Stejně jako u ABS jsou u PLA možné vysoké rychlosti tisku. Je rozměrově stabilní, má malou teplotní roztažnost a může tedy být použit bez potřeby vyhřívané podložky. Je tvrdší než ABS, ale zároveň poměrně křehký. Vykazuje vyšší tření, a proto je náchylnější k ucpání extrudéru. PLA je citlivý na teplo a vlhkost a není proto ideální pro použití ve venkovním prostředí nebo v prostředí s vysokou teplotou. Stejně jako ABS je dostupný v široké škále barev. [1] [6]

HIPS

HIPS (High Impact Polystyrene) je termoplastické vlákno s nízkou deformací. Snadno se natírá a lepí a je to jeden z nejlépejších materiálů používaných pro FDM. Často se používá pro předvýrobu prototypů díky své velké rozměrové stabilitě. Z hlediska zpracovatelských vlastností je velmi podobný ABS. Oba materiály však pracují s různými rozpouštědly: limonen pro HIPS a aceton pro ABS. Z toho vyplývá, že HIPS může být použit jako podpůrný materiál pro tisk z ABS. [6]

PC

PC (Polykarbonát) je polymer s vysokou odolností proti nárazu u součástí, které jsou vystaveny mechanickému namáhání. Má také dobrou teplotní odolnost. PC má vyšší tendenci se deformovat než ABS nebo PLA, je proto nutné použití vyhřívané podložky nebo komory. PC je navíc velmi hygroskopický a absorbuje vlhkost ze vzduchu, což může způsobit problémy při zpracování. PC se dodává v černé nebo bílé barvě, případně průhledný. [6]

PA

PA (Polyamid) je známější pod svým komerčním názvem Nylon. Výtisky z polyamidu jsou ohebné a odolné proti opotřebení. Na rozdíl od ABS a PLA je PA méně křehký, a proto silnější. Jeho vlastnosti jsou ideální pro výrobu ozubených kol nebo matic pro šrouby. Po nanesení jednotlivých vrstev se PA smršťuje více než ostatní materiály. Z tohoto důvodu má tendenci se více deformovat než ABS a PLA a adheze k podložce je problematictější. [6]

3.2.7 Shrnutí

FDM v současné době představuje technologii spolehlivou, s počáteční investicí nižší než u konkurenčních technologií a také s nízkou cenou používaných materiálů. Může být provozována i v kancelářském prostředí, má nízké množství odpadního materiálu a umožňuje použití různých materiálů nebo barev u jednotlivých předmětů. Na druhou stranu použité materiály musí mít nízkou teplotu tání, a pokud výrobek vyžaduje podpěry, může mít špatnou kvalitu povrchu a bude potřeba následná povrchová úprava. [1]

4 Výtah z normy ČSN EN ISO 527

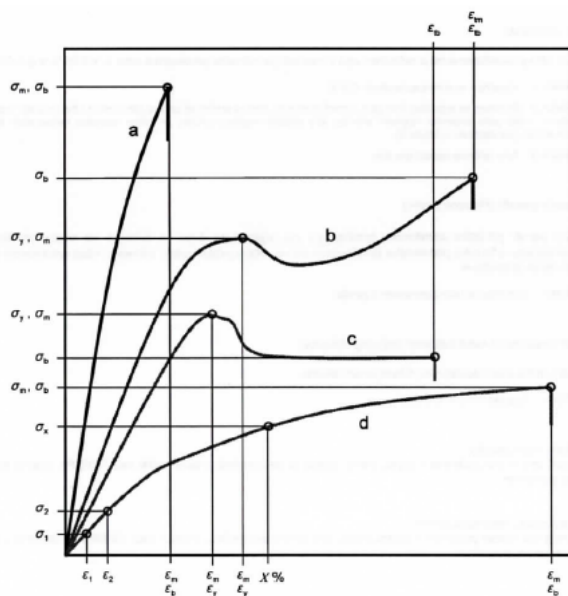
Norma ČSN EN ISO 527 Plasty-Stanovení tahových vlastností je českou verzí evropské normy EN ISO 527.

4.1 ČSN EN ISO 527-1

V této části ISO 527 jsou specifikovány obecné zásady pro stanovení tahových vlastností plastů a plastových kompozitů za definovaných podmínek zkoušení. Je definováno několik typů zkušebních těles vhodných pro různé typy materiálů, které jsou podrobně popsány v následujících částech ISO 527. Uvedené metody se používají k vyhodnocování chování zkušebních těles při namáhání v tahu a pro stanovení meze pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tah a dalších tahových charakteristik ze závislosti napětí v tahu/poměrné prodloužení za daných podmínek.

Tyto metody jsou podle výběru vhodné pro následující rozsah materiálů:

- tuhé a polotuhé termoplasty pro tváření, vytlačování a lití;
- tuhé a polotuhé reaktoplasty pro tváření;
- kompozity plněné vlákny na bázi reaktoplastů a termoplastů;
- termotropní polymery na bázi tekutých krystalů.



Obr. 16- Typické křivky napětí/poměrné prodloužení [15]

4.1.1 Podstata a metody zkoušky

Zkušební těleso je protahováno 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.

Metody používají zkušební tělesa, která mohou být buď tvářená na zvolené rozměry, nebo obrobena, vyřezaná nebo vyseknutá z hotových výrobků a polotovarů, jako jsou výlisky, lamináty, fólie a vytlačované nebo lité desky.

Metody specifikují preferované rozměry zkušebních těles. Zkoušky, které se provádějí na zkušebních tělesech o jiných rozměrech nebo na zkušebních tělesech, která se připravují za jiných podmínek, mohou vést k výsledkům, které nejsou srovnatelné. Výsledky mohou ovlivnit také další faktory, jako je zkušební rychlost a kondicionování zkušebních těles.

4.1.2 Zkušební zařízení

Stroj musí vyhovovat ISO 7500-1 a ISO 9513. Musí být schopen udržovat zkušební rychlost specifikovanou na Obr. 17.

Zkušební rychlost v mm/min	Tolerance %
0,125	±20
0,25	
0,5	
1	
2	
5	
10	
20	±10
50	
100	
200	
300	
500	

Obr. 17- Doporučené zkušební rychlosti [15]

Upínací čelisti musí být připevněny ke stroji tak, aby hlavní osa zkušebního tělesa byla shodná se směrem protahování a procházela osou sestavy čelisti. Zkušební těleso musí být v čelistech upevněno tak, aby nedocházelo k jeho vyklouzávání. Upínací systém nesmí způsobit předčasné porušení nebo rozmačkání zkušebního tělesa v čelistech. Pro stanovení modulu pružnosti v tahu je nezbytné,

aby rychlost deformace byla konstantní a neměnila se, například v důsledku pohybu čelistí. Je to důležité zejména v případě použití klínových čelistí.

Kontaktní extenzometry musí vyhovovat třídě 1 ISO 9513:1999. Přesnosti této třídy musí být dosaženo v rozsahu poměrného prodloužení, ve kterém jsou měření prováděna. Mohou se použít také bezkontaktní extenzometry za předpokladu, že splňují stejné požadavky na přesnost.

Extenzometr musí být schopen stanovit změnu počáteční měřené délky zkušební tělesa v kterémkoliv okamžiku zkoušky. Je vhodné, ale není to podmínkou, aby tento přístroj byl schopen zaznamenávat tuto změnu automaticky.

Při stanovení modulu pružnosti v tahu se musí použít přístroj schopný měřit změnu počáteční měřené délky s přesností na 1 % příslušné hodnoty nebo lepší.

Frekvence sběru dat potřebných pro zaznamenávání údajů (síla, deformace, prodloužení) musí být dostatečně vysoká, aby byly splněny požadavky na přesnost. Minimální frekvence dat potřebná pro integrální přenos ze snímače na indikátor se pak vypočítá jako

$$f_{min} = \frac{v}{60} * \frac{L_0}{L * r}. \quad (1)$$

Záznamová frekvence při měření síly se vypočítá jako

$$f_{sila} = \frac{E * A * v}{E * A * \Delta \epsilon * 60 * L * 5 * 10^{-3}}. \quad (2)$$

4.1.3 Zkušební tělesa

Kdykoli je to možné, používají se zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek typu 1A a 1B podle Obr. 18 a Obr. 19. Typ 1A se používá pro vstříkovaná víceúčelová zkušební tělesa, typ 1B pro mechanicky obráběná zkušební tělesa.

Zkušební tělesa musí být buď přímo vstříkována nebo lisována z materiálu v souladu s ISO 293, ISO 294-1, ISO 295 nebo ISO 10724-1, podle vhodnosti, nebo obráběná v souladu s ISO 2818 z desek, které byly připraveny vstříkáním nebo lisováním ze směsi nebo zhotoveny z litých nebo vytlačovaných desek (tenkých desek). Podmínky tváření musí být v souladu s příslušnou mezinárodní normou pro materiály, nebo dohodnuté mezi zúčastněnými stranami, pokud norma neexistuje.

Je nezbytná přísná kontrola všech podmínek přípravy zkušebních těles, aby se zajistilo, že všechna

zkušební tělesa v souboru jsou skutečně ve stejném stavu. Všechny plochy zkušebního tělesa musí být bez viditelných trhlin, škrábanců či jiných vad.

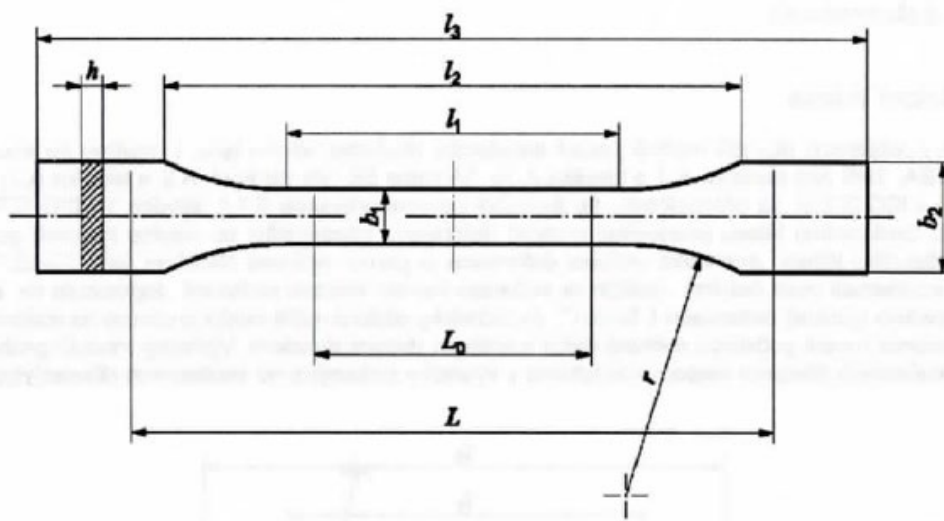
V případě použití optického extenzometru, zvláště u tenkých desek a fólií, je nutné vyznačit na zkušebních tělesech značky pro počáteční měřenou délku. Tyto musí být vyznačeny ve stejné vzdálenosti od středu zkušebního tělesa a počáteční měřená délka musí být změřena s přesností na 1 % nebo lepší.

V ideálním případě nesmějí být zkušební tělesa zkroucená a musí mít vzájemně kolmé dvojice paralelních ploch. Plochy a hrany musí být bez poškrábání, dolíků, propadlin a přetoků.

Splnění těchto požadavků se u zkušebních těles vizuálně kontroluje pomocí rovinné pravoúhlé desky s přímými okraji a mikrometrem. Tělesa vykazující prohlídkou nebo měřením nedodržení jednoho nebo více požadavků musí být vyřazena.

Pro každý z požadovaných směrů zkoušení se musí zkoušet minimálně pět zkušebních těles. Počet měření smí být větší než pět, jestliže je požadovaná větší preciznost střední hodnoty. Tu je možno vyhodnotit pomocí intervalu spolehlivosti (95% pravděpodobnost, viz ISO 2602).

Zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek, která se přetrhnou nebo posunou u čelistí, musí být vyřazena a musí se zkoušet další zkušební tělesa. Hodnoty odlišné z jiného důvodu však nesmějí být vyloučeny, protože kolísání takových hodnot je funkcí proměnlivé povahy (nehomogenity) zkoušeného materiálu.



Obr. 18- Zkušební tělesa typu 1A a 1B [15]

Typ zkušebního tělesa		1A	1B
l_3	Celková délka ^a	170	≥ 150
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	80 ± 2	60,0 ± 0,5
r	Poloměr	24 ± 1	60 ± 0,5
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami ^b	109,3 ± 3,2	108 ± 1,6
b_2	Šířka konců	20,0 ± 0,2	
b_1	Šířka zúžené části	10,0 ± 0,2	
h	Doporučená tloušťka	4,0 ± 0,2	
L_0	Počáteční měřená délka (preferovaná)	75,0 ± 0,5	50,0 ± 0,5
	Počáteční měřená délka (přípustná, jestliže se požaduje pro řízení kvality nebo když je předepsána)	50,0 ± 0,5	
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	115 ± 1	115 ± 1
^a Doporučená celková délka 170 mm pro typ 1A je v souladu s ISO 294-1 a ISO 10724-1. U některých materiálů smí být délka lopatek prodloužena (např. $l_3 = 200$ mm), aby se zabránilo porušení nebo prokluzování tělesa v upínacích čelistech zkušebního stroje.			
^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, pro l_1 , r , b_1 a b_2 , musí však být v určených mezích.			

Obr. 19- Rozměry zkušebních těles typu 1A a 1B [15]

4.1.4 Postup

4.1.4.1 Rozměry zkušebního tělesa

Rozměry zkušebních těles se stanoví podle ISO 16012, popř. ISO 23529. Zaznamenají se minimální a maximální hodnoty šířky a tloušťky každého zkušebního tělesa ve středu tělesa a do 5 mm od každého konce počáteční měřené délky, a ověří se, zda jsou v tolerancích uvedených v normě pro daný materiál. Střední hodnoty naměřených šířek a tloušťek se použijí k výpočtu průřezu zkušebního tělesa.

4.1.4.2 Upínání

Zkušební těleso se vloží do čelistí stroje tak, že podélná osa zkušebního tělesa je shodná s osou zkušebního stroje. Čelisti se rovnoměrně a pevně utáhnou, aby se zabránilo vyklouznutí zkušebního tělesa a pohybu čelistí během zkoušky. Upínací tlak nesmí způsobit zlomení nebo rozmačkání zkušebního vzorku.

4.1.4.3 Předpětí

Zkušební těleso nesmí být před zkoušením vystaveno znatelnému napětí. Taková napětí mohou vzniknout při centrování zkušebního tělesa z fólie, nebo mohou být způsobena tlakem čelistí, zejména

u méně tuhých materiálů. Jsou však nutná, aby nevznikla náběhová oblast na začátku diagramu napětí/poměrné prodloužení. Předpětí σ_0 na začátku zkoušky musí být pozitivní, ale nesmí překročit následující hodnoty pro měření modulu:

$$0 < \sigma_0 < E_t/2000,$$

což odpovídá počátečnímu poměrnému prodloužení $\varepsilon_0 \leq 0,05 \%$.

Jestliže hodnota modulu pružnosti nebo napětí potřebného pro nastavení předpětí není známa, provede se předběžná zkouška s cílem získat odhad těchto hodnot.

4.1.4.4 Nastavení extenzometrů

Po nastavení předpětí se na počáteční měřenou délku zkušební tělesa připevní a nastaví kalibrovaný extenzometr. V případě potřeby se změří počáteční vzdálenost (počáteční měřená délka).

4.1.5 Výpočet a vyjádření výsledků

Všechny hodnoty napětí se vypočítají pomocí rovnice

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (3)$$

kde je

σ hodnota příslušného napětí, vyjádřená v megapascálech,

F příslušná naměřená síla, vyjádřená v newtonech,

A počáteční průřez zkušební tělesa, vyjádřený v milimetrech čtverečných.

Poměrná prodloužení se vypočítají podle rovnice

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (4)$$

kde je

ε hodnota příslušného poměrného prodloužení, vyjádřená jako bezrozměrný poměr,

l_0 počáteční měřená délka zkušební tělesa, vyjádřená v milimetrech,

Δl zvětšení počáteční měřené délky zkušební tělesa, vyjádřené v milimetrech.

Stanovením hodnot poměrného prodloužení pomocí extenzometru se zjistí průměr poměrného prodloužení měřené délky.

Modul pružnosti v tahu určený jako sečna křivky napětí/poměrné prodloužení se vypočítá podle rovnice

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \quad (5)$$

kde je

E_t modul pružnosti v tahu, vyjádřený v megapascalch,

σ_1 napětí, vyjádřené v megapascalch, naměřené při hodnotě poměrného prodloužení

$\varepsilon_1=0,0005$ (0,05 %),

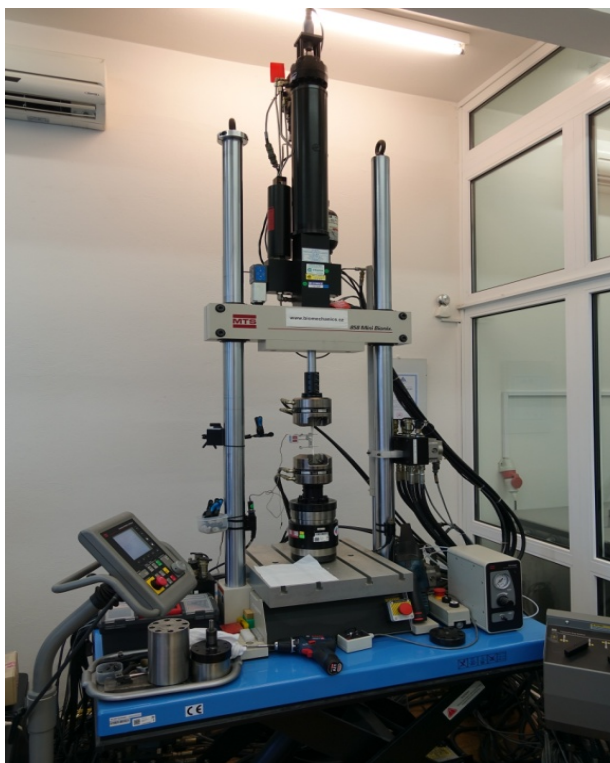
σ_2 napětí, vyjádřené v megapascalch, naměřené při hodnotě poměrného prodloužení $\varepsilon_2=0,0025$ (0,25 %).

Z výsledků provedených tahových zkoušek se vypočítají aritmetické průměry, a je-li požadována, směrodatná odchylka a 95% interval spolehlivosti průměrných hodnot podle postupu uvedeného v ISO 2602. [15] [16]

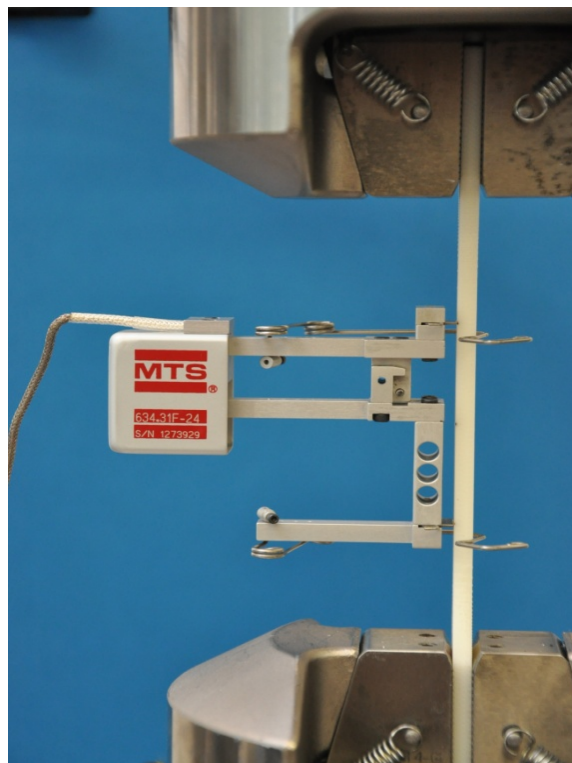
5 Tahové zkoušky a jejich vyhodnocení

5.1 Použitá zařízení a laboratoř

Statické zkoušky jsem provedl v Laboratoři mechanických zkoušek, která je součástí Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, Fakulty strojní ČVUT v Praze. Jako zkušební stroj byl při tahových zkouškách použit testovací systém MTS 858.5 Mini Bionix. Nejistota měření silového snímače pro rozsah sil (0–1500) N je 0,25 % z aktuální měřené hodnoty. Změna délky vzorků byla měřena pomocí extenzometru připevněného na vzorcích. Tahové zkoušky proběhly při teplotě vzduchu (24,2 – 26,7) °C a vzdušné vlhkosti (29,1 – 38,7) %. Pro proměrování testovaných vzorků byl použit mikrometr s plochými měřicími hroty o nejistotě měření 0,002 mm.



Obr. 20- Zkušební stroj Mini Bionix



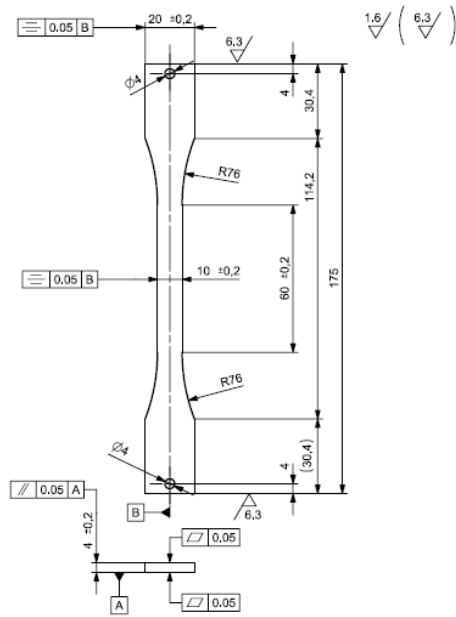
Obr. 21- Detail připevněného extenzometru

5.2 Zkušební vzorky

V této části bakalářské práce popíši testovací vzorky použité při provedených tahových zkouškách.

5.2.1 Tvar a rozměry

Zkušební vzorky pro tahové zkoušky mají typický tvar, viz Obr. 22. Tloušťku a šířku vzorku v pracovní oblasti jsem přeměřil ve třech řezech a následně ve výpočtech použil průměrné hodnoty.



Obr. 22- Tvar a rozměry zkušebního tělesa

5.2.2 Materiál a výroba

Všechny použité zkušební vzorky byly vyrobeny technologií FDM na stroji Stratasys Fortus 450mc, liší se pouze v úhlu natočení podložky při jejich tisku a druhu použitého rastru. Jako materiál byl ve všech případech použit polymer ABS M30 dodávaný firmou Stratasys ve formě vlákna.



Obr. 23- Stratays Fortus 450mc

Základní nastavení stroje Stratasys Fortus 450mc použité při tisku vzorků:

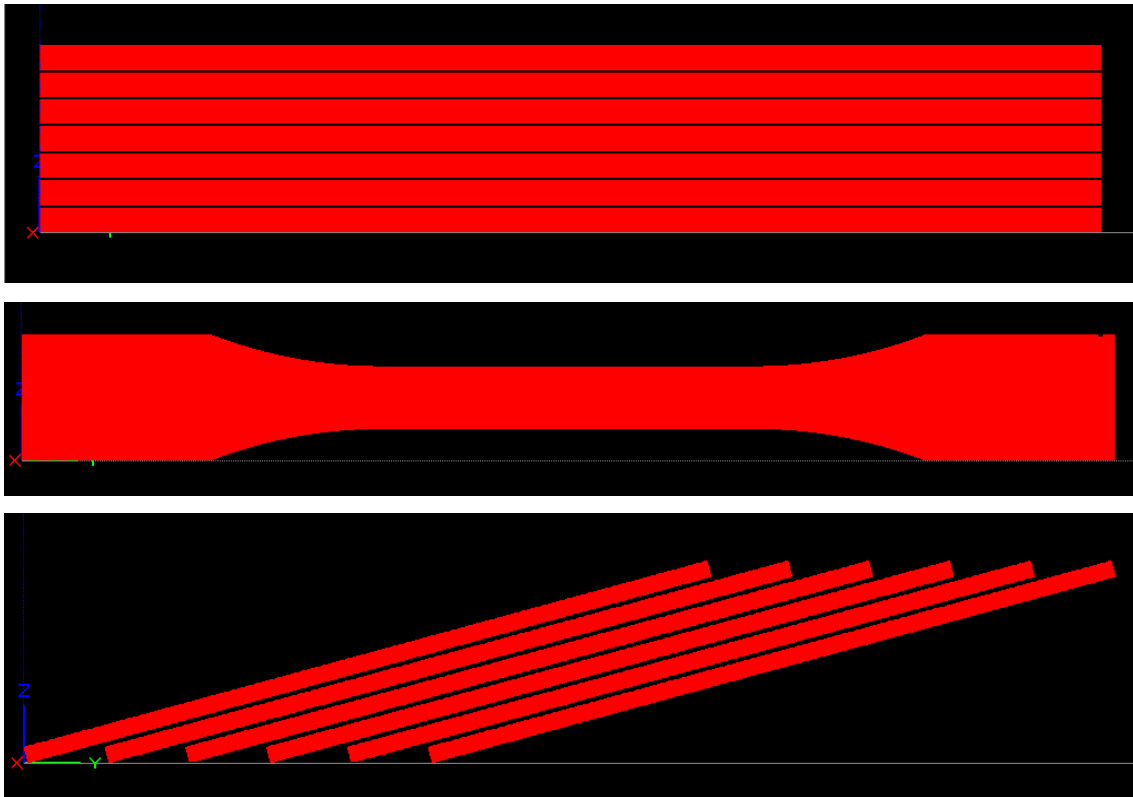
- tloušťka vrstvy- 0,1781 mm;
- tloušťka kontury- 0,4298 mm;
- tloušťka rastru- 0,4298 mm;
- mezera mezi konturou a rastrem- -0,005 mm.

Skupiny vzorků, které byly použity:

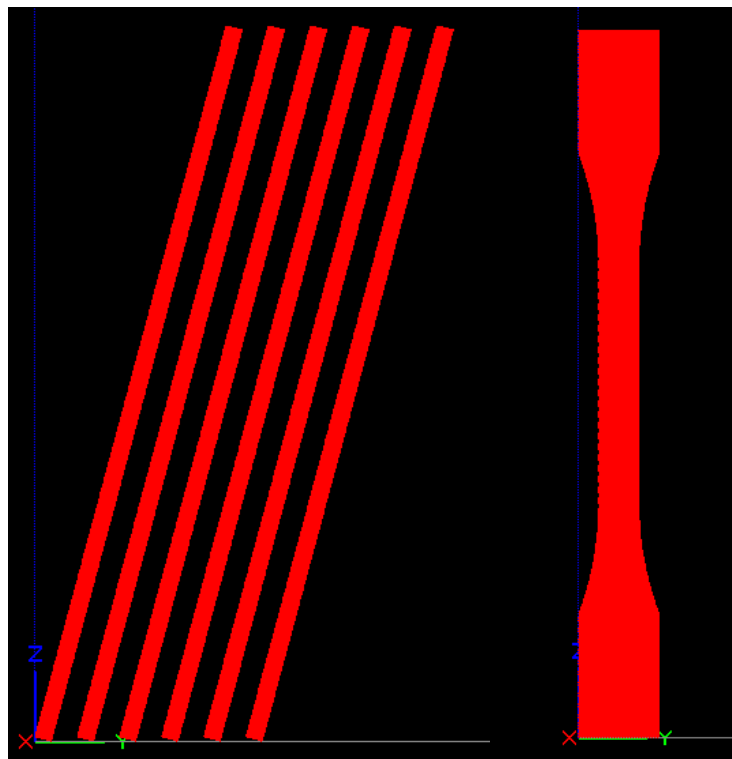
1. ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0° , výplň +/- 45°);
2. ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň +/- 45°);
3. ABS M30 (úhel 15° , výplň +/- 45°);
4. ABS M30 (úhel 30° , výplň +/- 45°);
5. ABS M30 (úhel 45° , výplň +/- 45°);
6. ABS M30 (úhel 60° , výplň +/- 45°);
7. ABS M30 (úhel 75° , výplň +/- 45°);
8. ABS M30 (svislý, úhel 90° , výplň +/- 45°);
9. ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň (0° , 90°));
10. ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0° , výplň (0° , 90°));
11. ABS M30 (svislý, úhel 90° , výplň (0° , 90°)).

První údaj v závorce nám říká úhel, ve kterém byl vzorek vytištěn (horizontální= 0° , svislý= 90°).

Následně je u některých vzorků určena orientace, buď na hraně, nebo na plochu a údaj o výplni nám říká sklon použitého rastru. Tyto údaje můžeme vidět také na následujících obrázcích z programu Insight. Tisková podložka leží v rovině XY.

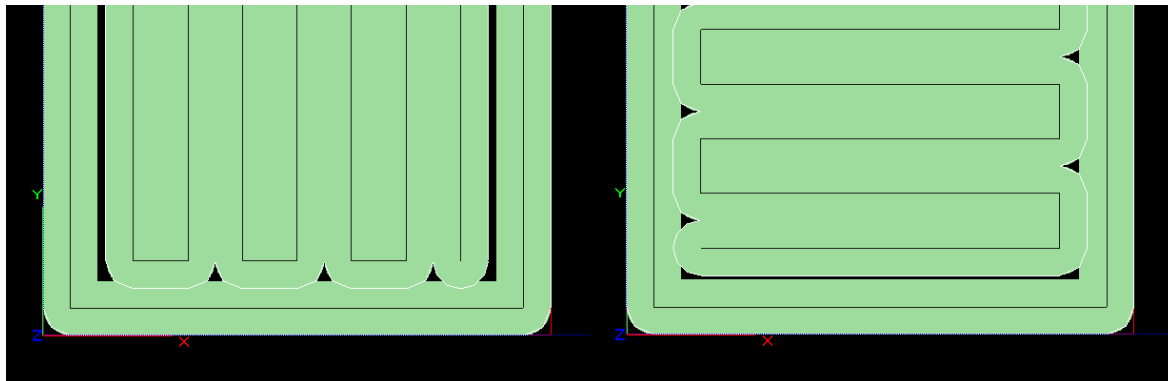


Obr. 24- Znáznornění orientace vzorků při tisku (plochý, úhel 0° ; na hraně, úhel 0° ; plochý, úhel 15°)

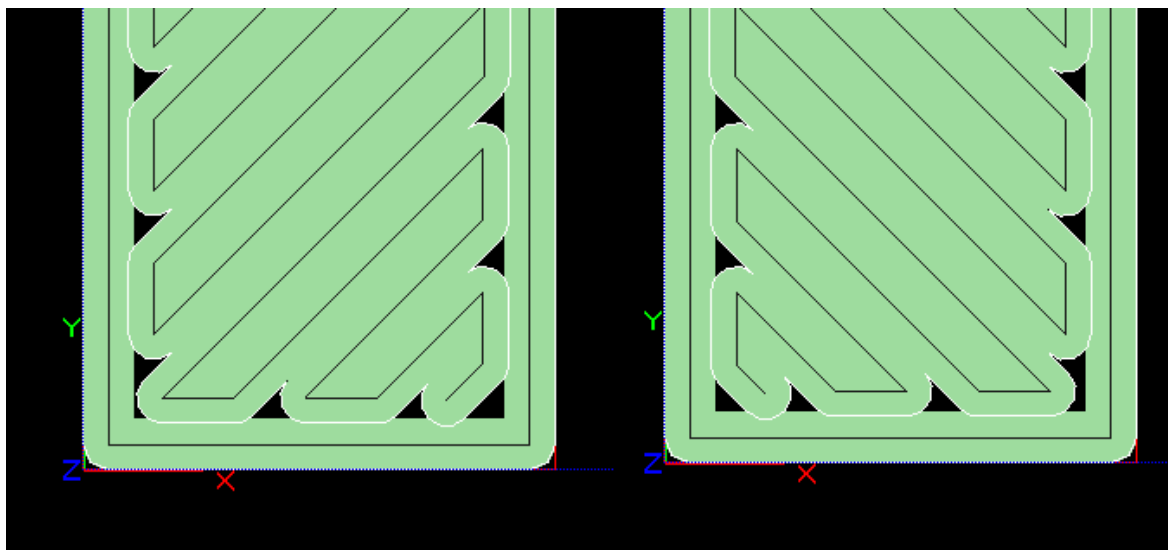


Obr. 25- Znáznornění orientace vzorků při tisku (plochý, úhel 75° ; svislý, úhel 90°)

Sklopy rastru jsou také znázorněny na obrázcích z programu Insight pro vzorky na hraně.



Obr. 26- Znázornění sklonu rastru vzorku na hraně (0° , 90°)



Obr. 27- Znázornění sklonu rastru vzorku na hraně ($\pm 45^\circ$)

Z obrázku lze vidět, že při sklonu rastru 0° , 90° vznikají ve vzorcích dlouhé mezery, které potenciálně mohou ovlivňovat pevnost vzorku.

5.3 Příprava zkoušky

Nejprve jsem si předem vytištěné vzorky rozdělil do jedenácti skupin po šesti, podle úhlu a sklonu rastru. Pomocí mikrometru jsem změřil ve třech řezech prostřední části vzorku šířku a tloušťku a jejich průměr jsem použil na další výpočty. Na vzorky jsem následně fixou vyznačil měřenou oblast extenzometru, v mém případě to bylo 48 cm.

5.4 Průběh zkoušky

Jak jsem psal výše, tahové zkoušky proběhly v Laboratoři mechanických zkoušek na Ústavu

mechaniky, biomechaniky a mechatroniky. Testování probíhalo chronologicky, nejdříve proběhl test šesti vzorků jedné skupiny a poté se testovala další. Vzorek byl nejprve umístěn do horní a dolní hydraulické čelisti a poté na něj byl připevněn extenzometr tak, aby jeho čelisti byly na předem vyznačených značkách. Vzorek byl nejprve třikrát tahově zatížen a odlehčen, abychom mohli zjistit modul pružnosti v tahu. Použitá síla byla menší než odhadovaná mez pružnosti daného vzorku, aby nedošlo k plastické deformaci uvnitř vzorku. Následně byl vzorek zatěžován, dokud nedošlo k jeho přetržení. Rychlost zatěžování byla u všech vzorků 5 mm/min. U skupiny vzorků ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň $\pm 45^\circ$) nedošlo u prvního vzorku k přetržení, proto jsme museli upravit měřenou délku extenzometru. Pro druhý vzorek ze série byla délka upravena na 45 mm, ani tak ale nedošlo k přetržení. U třetího vzorku byla použita délka 20 mm a s touto měřenou délkou extenzometru už byly zbývající zkoušky úspěšné. Měnit měřenou délku extenzometru bylo nutné, neboť byl dvakrát překročen jeho rozsah. Na výpočet modulu pružnosti v tahu tyto neúspěchy neměly vliv a pro výpočet maximálního napětí jsem použil hodnoty maximální síly z prvního zatěžování vzorků.



Obr. 28- Zkušební vzorky před zkouškou



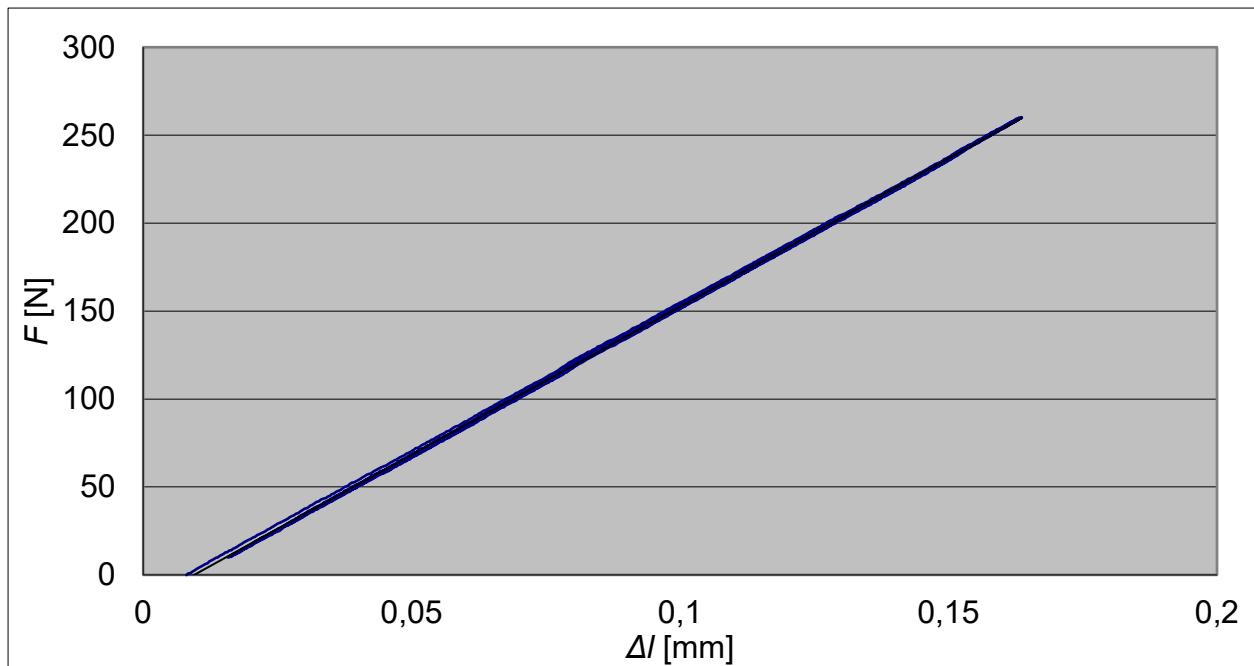
Obr. 29- Zkušební vzorky po zkoušce

5.5 Zpracování naměřených hodnot

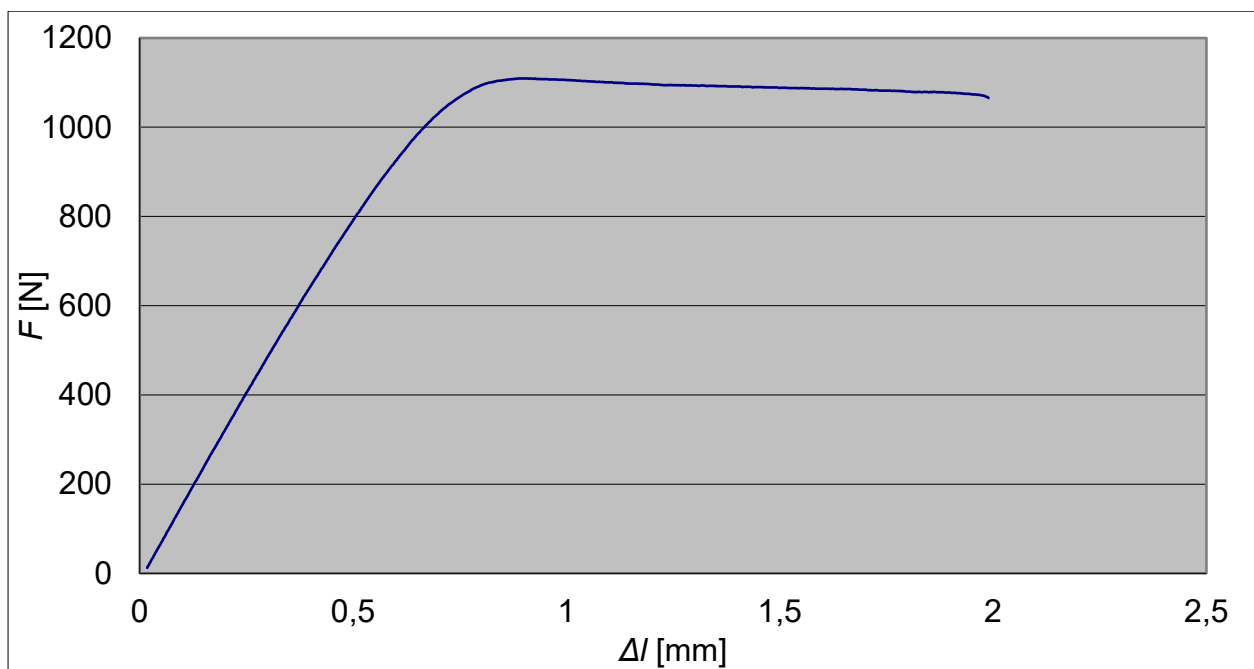
V této části bakalářské práce jsou uvedeny výsledky mých měření a jejich zpracování.

5.5.1 Modul pružnosti v tahu E

Hodnoty axiální síly působící na vzorek a prodloužení vzorku naměřené pomocí MTS 858.2 Mini Bionix a extenzometru jsem vložil do programu Microsoft Excel a vytvořil z nich dva grafy.



Obr. 30- Graf závislosti prodloužení na zatěžující síle (první tři zatížení)



Obr. 31- Graf závislosti prodloužení na zatěžující síle (zatížení do přetržení)

První graf (Obr. 30) ukazuje závislost axiální síly na prodloužení vzorku během prvních tří zatěžujících fází. Druhý graf (Obr. 31) ukazuje stejnou závislost během poslední fáze, která vedla až k přetržení vzorku. Grafy znázorňující zatěžování nezačínají v bodě [0,0], neboť při připevňování extenzometru vzniknou malé síly a prodloužení, které přístroje zaznamenají. Z prvního grafu každého

vzorku jsem následně použil 3 části grafu zaznamenávající odlehčování a z jejich počátečních a koncových bodů zjistil poměr $\Delta F/\Delta l$. Tento poměr jsem následně dosadil do vzorce (6) a zjistil tak hodnoty modulů pružnosti v tahu. Během odlehčujících fází se zatěžující síla snížila na hodnotu 10 N, a proto na mé výpočty neměly vliv síly a prodloužení, které vznikly při připevňování extenzometru.

$$E = \frac{\Delta F * l_0}{A * \Delta l} \quad (6)$$

Z těchto hodnot jsem určil aritmetický průměr u jednotlivých skupin a hodnoty jsem spolu se směrodatnou odchylkou (SD) zanesl do Tab. 1.

Tab. 1: Zjištěné hodnoty modulu pružnosti v tahu E

Vzorek	E průměr [MPa]	E SD [MPa]	E SD [%]
ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň +/- 45°)	2056,52	13,33	0,65
ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň +/- 45°)	1813,38	44,58	2,46
ABS M30 (úhel 15°, výplň +/- 45°)	1687,65	43,45	2,57
ABS M30 (úhel 30°, výplň +/- 45°)	1583,23	22,88	1,45
ABS M30 (úhel 45°, výplň +/- 45°)	1821,16	31,65	1,74
ABS M30 (úhel 60°, výplň +/- 45°)	1803,24	19,68	1,09
ABS M30 (úhel 75°, výplň +/- 45°)	1882,13	10,12	0,54
ABS M30 (svislý, úhel 90°, výplň +/- 45°)	1866,70	64,40	3,45
ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň (0°, 90°))	1715,57	33,27	1,94
ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň (0°, 90°))	2019,06	22,59	1,12
ABS M30 (svislý, úhel 90°, výplň (0°, 90°))	1715,57	33,27	1,94

5.5.2 Pevnost v tahu σ_{max}

Jako další jsem z naměřených hodnot zjistil maximální napětí v každém ze vzorků podle vzorce

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A}. \quad (7)$$

Zjištěné hodnoty jsou spolu se směrodatnou odchylkou (SD) zaneseny v Tab. 2.

Tab. 2: Zjištěné hodnoty maximálního napětí σ_{max}

Vzorek	σ_{max} průměr [MPa]	σ_{max} SD [MPa]	σ_{max} SD [%]
ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň +/- 45°)	27,755	0,195	0,704
ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň +/- 45°)	26,062	0,387	1,486
ABS M30 (úhel 15°, výplň +/- 45°)	22,644	0,350	1,548
ABS M30 (úhel 30°, výplň +/- 45°)	20,732	0,873	4,209
ABS M30 (úhel 45°, výplň +/- 45°)	21,421	0,879	4,101
ABS M30 (úhel 60°, výplň +/- 45°)	19,428	0,691	3,557
ABS M30 (úhel 75°, výplň +/- 45°)	18,569	2,103	11,323
ABS M30 (svislý, úhel 90°, výplň +/- 45°)	17,747	2,201	12,403
ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň (0°, 90°))	20,893	0,549	2,626
ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň (0°, 90°))	26,103	0,229	0,878
ABS M30 (svislý, úhel 90°, výplň (0°, 90°))	16,584	2,179	13,139

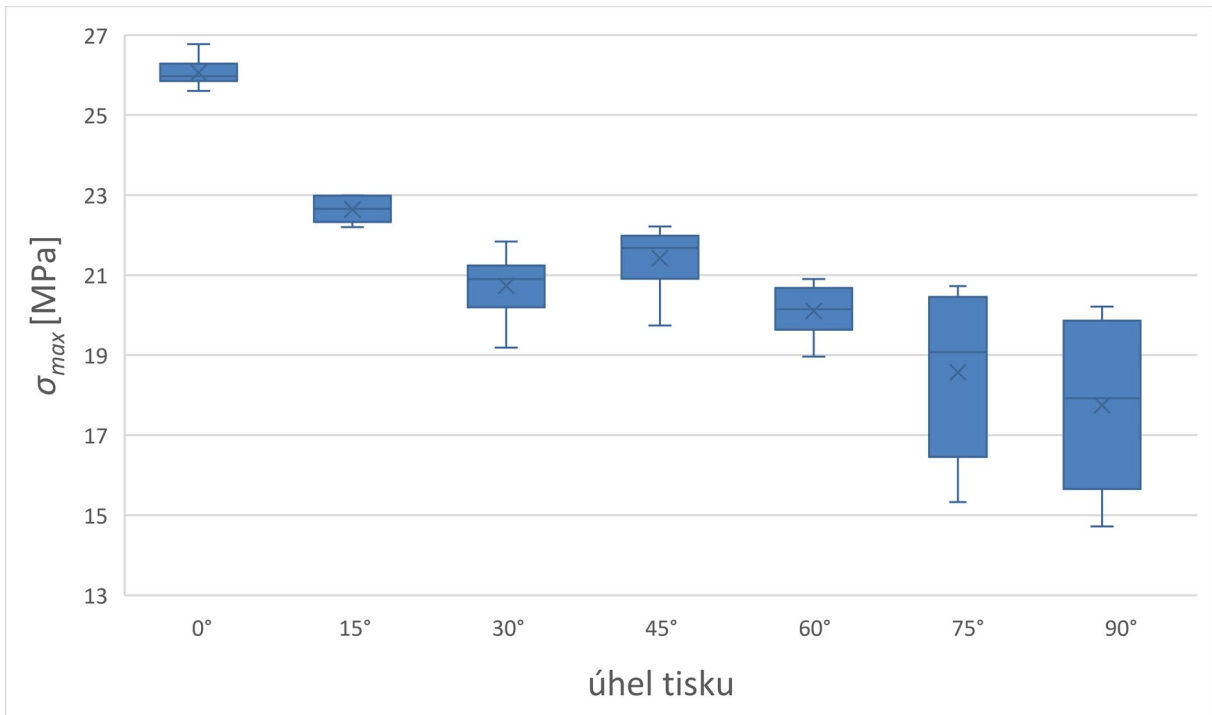
5.5.3 Statistické zpracování naměřených hodnot

Hypotézy, které jsem si na začátku stanovil, jsem testoval pomocí metody ANOVA. ANOVA neboli analýza rozptylu je statistická metoda, která umožňuje provádět vícenásobné porovnávání středních hodnot. Je založena na hodnocení vztahů mezi rozptyly porovnávaných výběrových souborů. Analýzu jsem provedl pomocí programu Microsoft Excel. Hladina významnosti testu α byla zvolena 0,05, čímž dostaneme 95 % pravděpodobnost správného rozhodnutí. Pokud vyjde v analýze P menší než 0,05 a zároveň hodnota F_{krit} menší než hodnota F , je možné zamítnout nulovou hypotézu. Ta předpokládá, že jsou prvky výběru nezávislé a vliv parametrů vzorků na sledované hodnoty bude potvrzen. [17] [18]

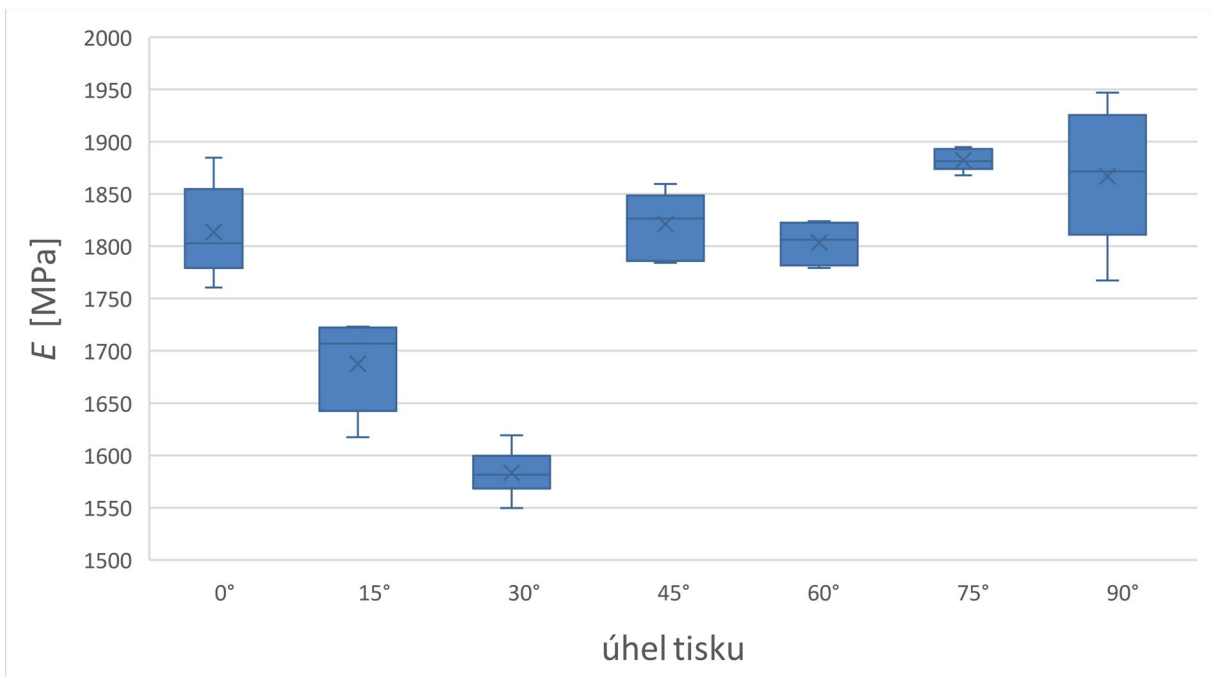
5.5.3.1 Vliv úhlové orientace vzorku při stavbě na mechanické vlastnosti

Nejprve jsem ověřil, zda úhel, při kterém byly vzorky vytištěny, ovlivňuje sledované hodnoty. Do analýzy rozptylu jsem zahrnul „ploché“ vzorky s výplní +/- 45° a různými úhly tisku (podle číselného označení v seznamu vzorků to jsou čísla 2-8).

V následujících krabicových grafech jsou vyneseny zjištěné hodnoty σ_{max} a E u vzorků s různým úhlem sklonu při tisku.



Obr. 32- Krabicový graf maximálního napětí σ_{max} pro ABS M30 (horizontální, ploché, výplň +/- 45°)



Obr. 33- Krabicový graf modulu pružnosti E pro ABS M30 (horizontální, ploché, výplň +/- 45°)

V následujících tabulkách jsou výsledky provedené analýzy rozptylu.

Tab. 3: Analýza rozptylu daných vzorků při testování vliv úhlu na modul pružnosti E

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	411258,001	6	68543,0002	47,8006578	1,99633E-15	2,3717812
Všechny výběry	50187,6987	35	1433,93425			
Celkem	461445,7	41				

Tab. 4: Analýza rozptylu daných vzorků při testování vliv úhlu na maximální napětí σ_{max}

<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>
Mezi výběry	275,188473	6	45,8647456	27,7977144	6,11149E-12	2,3717812
Všechny výběry	57,7481326	35	1,64994664			
Celkem	332,936606	41				

Význam položek v Tab. 3 je následující:

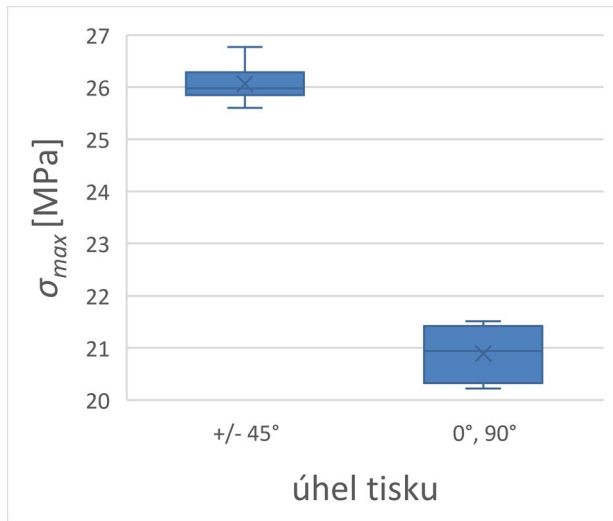
- SS – součet čtverců (sum of squares), představují variabilitu uvnitř a mezi skupinami;
- MS – průměrný čtverec (mean square), udává průměrnou variabilitu uvnitř a mezi skupinami;
- F – hodnota Fisherova rozdělení (F-distribution), značí poměr vlivu faktoru a šumu, tedy poměr rozptylů mezi skupinami a rozptylů uvnitř skupin, křivka F rozdělení se mění v závislosti na stupních volnosti;
- P – pravděpodobnost nulové hypotézy (P -value), vypovídá o možném významném rozdílu mezi skupinami;
- F_{krit} – tabulková kritická hodnota, její poměr s F může zamítnout nulovou hypotézu.

Z obou tabulek lze vidět, že hodnota F_{krit} je nižší, než hodnota F a zároveň je P menší než 0,05. Díky těmto skutečnostem lze zamítnout nulovou hypotézu a prohlásit, že úhlová orientace vzorku při stavbě má vliv na sledované hodnoty vzorků.

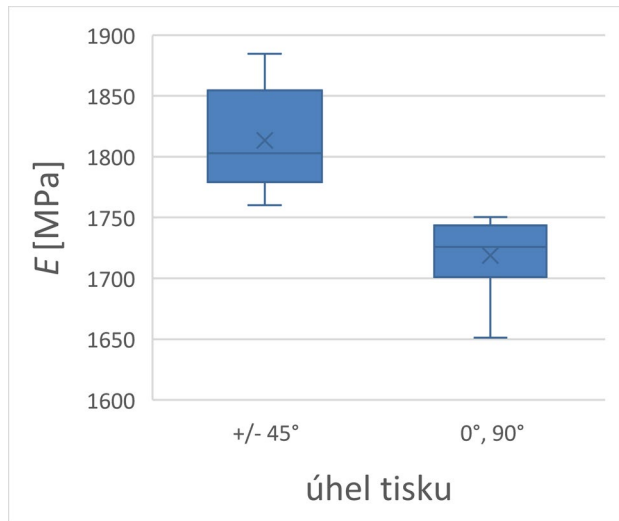
5.5.3.2 Vliv úhlové orientace výplně na mechanické vlastnosti

Dále jsem ověřoval hypotézu, jestli má úhlová orientace výplně vliv na sledované hodnoty. Pro tyto účely jsem porovnával dvojice skupin vzorků se stejným úhlem tisku, ale rozdílným sklonem výplně (jsou to dvojice skupin 2,9; 1,10; 8,11).

V následujících krabicových grafech jsou vyneseny zjištěné hodnoty σ_{max} a E u vzorků ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°) s různým úhlem sklonu výplně.



Obr. 34- Krabicový graf σ_{max} pro ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°)



Obr. 35- Krabicový graf modulu pružnosti E pro ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°)

V následujících tabulkách jsou výsledky provedené analýzy rozptylu.

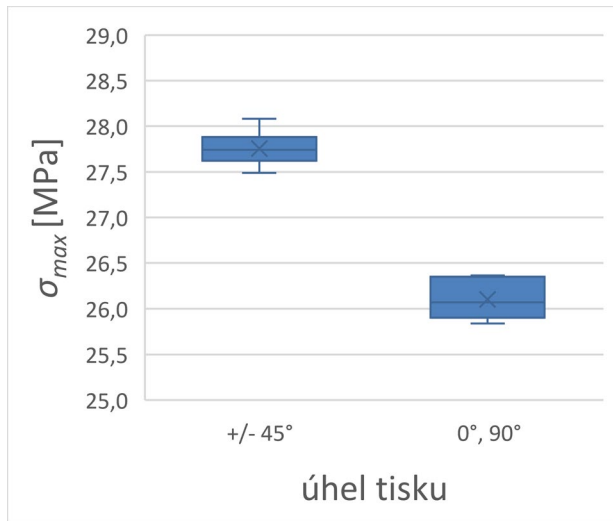
Tab. 5: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň +/- 45°) a ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň (0°, 90°)) pro modul pružnosti E

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	26851,0468	1	26851,0468	16,5821658	0,002242523	4,96460274
Všechny výběry	16192,726	10	1619,2726			
Celkem	43043,7729	11				

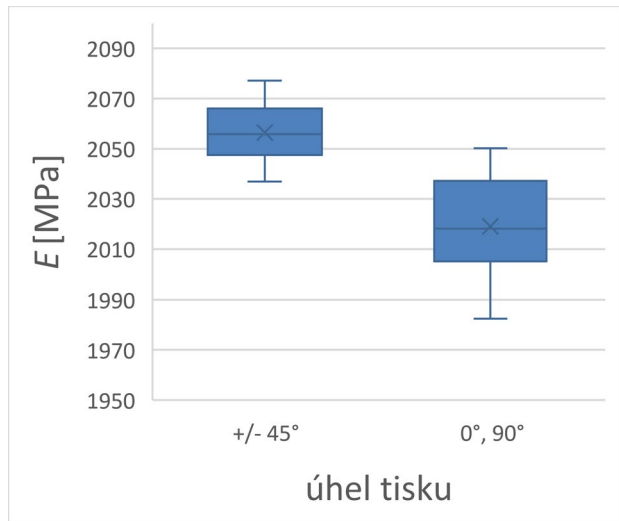
Tab. 6: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň +/- 45°) a ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň (0°, 90°)) pro maximální napětí σ_{max}

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	80,1617277	1	80,1617277	355,443836	3,81952E-09	4,96460274
Všechny výběry	2,25525722	10	0,22552572			
Celkem	82,4169849	11				

V následujících krabicových grafech jsou vyneseny zjištěné hodnoty σ_{max} a E u vzorků ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°) s různým úhlem sklonu výplně.



Obr. 36- Krabicový graf σ_{max} pro ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°)



Obr. 37- Krabicový graf modulu pružnosti E pro ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°)

V následujících tabulkách jsou výsledky provedené analýzy rozptylu.

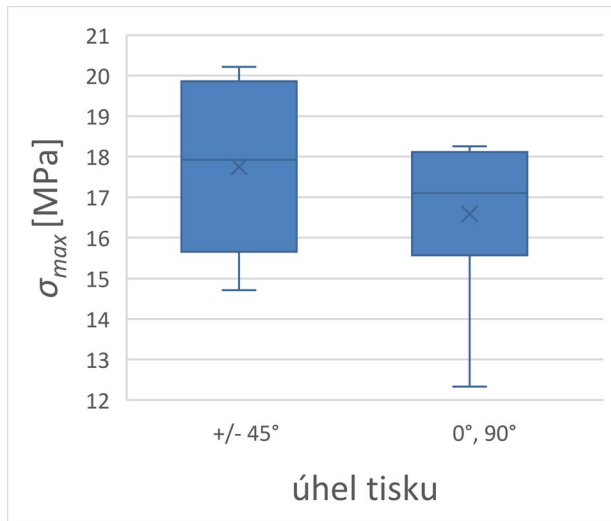
Tab. 7: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň +/- 45°) a ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň (0°, 90°)) pro modul pružnosti E

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	4209,13068	1	4209,13068	12,2355978	0,00574623	4,96460274
Všechny výběry	3440,06949	10	344,006949			
Celkem	7649,20018	11				

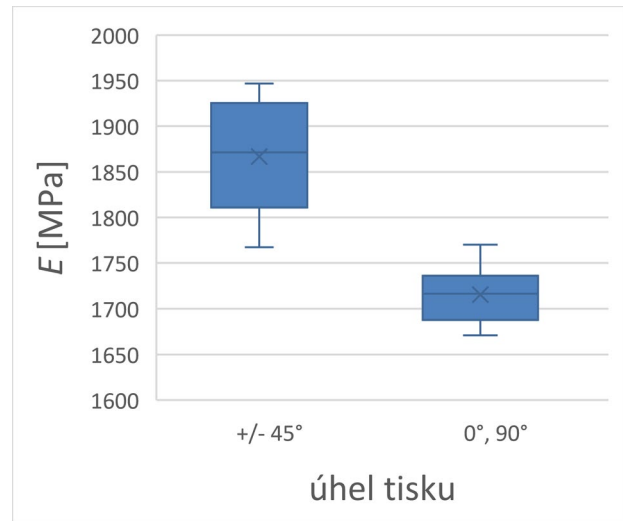
Tab. 8: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň +/- 45°) a ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň (0°, 90°)) pro maximální napětí σ_{max}

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	8,18362093	1	8,18362093	180,463832	1,00407E-07	4,96460274
Všechny výběry	0,45347707	10	0,04534771			
Celkem	8,637098	11				

V následujících krabicových grafech jsou vyneseny zjištěné hodnoty σ_{max} a E u vzorků ABS M30 (svislý, úhel 90°) s různým úhlem sklonu výplně.



Obr. 38- Krabicový graf σ_{max} pro ABS M30 (svislý, úhel 90°)



Obr. 39- Krabicový graf modulu pružnosti E pro ABS M30 (svislý, úhel 90°)

V následujících tabulkách jsou výsledky provedené analýzy rozptylu.

Tab. 9: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (svislý, úhel 90°, výplň +/- 45°) a ABS M30 (svislý, úhel 90°, výplň (0°, 90°)) pro modul pružnosti E

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	68520,1265	1	68520,1265	26,0850701	0,000459074	4,96460274
Všechny výběry	26267,948	10	2626,7948			
Celkem	94788,0745	11				

Tab. 10: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (svislý, úhel 90°, výplň +/- 45°) a ABS M30 (svislý, úhel 90°, výplň (0°, 90°)) pro maximální napětí σ_{max}

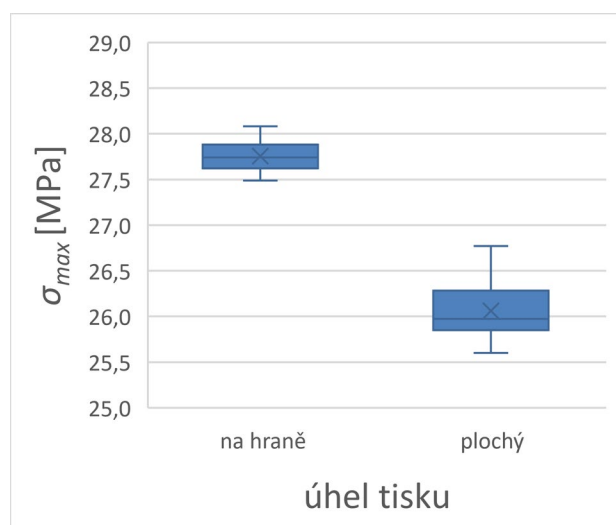
Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	4,05427803	1	4,05427803	0,8452475	0,37954293	4,96460274
Všechny výběry	47,9655725	10	4,79655725			
Celkem	52,0198506	11				

Z provedených analýz rozptylu stejných vzorků s jiným sklonem výplně lze v pěti případech vidět, že nulová hypotéza byla zamítnuta, ovšem v jednom případě nikoliv. Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (svislý, úhel 90°, výplň +/- 45°) a ABS M30 (svislý, úhel 90°, výplň (0°, 90°)) pro σ_{max} ukázala, že nulová hypotéza platí. Pokud hypotézu zamítну, dopouštím se chyby I. druhu. Pravděpodobnost, že se jí nedopustím je potom 62 %.

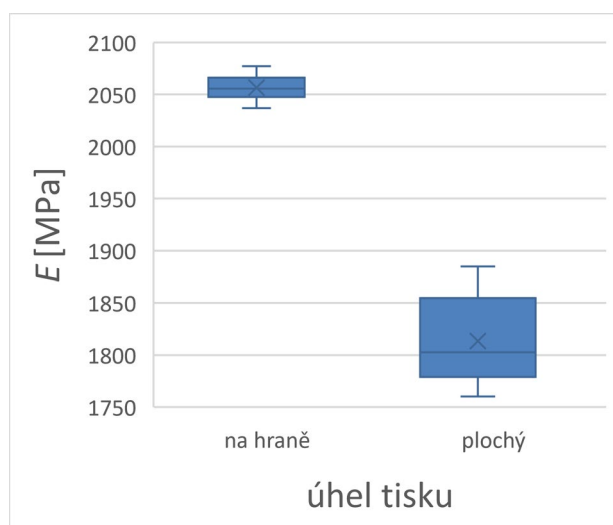
5.5.3.3 Vliv natočení vzorku na mechanické vlastnosti

Jako poslední jsem ověřil, jestli natočení vzorku (plochý, na hraně) ovlivňuje sledované hodnoty. Budeme tedy porovnávat vzorky se stejným sklonem výplně, ale rozdílným natočením (jsou to dvojice 1,2; 9,10).

V následujících krabicových grafech jsou vyneseny zjištěné hodnoty σ_{max} a E u vzorků ABS M30 (horizontální, úhel 0° , výplň $\pm 45^\circ$) s různým natočením vzorku (na hraně, plochý).



Obr. 40- Krabicový graf σ_{max} pro ABS M30 (horizontální, úhel 0° , výplň $\pm 45^\circ$)



Obr. 41- Krabicový graf modulu pružnosti E pro ABS M30 (horizontální, úhel 0° , výplň $\pm 45^\circ$)

V následujících tabulkách jsou výsledky provedené analýzy rozptylu.

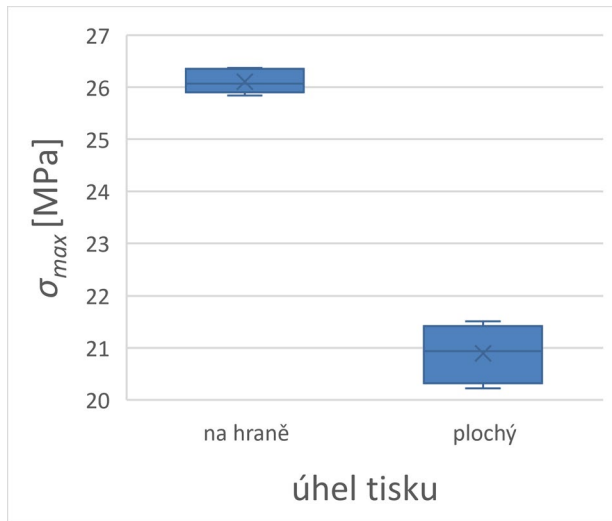
Tab. 11: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň $\pm 45^\circ$) a ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0° , výplň $\pm 45^\circ$) pro modul pružnosti E

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	177349,98	1	177349,98	163,846079	1,58838E-07	4,96460274
Všechny výběry	10824,1821	10	1082,41821			
Celkem	188174,162	11				

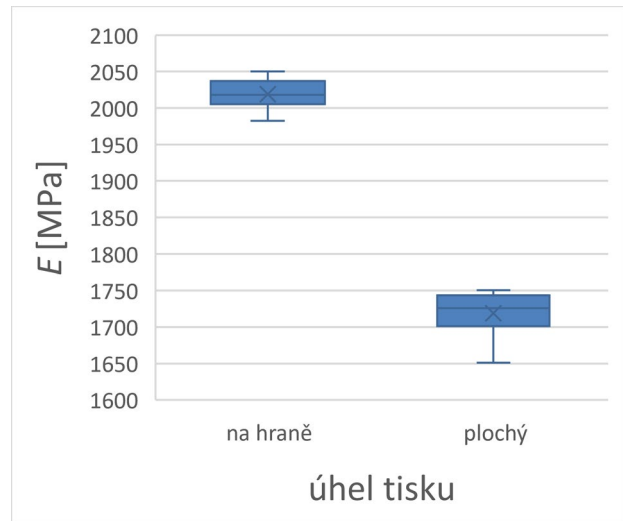
Tab. 12: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň $\pm 45^\circ$) a ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0° , výplň $\pm 45^\circ$) pro maximální napětí σ_{max}

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	8,59430447	1	8,59430447	91,3090533	2,40733E-06	4,96460274
Všechny výběry	0,94123246	10	0,09412325			
Celkem	9,53553693	11				

V následujících krabicových grafech můžeme pozorovat zjištěné hodnoty σ_{max} a E u vzorků ABS M30 (horizontální, úhel 0°, výplň (0°, 90°)) s různým orientací vzorku (na hraně, plochý).



Obr. 42- Krabicový graf σ_{max} pro ABS M30 (horizontální, úhel 0°, výplň (0°, 90°))



Obr. 43- Krabicový graf modulu pružnosti E pro ABS M30 (horizontální, úhel 0°, výplň (0°, 90°))

V následujících tabulkách jsou výsledky provedené analýzy rozptylu.

Tab. 13: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň (0°, 90°)) a ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň (0°, 90°)) pro modul pružnosti E

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	270519,079	1	270519,079	307,107449	7,77776E-09	4,96460274
Všechny výběry	8808,6134	10	880,86134			
Celkem	279327,693	11				

Tab. 14: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň (0°, 90°)) a ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň (0°, 90°)) pro maximální napětí σ_{max}

Zdroj variability	SS	Rozdíl	MS	F	Hodnota P	F krit
Mezi výběry	81,4363615	1	81,4363615	460,742728	1,07414E-09	4,96460274
Všechny výběry	1,76750183	10	0,17675018			
Celkem	83,2038633	11				

Při testování vlivu natočení vzorku (plochý, na hraně) na sledované hodnoty všechny analýzy rozptylu zamítly nulovou hypotézu. Z toho vyplývá, že natočení vzorku má vliv na sledované hodnoty.

6 Závěr

Na základě provedených tahových zkoušek vzorků materiálu ABS M30 zpracovaného technologií FDM byly zjištěny hodnoty modulu pružnosti v tahu E a meze pevnosti v tahu σ_{max} pro jednotlivé skupiny vzorků lišících se parametry výroby, a to orientací vzorku při výrobě a orientací rastru výplně. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 15.

Tab. 15: Výsledné hodnoty tahových zkoušek

ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň +/- 45°)	$E = 2057 \text{ MPa} (SD 13,33; n = 6)$
	$\sigma_{max} = 27,8 \text{ MPa} (SD 0,195; n = 6)$
ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň +/- 45°)	$E = 1813 \text{ MPa} (SD 44,58; n = 6)$
	$\sigma_{max} = 26,1 \text{ MPa} (SD 0,387; n = 6)$
ABS M30 (úhel 15°, výplň +/- 45°)	$E = 1688 \text{ MPa} (SD 43,45; n = 6)$
	$\sigma_{max} = 22,6 \text{ MPa} (SD 0,350; n = 6)$
ABS M30 (úhel 30°, výplň +/- 45°)	$E = 1583 \text{ MPa} (SD 22,88; n = 6)$
	$\sigma_{max} = 20,7 \text{ MPa} (SD 0,873; n = 6)$
ABS M30 (úhel 45°, výplň +/- 45°)	$E = 1821 \text{ MPa} (SD 31,65; n = 6)$
	$\sigma_{max} = 21,4 \text{ MPa} (SD 0,879; n = 6)$
ABS M30 (úhel 60°, výplň +/- 45°)	$E = 1803 \text{ MPa} (SD 19,68; n = 6)$
	$\sigma_{max} = 19,4 \text{ MPa} (SD 0,691; n = 6)$
ABS M30 (úhel 75°, výplň +/- 45°)	$E = 1882 \text{ MPa} (SD 10,12; n = 6)$
	$\sigma_{max} = 18,6 \text{ MPa} (SD 2,103; n = 6)$
ABS M30 (svislý, úhel 90°, výplň +/- 45°)	$E = 1867 \text{ MPa} (SD 64,40; n = 6)$
	$\sigma_{max} = 17,7 \text{ MPa} (SD 2,201; n = 6)$
ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň (0°, 90°))	$E = 1719 \text{ MPa} (SD 33,27; n = 6)$
	$\sigma_{max} = 20,9 \text{ MPa} (SD 0,549; n = 6)$
ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň (0°, 90°))	$E = 2019 \text{ MPa} (SD 22,59; n = 6)$
	$\sigma_{max} = 26,1 \text{ MPa} (SD 0,229; n = 6)$
ABS M30 (svislý, úhel 90°, výplň (0°, 90°))	$E = 1716 \text{ MPa} (SD 33,27; n = 6)$
	$\sigma_{max} = 16,6 \text{ MPa} (SD 2,179; n = 6)$

Při testování vlivu úhlové orientace na mechanické vlastnosti vzorku ANOVA potvrdila, že úhlová orientace vzorku při stavbě má vliv na mechanické vlastnosti vzorků. Při orientaci vzorku 0° (horizontálně) byla pevnost vzorků nejvyšší a s rostoucím úhlem měla klesající trend. Pevnost

vzorku se sklonem 0° byla o 32% vyšší než u vzorku se sklonem 90° , což je velmi znatelný rozdíl. U vzorků se také s rostoucím úhlem sklonu zvyšoval rozptyl naměřených hodnot pevnosti, což je nejvíce znatelné u sklonů 75° a 90° . Příčinou těchto skutečností jsou pravděpodobně rozdíly ve vnitřní stavbě vzorků a větší pravděpodobnost vzniku chyb uvnitř vzorku při spojování vrstev při větších úhlech tisku. Výsledky testů také ukázaly statisticky významné rozdíly v modulu pružnosti E mezi skupinami, ovšem podobný trend jako u meze pevnosti se neprokázal.

Při testování vlivu sklonu výplně na mechanické vlastnosti vzorků metodou ANOVA byla v pěti případech zamítnuta nulová hypotéza, ovšem v jednom případě nikoliv. Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (svislý, úhel 90° , výplň $\pm 45^\circ$) a ABS M30 (svislý, úhel 90° , výplň (0° , 90°)) pro σ_{max} ukázala, že nulovou hypotézu nemůžeme zamítnout. I přesto lze z krabicových grafů vypočítat, že při sklonu rastru $\pm 45^\circ$ bylo naměřeno větší maximální napětí σ_{max} než při sklonu 0° , 90° . Modul pružnosti v tahu E byl také vyšší pro sklon rastru $\pm 45^\circ$, z čehož vyplývá, že vzorky se sklonem $\pm 45^\circ$ dosahují vyšší pevnosti i tuhosti. Příčinou jsou pravděpodobně dlouhé mezery bez materiálu v oblasti připojení výplně k obvodu, které mohou při použití rastru 0° , 90° vznikat (viz. Obr. 25). Rozdíly mezi vzorky jsou kromě jednoho případu menší než 10 %.

Při testování vlivu natočení vzorku (plochý, na hraně) na sledované hodnoty ANOVA potvrdila, že natočení vzorku má vliv na sledované hodnoty. Vzorky tištěné na hraně dosáhly vyšší pevnosti i tuhosti než vzorky tištěné na plocho. Rozdíly mezi nimi jsou při porovnání maximálního napětí σ_{max} 6 % a 20 % a při porovnání modulu pružnosti v tahu E 12 % a 15 % ve prospěch natočení na hraně.

Z výsledků tahových zkoušek a provedených analýz rozptylu lze odvodit, že pokud se od výrobku požaduje co největší pevnost a tuhost, je vhodné tisknout při úhlu 0° , použít orientaci na hraně a použít výplň $\pm 45^\circ$.

V materiálové specifikaci od společnosti Stratasys [19] je pro materiál ABS M30 při orientaci 0° na hraně uveden modul pružnosti v tahu $E = 2230$ MPa a mez pevnosti v tahu $\sigma_{max} = 32$ MPa. Při mnou provedených zkouškách byl naměřen modul pružnosti v tahu $E = 2057$ MPa a mez pevnosti v tahu $\sigma_{max} = 27,8$ MPa. Rozdíl je tedy 8 % pokud jde o modul a 13 % pokud jde o mez pevnosti.

Pro svislou orientaci, tedy úhel 90° , je v dokumentu od Stratasys uveden modul pružnosti v tahu $E = 2180$ MPa a mez pevnosti v tahu $\sigma_{max} = 28$ MPa. Při mnou provedených zkouškách byl naměřen

modul pružnosti v tahu $E = 1867$ MPa a mez pevnosti v tahu $\sigma_{max} = 17,7$ MPa. V tomto případě je rozdíl modulů 14 % a rozdíl mezi pevnosti 36 %. Rozdílné mechanické vlastnosti mohou být způsobeny rozdílnými parametry při tisku, které ale bohužel Stratasys neuvádí.

Pro porovnání výsledků jsem použil také článek od Daria Croccola. [20] Pro materiál ABS M30, který je zpracován technologií vstřikování, udává modul pružnosti v tahu $E = 2400$ MPa a mez pevnosti v tahu $\sigma_{max} = 33$ MPa. K těmto hodnotám se naše vytištěné vzorky blížily, ale žádný jich nedosáhl. Tento výsledek jsem očekával, neboť výrobky vyrobené vstřikováním obecně dosahují vyšší pevnosti a tuhosti než výrobky vyrobené 3D tiskem. Dále jsou v článku výsledky tahových zkoušek dvou stejných skupin vzorků, které jsem testoval. Porovnání výsledků z mé bakalářské práce a z odborného článku je znázorněno v Tab. 16.

Tab. 16: Porovnání výsledků tahových zkoušek [20]

	Moje BP	Odborný článek
ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°, výplň +/- 45°)	$E = 1813$ MPa	$E = 1812$ MPa
	$\sigma_{max} = 26,1$ MPa	$\sigma_{max} = 23,9$ MPa
ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°, výplň +/- 45°)	$E = 2057$ MPa	$E = 1988$ MPa
	$\sigma_{max} = 27,8$ MPa	$\sigma_{max} = 25,4$ MPa

Z Tab. 16 lze vidět, že hodnoty naměřené při tahových zkouškách, jsou v obou případech srovnatelné. Rozdíly mezi moduly pružnosti v tahu E jsou nepatrné a rozdíly mezi mezemi pevnosti v tahu σ_{max} jsou 8 % a 9 %. Tyto rozdíly jsou nejspíše zapříčiněny různými parametry při tisku vzorků. Rozdíl byl například v tloušťce vrstvy (0,18 mm v mé BP a 0,25 mm v odborném článku) nebo v mezeře mezi konturou a rastrem (-0,005 mm v mé BP a 0 mm v odborném článku). Zejména přesah rastru může způsobit vyšší pevnost výrobku, což výsledky tahových zkoušek v Tab. 16 potvrzují.

V této bakalářské práci se mi podařilo odpovědět na všechny otázky, kterými jsem se zabýval, a zadání bakalářské práce bylo tedy úspěšně splněno.

7 Seznam obrázků

Obr. 1- Porovnání (a) subtraktivní, (b) aditivní a (c) formativní výrobní technologie [2].....	11
Obr. 2- Základní princip aditivní výroby [2].....	12
Obr. 3- Rozdělení aditivní výroby [6].....	13
Obr. 4- Dům vyrobený pomocí aditivní technologie [9].....	17
Obr. 5- Implantát vyrobený pomocí aditivní technologie [10]	17
Obr. 6- Ukázka přebytku a nedostatku materiálu [11]	18
Obr. 7- Závislost tloušťky vrstvy na vstupních parametrech [11]	19
Obr. 8- Různé typy vylačovacích mechanismů u FDM [12]	19
Obr. 9- Zjednodušené znázornění technologie FDM [11]	20
Obr. 10- Ukázka procentuálního poměru výplně [13]	20
Obr. 11- Kartézská tiskárna [1]	21
Obr. 12- Delta tiskárna [1]	21
Obr. 13- Polar tiskárna [1].....	22
Obr. 14- Průřez extrudérem [1] (1. Teflonová (PTFE) trubička, 2. Heatsink (chladič), 3. Tiskový ventilátor, 4. Heat break (izolátor), 5. Heater Block, 6. Tryska).....	23
Obr. 15- Některé materiály a teploty při jejich tisku [6].....	24
Obr. 16- Typické křivky napětí/poměrné prodloužení [15]	27
Obr. 17- Doporučené zkušební rychlosti [15].....	28
Obr. 18- Zkušební tělesa typu 1A a 1B [15]	30
Obr. 19- Rozměry zkušebních těles typu 1A a 1B [15]	31
Obr. 20- Zkušební stroj Mini Bionix.....	34
Obr. 21- Detail připevněného extenzometru	34
Obr. 22- Tvar a rozměry zkušebního tělesa	35
Obr. 23- Stratays Fortus 450mc	35
Obr. 24- Znázornění orientace vzorků při tisku (plochý, úhel 0°; na hraně, úhel 0°; plochý, úhel 15°)	37

Obr. 25- Znázornění orientace vzorků při tisku (plochý, úhel 75°; svislý, úhel 90°)	37
Obr. 26- Znázornění sklonu rastru vzorku na hraně (0°, 90°).....	38
Obr. 27- Znázornění sklonu rastru vzorku na hraně (+/- 45°).....	38
Obr. 28- Zkušební vzorky před zkouškou	39
Obr. 29- Zkušební vzorky po zkoušce	39
Obr. 30- Graf závislosti prodloužení na zatěžující síle (první tři zatížení).....	40
Obr. 31- Graf závislosti prodloužení na zatěžující síle (zatížení do přetržení).....	40
Obr. 32- Krabicový graf maximálního napětí σ_{max} pro ABS M30 (horizontální, plochý, výplň +/- 45°).....	43
Obr. 33- Krabicový graf modulu pružnosti E pro ABS M30 (horizontální, plochý, výplň +/- 45°) .	43
Obr. 34- Krabicový graf σ_{max} pro ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°).....	45
Obr. 35- Krabicový graf modulu pružnosti E pro ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0°)	45
Obr. 36- Krabicový graf σ_{max} pro ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°).....	46
Obr. 37- Krabicový graf modulu pružnosti E pro ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0°).....	46
Obr. 38- Krabicový graf σ_{max} pro ABS M30 (svislý, úhel 90°)	47
Obr. 39- Krabicový graf modulu pružnosti E pro ABS M30 (svislý, úhel 90°)	47
Obr. 40- Krabicový graf σ_{max} pro ABS M30 (horizontální, úhel 0°, výplň +/- 45°).....	48
Obr. 41- Krabicový graf modulu pružnosti E pro ABS M30 (horizontální, úhel 0°, výplň +/- 45°) .	48
Obr. 42- Krabicový graf σ_{max} pro ABS M30 (horizontální, úhel 0°, výplň (0°, 90°))	49
Obr. 43- Krabicový graf modulu pružnosti E pro ABS M30 (horizontální, úhel 0°, výplň (0°, 90°))	49

8 Seznam tabulek

Tab. 1: Zjištěné hodnoty modulu pružnosti v tahu E	41
Tab. 2: Zjištěné hodnoty maximálního napětí σ_{max}	42
Tab. 3: Analýza rozptylu daných vzorků při testování vliv úhlu na modul pružnosti E	44
Tab. 4: Analýza rozptylu daných vzorků při testování vliv úhlu na maximální napětí σ_{max}	44
Tab. 5: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň +/- 45°) a ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň (0° , 90°)) pro modul pružnosti E	45
Tab. 6: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň +/- 45°) a ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň (0° , 90°)) pro maximální napětí σ_{max}	45
Tab. 7: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0° , výplň +/- 45°) a ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0° , výplň (0° , 90°)) pro modul pružnosti E	46
Tab. 8: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0° , výplň +/- 45°) a ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0° , výplň (0° , 90°)) pro maximální napětí σ_{max}	46
Tab. 9: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (svislý, úhel 90° , výplň +/- 45°) a ABS M30 (svislý, úhel 90° , výplň (0° , 90°)) pro modul pružnosti E	47
Tab. 10: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (svislý, úhel 90° , výplň +/- 45°) a ABS M30 (svislý, úhel 90° , výplň (0° , 90°)) pro maximální napětí σ_{max}	47
Tab. 11: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň +/- 45°) a ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0° , výplň +/- 45°) pro modul pružnosti E	48
Tab. 12: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň +/- 45°) a ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0° , výplň +/- 45°) pro maximální napětí σ_{max}	48
Tab. 13: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň (0° , 90°)) a ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0° , výplň (0° , 90°)) pro modul pružnosti E	49
Tab. 14: Analýza rozptylu dvojice ABS M30 (horizontální, plochý, úhel 0° , výplň (0° , 90°)) a ABS M30 (horizontální, na hraně, úhel 0° , výplň (0° , 90°)) pro maximální napětí σ_{max}	49
Tab. 15: Výsledné hodnoty tahových zkoušek.....	50
Tab. 16: Porovnání výsledků tahových zkoušek [20]	52

9 Literatura

- [1] PRŮŠA, Josef. *Základy 3D tisku*. Prusa Research [online]. 2014, 12 [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [2] LIGON, Samuel Clark. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chemical Reviews* [online]. 2017, 117(15), 10212-10290 [cit. 2019-07-29]. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00074. ISSN 0009-2665. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.7b00074>
- [3] KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. 3D tisk. [cit. 2019-07-29] Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.
- [4] Historie a současnost 3D tisku [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <http://www.3dtisknazakazku.cz/9-clanky/15-historie-a-soucasnost-3d-tisku.html>.
- [5] ZHAI, Yuwei. Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation. *JOM* [online]. 2014, 66(5), 808-816 [cit. 2019-07-29]. DOI: 10.1007/s11837-014-0886-2. ISSN 1047-4838. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11837-014-0886-2>
- [6] CALIGNANO, Flaviana. Overview on Additive Manufacturing Technologies. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2017, 105(4), 593-612 [cit. 2019-07-29]. DOI: 10.1109/JPROC.2016.2625098. ISSN 0018-9219. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7803596/>
- [7] 3D tisk-metody [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>
- [8] Additive Fabrication (Rapid prototyping, tooling) [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [9] WIDNER, Cindy. The tiny 3D-printed home at SXSW is adorable. *Curbed Austin* [online]. 14. březen 2018 [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <https://austin.curbed.com/2018/3/14/17116504/tiny-home-austin-sxsw-3d-printed-affordable>
- [10] 14 How 3D printing Is Being Used Around The World? *GoPrint3D* [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <https://www.goprint3d.co.uk/faq/how-is-3d-printing-being-used/>

- [11] CARNEIRO, O.S. Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design* [online]. 2015, 83, 768-776 [cit. 2019-07-29]. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.053. ISSN 02641275. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127515004037>
- [12] GONZALEZ-GUTIERREZ, Joamin. Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives. *Materials* [online]. 2018, 11(5) [cit. 2019-07-29]. DOI: 10.3390/ma11050840. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/5/840>
- [13] FDM - Fused Deposition Modeling (or FFF, PJP, LPD). *Additive Blog* [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/fdm-fused-deposition-modeling-fff-pjp-lpd/>
- [14] ASA 3D tiskový materiál. materialpro3d.cz [online]. 8. březen 2016 [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa/>
- [15] ČSN EN ISO 527-1. Plasty-Stanovení tahových vlastnosti-Část 1: Obecné principy
- [16] ČSN EN ISO 527-2. Plasty-Stanovení tahových vlastnosti-Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty
- [17] ANOVA [online]. [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/ANOVA.htm>
- [18] SUCHÝ, T.: Biomechanika III – statistika 3., podklady pro přednášky
- [19] ABS-M30 PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC FOR FDM 3D PRINTERS [online]. [cit. 2019-08-07]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/materials/search/abs-m30>
- [20] CROCCOLO, Dario. Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30. *Computational Materials Science* [online]. 2013, 79, 506-518 [cit. 2019-08-07]. DOI: 10.1016/j.commatsci.2013.06.041. ISSN 09270256. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927025613003741>