

ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ ULTEM ZPRACOVANÉ POMOCÍ TECHNOLOGIE 3D TISKU

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: Aleš Pajr

Vedoucí práce: Ing. Jiří Šafka, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Aleš Pajr**
Osobní číslo: **S13000148**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Analýza mechanických vlastností materiálů ULTEM
zpracované pomocí technologie 3D tisku**
Zadávající katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Hlavním cílem této bakalářské práce je analýza mechanických vlastností materiálu ULTEM 1010 a 9085 z pohledu vlivu orientace 3D tisku zkušebních těles na výsledné mechanické zkoušky tahem

Doporučené metody pro vypracování:

1. Seznámit se s technologií 3D tisku a zařízeními v laboratořích katedry.
2. Provést analýzu současného stavu 3D tisku materiálů ULTEM.
3. Navrhnout postup výroby včetně orientací tisknutých těles, dle příslušných norem.
4. Vyrobit zkušební tělesa a provést zkoušky tahem.
5. Porovnat technologii 3D tisku se vstřikováním.
6. Zhodnotit získané výsledky a zhotovit potřebné grafy.
7. Vyhodnotit přínos bakalářské práce z ohledem na 3D tisk z materiálů ULTEM.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **40 stran textu včetně příloh**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] NOORANI, R. **Rapid Prototyping: principles and applications**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2006. ISBN 0-471-73001-7.
[2] JACOBS, P. F. **Stereolithography and other RP and M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling**. New York: ASME Press, 1996. ISBN 0-87263-467-1.
[3] GIBSON, I., D.W. ROSEN a B. STUCKER. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.
[4] HOPKINSON, N., R. HAGUE a P. DICKENS. **Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age**. Chichester: Wiley, 2006. ISBN 978-0-470-01613-8.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Šafka, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Martin Seidl, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie
Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2016**
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. února 2018**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2016

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo. Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL. Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše. Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem. Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval Ing. Jiřímu Šafkovi, Ph.D. za pomoc při vedení bakalářské práce a za cenné rady, které jsem uplatnil při plnění pracovních povinností. Mé poděkování patří též Ing. Michalu Ackermannovi, Ph.D. za poskytnuté rady a pomoc s obsluhou trhačího zařízení.

Rovněž děkuji celé mé rodině a přítelkyni za maximální podporu a trpělivost po celou dobu mého vysokoškolského studia.

TÉMA: Analýza mechanických vlastností materiálů ULTEM zpracované pomocí technologie 3D tisku

ABSTRAKT: Tato bakalářská práce se zabývá analýzou mechanických vlastností materiálu ULTEM 1010 z pohledu vlivu orientace 3D tisku zkušebních těles na výsledné mechanické zkoušky tahem. Zkoumaným materiál byl použit ULTEM 1010, který je velice pevný a má vysokou teplotní odolnost. Vlastní praktické testy probíhaly dle příslušné mezinárodní normy ČSN EN ISO 527. Výsledkem a přínosem této práce je porovnání mechanických vlastností zkoušky tahem tištěných vzorků se vstříkovanými vzorky.

KLÍČOVÁ SLOVA: (3D tisk, ULTEM 1010, vlastnosti 3D materiálů, FDM, Tahová zkouška, Pevnost v tahu, Poměrné prodloužení)

THEME: Analysis of mechanical properties of ULTEM materials processed using 3D printing technology

ABSTRACT: This bachelor thesis deals with the analysis of mechanical properties of ULTEM 1010 material from the point of view of influence of 3D print orientation of test bodies on the result of mechanical pull tests. The tested material was ULTEM 1010, which is very strong and has high temperature resistance. Practical tests were carried out according to the relevant international standard ČSN EN ISO 527. The result and contribution of this work is the comparison of the mechanical properties of the test by drawing printed samples with injected samples

KEYWORDS: (3D print, ULTEM 1010, properties of 3D materials, FDM, Tensile Thrust, Tensile Strength, Relative Extension)

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů a automatizace

Počet stran : 57

Počet příloh : 17

Počet obrázků : 22

Počet tabulek : 12

Počet modelů nebo jiných příloh: 0

Obsah

Úvod.....	14
1. 3D tisk.....	15
2. Jednotlivé technologie 3D tisku.....	18
2.1 Stereo Lithography (SLA) - vytvrzování vrstev tekutého fotopolymeru.....	19
2.2 Laminated Object Manufacturing (LOM) – vrstvená výroba	20
2.3 Selective Laser Sintering (SLS) – selektivní spékání práškového materiálu... 21	
2.4 Fused Deposition Modeling (FDM) – nanášení nataveného polymeru z vlákna 22	
2.5 Multi Jet Modeling (MJM) – vícenásobné nanášení.....	23
2.6 PolyJet	24
2.7 Multiphase Jet Solidification (MJS) – nanášení pomocí trysky.....	25
2.8 ProMetal 3D Printing – slinování kovového prášku	25
2.9 Direct Laser Forming (DLF) – nanášení kovového prášku	25
3. Materiály používané u technologie FDM	27
3.1 Polylactid acid (PLA).....	27
3.2 Acrylonitrile/ Butadiene/ Styrene (ABS)	27
3.3 Polycarbonate (PC)	30
3.4 ULTEM 9085	32
3.5 ULTEM 1010	33
3.6 Porovnání základních mech. vlastností materiálů používaných pro 3D tisk ..	34
4. Proces výroby 3D modelu.....	36
5. Statická zkouška tahem.....	37
5.1 Zkušební těleso.....	37
5.2 Podstata zkoušky.....	38
5.3 Vyjádření výsledků	39
5.3.1 Výpočet základních parametrů	40

6.	PRAKTICKÁ ČÁST	42
6.1	Tisk normalizovaných zkušebních vzorků.....	42
6.1.1	Stratasys Fortus 450mc	42
6.2	Stručný popis přípravy tisku pro technologii FDM pro stroj Stratasys Fortus 450 43	
6.3	Způsoby jednotlivých tisků	43
6.4	Rozmístění modelů na pracovní ploše	49
6.5	Kontrola rozměrů vytisknutých vzorků	50
6.6	Zkouška tahem	50
6.7	Porovnání všech průměrných výsledků	67
7.	Výroba normalizovaných zkušebních vzorků – vstřikování.....	70
7.1	Zkouška tahem	71
7.2	Porovnání mezi vytisknutými a vstřikovanými vzorky	72
	Vyhodnocení.....	75
	Závěr	76
	Použitá literatura	77
	Seznam příloh	80
	Přílohy.....	81

Seznam obrázků

Obr.2.1: Schéma technologie SLA [6]	19
Obr.2.2: Schéma technologie LOM [6]	20
Obr.2.3: Schéma technologie SLS [8]	21
Obr.2.4: Schéma technologie SLS [9]	23
Obr.2.5: Schéma technologie MJM [9]	23
Obr.2.6: Schéma technologie PolyJet [11]	24
Obr 5.1: Zkušební těleso typu 1A a 1B [34]	38
Obr 5.3: Typické deformační křivky polymerů v tahu [34]	39
Obr.6.3.1.: Ukázka prvních dvou vrstev tisknutého modelu Tisku ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$)	43
Obr.6.3.2.: Zobrazení jednotlivých totožně orientovaných vláken materiálu pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) - totožná orientace vláken	44
Obr.6.3.3.: Naorientovaný model v prostoru umístěný na pracovní ploše pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$)	44
Obr.6.3.4.: Zobrazení jednotlivých totožně orientovaných vláken materiálu v rovině xy, pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) - totožná orientace vláken	45
Obr.6.3.5.: Naorientovaný model v rovině yz umístěný na pracovní ploše pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$)	45
Obr.6.3.6.: Naorientovaný model v rovině xz umístěný na pracovní ploše pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$)	46
Obr.6.3.7.: Naorientovaný model v rovině yz umístěný na pracovní ploše pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$)	46
Obr.6.3.8.: Zobrazení jednotlivých totožně orientovaných vláken materiálu, v rovině xy, pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$) - totožná orientace vláken	47
Obr.6.3.9.: Naorientovaný model v rovině xy umístěný na pracovní ploše pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$)	47
Obr.6.3.10.: Naorientovaný model v rovině xz umístěný na pracovní ploše pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$)	47

Obr.6.3.11.: Naorientovaný model v rovině yz umístěný na pracovní ploše pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$)	48
Obr.6.3.12.: Zobrazení jednotlivých totožně orientovaných vláken materiálu, v rovině xy, pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) - totožná orientace vláken	48
Obr.6.4.: Rozmístěné modely vzorků na pracovní ploše 3D tiskárny – 1.Část	49
Obr.7.: Vstřikovací lis ARBURG 270S 400 – 100 [36]	70

Seznam grafů

Graf 1.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$)	51
Graf 2.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$)	51
Graf 3.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) – totožná orientace vláken	52
Graf 4.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) – totožná orientace vláken	52
Graf 5.: Střední hodnoty tahových napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) – totožná orientace vláken	53
Graf 6.: Střední hodnoty poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) – totožná orientace vláken	53
Graf 7.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$)	54
Graf 8.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$)	54
Graf 9.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) – totožná orientace vláken	55
Graf 10.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) – totožná orientace vláken	56
Graf 11.: Střední hodnoty tahových napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) – totožná orientace vláken	57
Graf 12.: Střední hodnoty poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) – totožná orientace vláken	57
Graf 13.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$)	58

Graf 14.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) ...	58
Graf 15.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) – totožná orientace vláken	59
Graf 16.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) – totožná orientace vláken	59
Graf 17.: Střední hodnoty tahových napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) – totožná orientace vláken	60
Graf 18.: Střední hodnoty poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) – totožná orientace vláken	61
Graf 19.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$) – totožná orientace vláken	61
Graf 20.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$) – totožná orientace vláken	62
Graf 21.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$)	63
Graf 22.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) ...	63
Graf 23.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) – totožná orientace vláken	64
Graf 24.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) – totožná orientace vláken	65
Graf 25.: Střední hodnoty tahových napětí pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) a Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) – totožná orientace vláken	66
Graf 26.: Střední hodnoty poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) a Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) – totožná orientace vláken	66
Graf 27.: Porovnání průměrných hodnot tahového napětí u vzorků vyrobených technologií Rapid Prototyping	68
Graf 28.: Porovnání průměrných hodnot poměrného prodloužení u vzorků vyrobených technologií Rapid Prototyping	69
Graf 29.: Střední hodnota tahové napětí pro vstřikované vzorky	72
Graf 30.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro vstřikované vzorky	72

Graf 31.: Střední hodnoty tahových napětí pro všechny zkušební vzorky	73
Graf 32.: Střední hodnoty poměrných prodloužení pro všechny zkušební vzorky	74

Seznam tabulek

Tabulka 1.: Mechanické vlastnosti materiálu ABS [15]	28
Tabulka 2.: Mechanické vlastnosti materiálu ABSi [17]	29
Tabulka 3.: Mechanické vlastnosti materiálu ABS-M30 [19]	29
Tabulka 4.: Mechanické vlastnosti materiálu ABS-M30i [21]	30
Tabulka 5.: Mechanické vlastnosti materiálu ABS-ESD7 [22]	30
Tabulka 6.: Mechanické vlastnosti materiálu PC [24]	31
Tabulka 7.: Mechanické vlastnosti materiálu PC-ISO [26]	31
Tabulka 8.: Mechanické vlastnosti materiálu PC-ABS [28]	32
Tabulka 9.: Mechanické vlastnosti materiálu ULTEM 9085 [30]	32
Tabulka 10.: Mechanické vlastnosti materiálu ULTEM 1010 [32]	33
Tabulka 11.: Porovnání mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk .	34
Tabulka 12.: Rozměry zkušebních těles typu 1A a 1B [34]	38

Seznam použitých zkratk a symbolů

3D	Trojrozměrný
CAD	Computer-aided drafting (Počítačem podporované projektování)
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní norma
UV	Ultrafialové záření
STL	STereoLithography (Typ CAD souboru pro stereolitografie)
SLA	Stereo Lithography
LOM	Laminated Object Manufacturing
SLS	Selective Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
MJM	Multi Jet Modeling
MJS	Multiphase Jet Solidification
DLF	Direct Laser Forming
ABS	Akrolonitrilbutadienstyren
PC	Polycarbonate
PLA	Polylactid acid

Úvod

V dnešní době jsou kladeny obrovské nároky na časovou minimalizaci v zavádění nových výrobků do sériové výroby. To vše z pohledu rychlosti samotné výroby také kvalitě nových, ale i stávajících dílů. Každý výrobní podnik chce vyrobit co nejvíce dílů, za co nejkratší dobu, ve stoprocentní kvalitě a při nejnižších nákladech na výrobu.

Hlavní výhodou technologie Rapid Prototyping (česky převážně označován jako „3D Tisk“) je co nejkratší doba mezi zadáním zakázky na požadovaný výrobek a vyrobením prvních prototypových dílů. Vyrobené díly mají předem požadovanou kvalitu povrchu a předepsané mechanické vlastnosti. Tato vlastnost je velice důležitá a má velký význam pro celý strojírenský, automobilový, letecký průmysl a vesmírný program. Tato bakalářská práce má v praktické části popsat optimální polohu a orientaci modelu v tiskárně pro materiál ULTEM 1010. To vše z hlediska maximálních mechanických vlastností.

Tato bakalářská práce se skládá z pěti částí. Úvodní část této bakalářské práce je věnována k seznámení jednotlivých výrobních technologií a materiálů. Jsou zde uvedeny základní informace o technologiích, a také i o materiálech, které se používají v technologii Rapid Prototyping. Praktická část se zabývá samotným tiskem zkušebních vzorků a testováním vytisknutých vzorků. Zkouška tahem probíhala dle normy ČSN EN ISO 527. Získané výsledky z tahové zkoušky byly zaznamenány do podoby přehledných grafů. V další etapě praktické části byly zbytky roztrhaných těles použity pro výrobu zkušebních vzorků technologií vstřikování termoplastů. Na těchto vzorcích byla vykonána zkouška tahem a získané hodnoty byly porovnány s předešlými výsledky.

Hlavním cílem této bakalářské práce je nalezení vhodné pozice a orientace vláken tisknutého modelu při tisku, vzhledem k mechanickým vlastnostem dílu a provedení tahové zkoušky. Následně výsledky z tahových zkoušek porovnat s materiálovými listy výrobce a porovnat mechanické vlastnosti se vzorky, které byly vyrobeny technologií vstřikování termoplastů

1. 3D tisk

3D tisk neboli Rapid Prototyping je výrobní technologie, která umožňuje výstavbu fyzických modelů. Pomocí technologie 3D tisku lze vytvořit z CAD dat fyzický díl. Na rozdíl od konvenčních technologií – obrábění, není materiál odebírán, ale naopak je po vrstvách přidáván. Budoucí model vzniká vrstvu po vrstvě a jednotlivé vrstvy materiálu se tisknou přes sebe. K 3D tisku se používají technologická zařízení 3D tiskárny. Tiskáren existuje mnoho typů a mnoho výrobců. Z hlediska konstrukční náročnosti na el. prvky je nejjednodušší typ technologie RepRap. [1]

Tato technologie 3D tisku zpracovává různorodé termoplastické materiály ve formě tenkých vláken. Vlákná jednotlivých vrstev jsou na sebe kolmá, tak aby se dosáhlo lepších mechanických vlastností daného modelu. Tloušťka jedné vrstvy je dána zvoleným vnitřním průměrem trysky. Základní RepRap stroje lze zakoupit již od 5 000 Kč bez DPH a cena stoupá dle složitosti a variability zařízení. Naopak konstrukčně složitější stroje se pohybují v řádech milionů korun. [2]

Jednou z komerčních technologií, která využívá termoplastický polymerní materiál je i FDM (Fused Deposition Modeling). Jedná se o registrovanou známku firmy Stratasys. Mezi nejzákladnější materiály patří ABS a PC, PC-ABS, ASA atd. [2]

Historie 3D tisku

V roce 1984 byl uznán patent panu Charlesu W. Hullovi na první 3D technologii – stereolitografie. Tato technologie je obecně označována jako SLA a s menšími úpravami se používá dodnes.

Jedná se o velice přesnou technologii, která vyniká velkým množstvím použitelných materiálů. Jedna z velkých výhod SLA oproti jiným tiskařským technologiím je ve velikosti tisknutého modelu. Na rozdíl od ostatních technologií lze s touto technologií tisknout díry o průměru 1 mm a miniaturní předměty v řádech desetinách milimetru. Naopak mezi nevýhody této technologie patří též časová náročnost výroby modelu, respektive vytvrzování polymeru a u některých materiálů je také malá tepelná odolnost vytisknutého modelu. Největší nevýhodou jsou nutné dokončovací operace. Čištění, speciální osvit UV světlem pro vytvrzení fotopolymeru atd. [3]

Možnosti využití 3D tisku

- pro názornou představu o velikosti, tvaru a o celkovém provedení CAD modelu
- k ověření dané správnosti funkce dílu
- ke kontrole designu CAD modelu
- při posuzování ergonomie dílů a následné optimalizaci
- ve zdravotnictví, při výrobě kloubů
- během vývoje dílu, tzn., že navrhovanou součást je možno v kterékoli fázi vývoje snadno vyrobit a následně korigovat další vývojové fáze;
- k určení mechanických vlastností výrobků, k ověření výsledků FEM analýzy, k simulaci proudění vzduchu. [4]

Oblasti uplatnění 3D tisku

- automobilový průmysl
- letecký průmysl
- zdravotnictví
- strojírenství
- hutní průmysl
- design
- vesmírný program
- textilní průmysl a architektura [5]

Výhody a nevýhody 3D tisku

Výhody

- nízké náklady na výrobu
- výroba zkušebních modelů, bez použití výrobních nástrojů
- minimální nároky na pracovní prostředí stroje
- rychlá a přesná technologie
- velké spektrum materiálů určených k tisku
- různorodá tloušťka jedné vrstvy v řádech setin až desetin milimetrů [5]

Nevýhody

- pořizovací cena stroje, materiálů a příslušenství
- velké množství odpadního materiálu (převážně nelze opětovně podpůrný materiál využívat)
- u některých materiálů malá tepelná odolnost vytisknutého modelu [5]

2. Jednotlivé technologie 3D tisku

Technologie výroby zkušebního modelu, dělíme

- a) 3D tisk z polymerních materiálů
 - Stereo Lithography (SLA)
 - Laminated Object Manufacturing (LOM)
 - Selective Laser Sintering (SLS)
 - Fused Deposition Modeling (FDM)
 - Multi Jet Modeling (MJM)
 - PolyJet
- b) 3D tisk z nepolymerních materiálů
 - Multiphase Jet Solidification (MJS)
 - ProMetal 3D Printing
 - Direct Laser Forming (DLF)

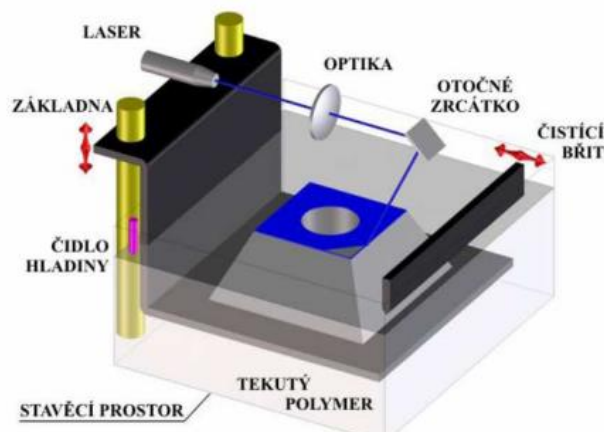
2.1 Stereo Lithography (SLA) - vytvrzování vrstev tekutého fotopolymeru

Technologie SLA spočívá ve vytvrzování vrstev tekutého fotopolymeru pomocí UV laseru. Jedná se o vůbec první technologii 3D tisku, technologie byla uvedena na trh ve druhé polovině 80. let 20.st.

Jedná se o velice přesnou technologii, která vyniká velkým množstvím použitelných materiálů. Jedna z velkých výhod SLA oproti jiným tiskařským technologiím je tisknutí nejmenších detailů modelu a v geometrické kvalitě vytisknutého modelu. Jednotlivé vrstvy modelu mohou mít tloušťku v rozmezí 0,025 až 0,15 mm. Naopak mezi nevýhody této technologie patří časová náročnost výroby modelu, respektive vytvrzování polymeru. U některých materiálů je také malá tepelná a chemická odolnost vytisknutého modelu. Postupem času dochází k degradaci vytisknutého modelovacího materiálu.

Výroba stereolitografického (SLA) modelu je založena na postupném vykreslování rovinných vrstev na hladinu pryskyřice vláknovým laserovým paprskem o dané vlnové délce. V oblasti dopadu laserového paprsku dojde k vytvrzení světlo citlivé pryskyřice a pracovní stůl se posune o předem nastavený krok (tloušťka vrstvy) v ose Z. Před vykreslováním každé vrstvy musí být zarovnána hladina pryskyřice tak, aby byla zachována požadovaná tloušťka vrstvy. Celý proces se opakuje tolikrát, kolikrát je potřeba k vytvoření fyzického modelu.

Model je přichycen k pracovnímu stolu pomocí podpor. Podpory jsou řešené tak, aby se daly nejsnáze odstranit a aby nepoškodily výsledný model. Ke zlepšení mechanických vlastností se model vkládá do UV komory. [4]



Obr.2.1: Schéma technologie SLA [6]

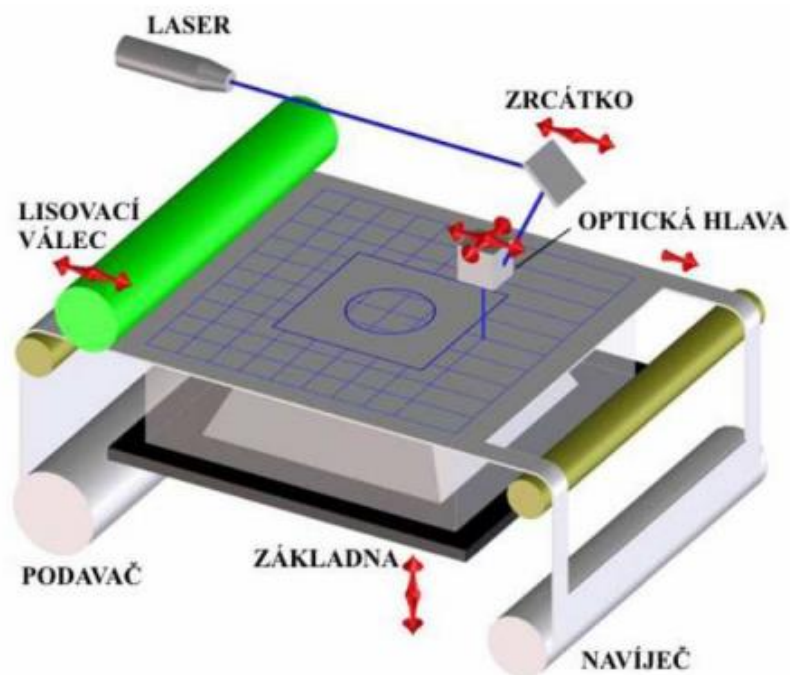
2.2 Laminated Object Manufacturing (LOM) – vrstvená výroba

Technologie LOM je založena na jednotlivém vrstvení lepivého materiálu. Výsledný fyzický model se skládá ze speciálních polykarbonátových fólií, které jsou napuštěny zpevňující hmotou. Obvodová kontura jednotlivých vrstev modelu vznikne odřezáním pomocí CO₂ laseru.

Výsledný model má mechanické vlastnosti podobné dřevu. Pro dosažení hladkého povrchu modelu, je nutného tento model mechanicky začistit. Výhodou této technologie je výroba velkých modelů a nízká pořizovací cena tiskárny. Jedná se o velice levnou technologii. Nevýhodou pak velké množství odpadu.

Výroba vrstveného modelu (LOM) je založena na nanášení vrstev a následný ořez odpadu. Tiskne se na pracovní plochu, která se pohybuje v ose X a v ose Z (při vertikálním posuvu o tloušťku vrstvy). Po nanesení a vyříznutí první vrstvy, se na celou vyříznutou plochu natáhne polykarbonátová fólie, která je opatřena vrstvou polyetylénu. Pomocí vyhřívaných válců, které polykarbonátovou folii přitlačí a dojde ke slepení stávajících vrstev.

Obvodová kontura nové vrstvy se ořízne laserem. Po vytvoření nové vrstvy se pracovní stůl posune o předem nastavený krok (tloušťka vrstvy) v ose Z. Celý proces se opakuje tolikrát, kolikrát je potřeba, aby došlo k vytvoření fyzického modelu. [7]



Obr.2.2: Schéma technologie LOM [6]

2.3 Selective Laser Sintering (SLS) – selektivní spékání práškového materiálu

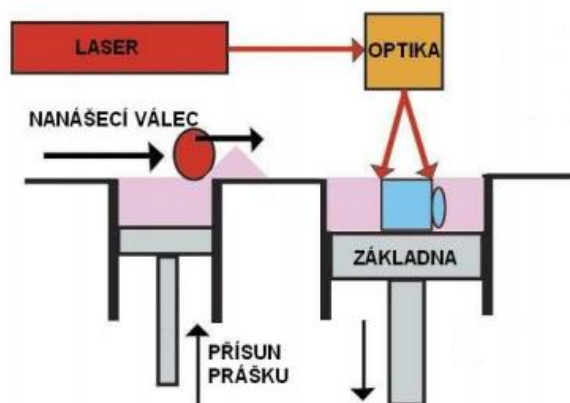
Technologie SLS je prášková technologie, která využívá k vytvoření fyzického modelu spékání prášku pomocí CO₂ laseru. Technologií SLS lze vyrábět jak plastové, tak i kovové modely. Jako materiál pro tvorbu modelu je využíván jemný prášek. Pro plastové modely se používá polyamidový prášek. Pro kovové výrobky se používají kovové prášky.

Na rozdíl od technologie stereolitografie (SLA) jsou modely vyrobené metodou SLS velmi pevné. Tloušťka jedné vrstvy je v rozsahu 0,1 až 0,15 mm. Na rozdíl od jiných metod technologie 3D tisku je možné použít jakýkoliv termoplastický prášek, který při působení tepla taví nebo měkne. Například polyamidy, polykarbonáty, polystyrény, slitiny bronzu nebo kovové prášky. Pro zlepšení mechanických vlastností, zejména pevnosti lze použít PA2200.

Tento polyamid ve formě prášku má velice dobrou chemickou odolnost, na plasty má vysokou pevnost a tuhost. Materiál je biokompatibilní, používá se pro tisk funkčních modelů. Polyamid PA2200 lze uplatnit také v medicíně. Materiál má bílou barvu.

Výroba spékaného modelu (SLS) je totožná jako u technologie SLA. Jednotlivé vrstvy modelu jsou vytisknuty pomocí laserového paprsku, který natavuje požadovaný prášek. V oblasti působení laseru se prášek buď speče, nebo nataví a ochladí. Po vytvoření nové vrstvy se pracovní stůl posune o předem nastavený krok (tloušťka vrstvy) v ose Z.

Výroba fyzického 3D modelu probíhá po vrstvách. Výsledný model neobsahuje konstrukční podpory, protože model je pevně usazen v prášku, který jej obklopuje. Po dokončení tisku je důležité nechat fyzický model vychladnout na teplotu, při níž lze model vyjmout ze stroje. [4]



Obr.2.3: Schéma technologie SLS [8]

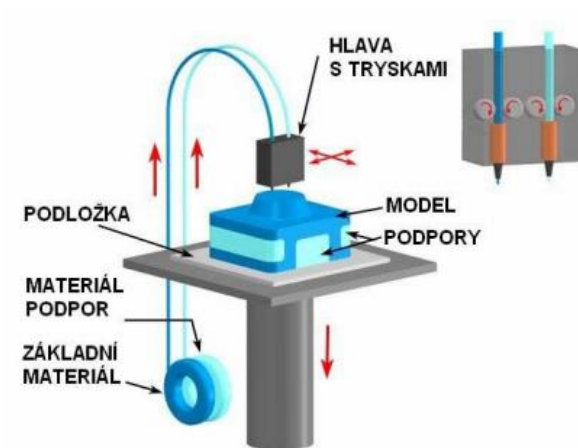
2.4 Fused Deposition Modeling (FDM) – nanášení nataveného polymeru z vlákna

Název „Fused Deposition Modeling (FDM)“ je obchodní registrovaná značka americké firmy Stratasys. Společnost Stratasys je jedním z největších producentů 3D tiskáren na světě, pro technologie FDM a PolyJet. Ostatní výrobci využívající technologii FDM jsou nazývány RepRap technologie. Technologie FDM využívá k výrobě modelu vlákna z termoplastu. Oproti výše zmíněným technologiím, technologie FDM nevyužívá laser. [2]

V dnešní době se jedná o nejrozšířenější technologii pro tisk prototypových plastových dílů. Využitelnost této technologie je velice široká. Používá se pro výrobu zkušebních modelů, pro odzkoušení zástavbové zkoušky dílu nebo při výrobě prototypového nářadí pro tlakové lití. Nezanedbatelnou výhodou je také možnost využití více druhů materiálů s různými mechanickými vlastnostmi. Tyto materiály mohou být případně opatřeny různými barvami pro lepší názornost.

Výroba modelu technologií FDM spočívá v nanášení tenkých vrstev roztaveného materiálu. Materiál v tuhém stavu je ve formě drátku, který prochází ohřátou tryskou a dochází k natavení materiálu. Tryska se pohybuje v rovině XY nad pracovním plochou a pomocí vygenerovaného programu vytváří profil jedné vrstvy. Vrstva může být vyplněná plně, částečně pomocí žeber nebo se může vytisknout pouze požadovaná kontura modelu. Po vytvoření nové vrstvy se pracovní stůl posune o předem nastavený krok (tloušťka vrstvy) v ose Z.

Během tisku jednotlivých vrstev dochází zároveň, také k tisku jednotlivých konstrukčních podpor. Tyto podpory se tisknou z podpůrného materiálu, který se po dokončení tisku mohou mechanicky odlomit nebo chemicky rozpustit. Každý hlavní materiál má přidělený podpůrný materiál. Univerzální podpůrný materiál neexistuje. Tloušťka jedné vrstvy závisí na zvolené trysce pro hlavní materiál. Tloušťka jedné vytisknuté vrstvy je v řádech desetin milimetru. [7]



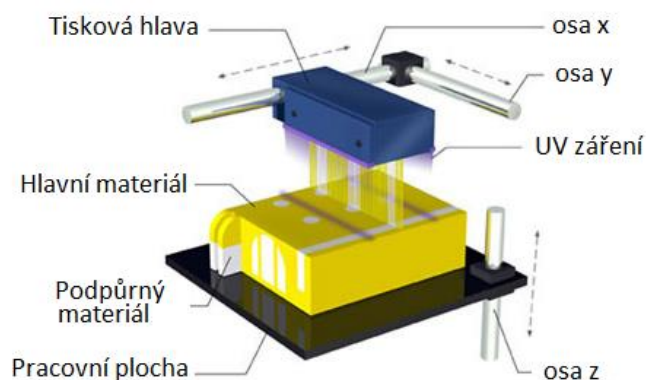
Obr.2.4: Schéma technologie SLS [9]

2.5 Multi Jet Modeling (MJM) – vícenásobné nanášení

Technologie MJM spočívá v tištění prototypového modelu pomocí fotonopolyméru. Jako u technologie FDM jsou zde 2 materiály – hlavní (modelovací) a podpůrný. Tyto materiály mají různou teplotu tání.

Technologie MJM využívá jako modelovací materiál akrylový fotonopolymér, který nabízí velmi vysokou kvalitu povrchu a velmi přesné výtisky. Pro podpůrný materiál se používá vosk, který má nižší teplotu tání než hlavní materiál. Tudíž lze snadno odstranit, pomocí zvýšení teploty.

Modelovací materiál se nataví a zteče na pracovní plochu, kde je pomocí tiskařské hlavy nanášen podle vygenerovaného programu. Po dokončení vrstvy je část modelu okamžitě vytvrzena pomocí ultrafialového světla. Podpůrné konstrukční prvky jsou automaticky vygenerovány. [7]

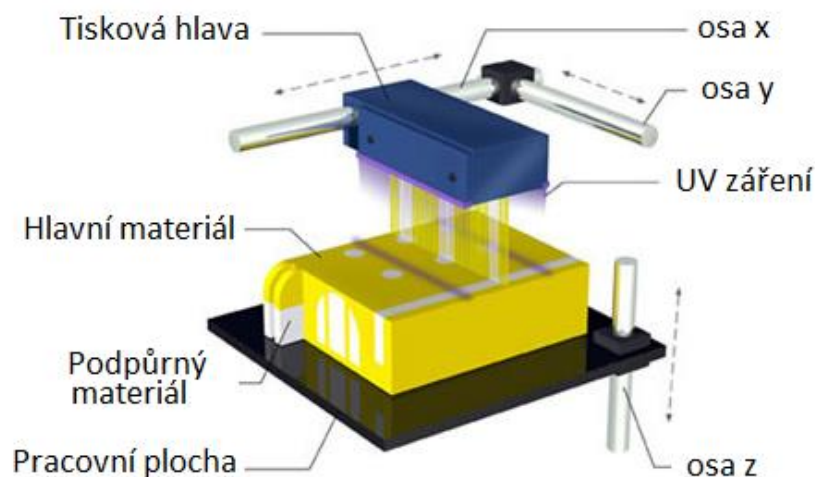


Obr.2.5: Schéma technologie MJM [9]

2.6 PolyJet

Další z mnoha technologií pro 3D tisk je technologie Polyjet. Modely vzniklé touto technologií jsou na bázi fotopolymery, který je vytvrzený UV lampou. Lze zde využít až 6 stavebních materiálů a velký počet podpůrných materiálů. Hlavní výhody technologie jsou velmi kvalitní povrchy vytištěných modelů a mnoho typů stavebních materiálů. Technologie Polyjet je vhodná pro výrobu malých modelů s vysokými nároky na detaily. Tloušťka jedné vrstvy je buď $16-30 \cdot 10^{-6}$ mm nebo $14-28 \cdot 10^{-6}$ mm. Jedna tisková hlava u technologie PolyJet obsahuje 96 trysek. Technologie PolyJet je velice rychlá oproti technologii FDM. Nevýhodou této technologie je malá teplotní odolnost (60 až 90 °C). Při výrobě prototypového modelu se zároveň vytvářejí konstrukční podpory z podpůrného materiálu. Podpůrný materiál je na bázi gelu. Vytištěné podpory se neodstraňují mechanicky ani chemicky, ale pouze tlakovou vodou.

Materiál na bázi fotopolymery je vytvrzován po tenkých vrstvách UV zářením. Vytvrzování probíhá současně při tisku zkušební model. Po dokončení tisku je zkušební model ihned připraven k dalšímu zpracování. Výsledný model není nutné mechanicky začištěvat, protože tloušťka jedné vrstvy je velice malá. Obsahuje-li model dutiny, u kterých hrozí mechanická deformace, program automaticky vygeneruje zvolený typ konstrukční podpory na bázi gelu. Tento gel se odstraní pomocí tlakové vody. [10]



Obr.2.6: Schéma technologie PolyJet [11]

2.7 Multiphase Jet Solidification (MJS) – nanášení pomocí trysky

Technologie MJS se oproti ostatním výše zmíněným technologiím používá pro nepolymerní látky. Polotovary materiálu je formě prášku, a to jak z čistého kovu keramiky nebo směsi kovu, případně keramiky s vhodným pojivem. Výhodou technologie MJS je, výroba modelů z ušlechtilých ocelí, titanu, siliciumkarbidu, kysličníku hliníku apod.

Materiál, který je umístěn v zásobníku stroje, je přímo ohříván na teplotu, při které se vytváří fáze o nízké viskozitě. Posléze je pístovým automatickým systémem vytlačován do ústí ohříváné trysky. Při dopadu materiálu na tisknutý model, materiál ztuhne a vytvoří námi požadovanou vrstvu. Celý výrobní cyklus je podobný technologii FDM, ale technologie MJS umožňuje vyrábět modely z oceli. [7]

2.8 ProMetal 3D Printing – slinování kovového prášku

Technologie ProMetal se stejně jako technologie MJS také používá pouze pro nepolymerní materiály. Technologie je založena na slinování práškových materiálů. Materiál je ve stavu ultra jemného prášku, a to jak pro kovové, keramické, fermezové nebo kompozitní materiály. Vytisknuté díly touto technologií mají vysokou pevnost a odolnost proti otěru.

Princip technologie ProMetal spočívá v selektivním vrstvení inkoustového tisku. Pro výrobu kovových modelů bývají použity tiskací hlavy s vysokým rozlišením. Integrovanou součástí technologie ProMetal je slinování výrobku a jeho infiltrace kovem pro dosažení vysoké pevnosti a téměř 100 % hustoty tisknutého modelu. Během tisku dochází k tepelnému zpracování materiálu, při kterém se pojivo odstraňuje vypékáním a slinutím kovových prášků na porézní strukturu, která se zpevňuje infiltrací kovů. [7]

2.9 Direct Laser Forming (DLF) – nanášení kovového prášku

Technologie DLF se používá pouze pro nepolymerní látky. Tento typ technologie slouží k výrobě kovových součástí přímo z kovového prášku. Výsledné díly mají lepší mechanické vlastnosti než díly vyráběné konvenčními technologiemi.

Princip technologie DLF spočívá ve výrobě modelů součástí postupným nanášením materiálu ve formě prášku. Materiál je veden do oblasti působení paprsku laseru, kde dochází k tavení materiálu. Laser se pohybuje rovině XY pomocí souřadnic, které jsou dány programem. Po dokončení vrstvy, dojde k posunu pracovního stolu o tloušťku jedné vrstvy v ose Z. [7]

3. Materiály používané u technologie FDM

Materiály, které jsou používány v oblasti 3D tisku, je velké množství. Pro různé výrobní technologie, jsou materiály dodávány v různé podobě, jako např. v prášku, v navinutém tenkém drátku atd... Každá technologie má své vlastní materiály, které nelze použít pro jinou výrobní technologii. Mechanické vlastnosti základních materiálů, jsou pro různé technologie totožné. Mezi základní materiály se řadí ABS, PC, a PLA. Pokud je to možné, je vhodnější objednávat materiály u stejného výrobce jako je výrobní stroj. Tím se dosáhne požadované použitelnosti materiálů, pro danou technologii. [12] Níže představené materiály jsou využívány u technologie FDM.

3.1 Polylactid acid (PLA)

Výhodou tohoto termoplastického polyesteru je výroba materiálu z obnovitelných zdrojů, jako např. z kukuřičného nebo bramborového škrobu. Tento materiál lze použít i pro tisk velkoobjemných modelů. Vytisknutý model lze snadno začistit, a to buď pomocí brusného papíru, nebo pomocí strojní brusky. Brusný papír brusky materiál rychle zahřeje na teplotu přesahující teplotu tání. Proto je vhodné volit vhodné chlazení materiálu při dokončovacích pracích. [13]

Mechanické vlastnosti

Vytisknutý model z materiálu PLA má menší tepelnou odolnost než ABS materiál. Teplota zesknění je u tohoto materiálu 60 °C. I při nižších teplotách je vytisknutý model velice pevný a jednotlivé vrstvy jsou velmi dobře spojené. [14]

3.2 Acrylonitrile/ Butadiene/ Styrene (ABS)

Spolu s materiálem PLA je ABS nejpoužívanějším a základním materiálem pro výrobní technologii FDM. Materiál je dodáván ve formě namotaného ABS drátku o průměru 3 mm. Teplota materiálu při tisku je 240 – 250 °C. Svými mechanickými vlastnostmi je velice vhodný pro tisk zkušebních dílů, a to jak pro zástavbové zkoušky, tak i pro zkoušky funkčnosti daného dílu.

Vytisknuté díly lze snadno opracovat dokončovacími operacemi, jako je broušení (ruční nebo strojní), lakování a případně lze ABS díly slepit pomocí rozpouštědlových a polyakrylátových lepidel. Materiál je dodáván v širokém spektru barev. Základní barvou je bílá barva. [15]

Mechanické vlastnosti

ABS je velice pevným a odolným termoplast. Vyniká velkou odolností vůči rázům. Teplota tání materiálu je 110 °C. Hustota materiálu je 1 045 kg/m³.

Tabulka 1.: Mechanické vlastnosti materiálu ABS [15]

Pevnost v tahu	37 MPa
Modul pružnosti v tahu	2,32 MPa
Prodloužení při tahové zkoušce	3 %
Pevnost v ohybu	31 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2,25 MPa

Typy materiálu ABS:

- Methyl methacrylate/Acrylonitrile/Butadiene/Styrene/Copolymer – ABSi
- Acrylonitrile/Butadiene/Styrene - ABS-M30
- Biocompatible Acrylonitrile/Butadiene/Styrene - ABS-M30i
- Acrylonitrile Butadiene Styrene – Electrostatic Dissipative - ABS-ESD7

Methyl methacrylate/Acrylonitrile/Butadiene/Styrene/Copolymer – ABSi

ABSi je jeden z typů základního materiálu ABS. Tento termoplast je průhledný a oproti základnímu provedení je houževnatější. Komponenty, které umožňují průchod světla jsou ve velkém počtu využívány v automobilovém, leteckém průmyslu nebo i v odvětvích kde je zapotřebí monitorovat tok tekutin (např. zdravotnictví). Svými mechanickými vlastnostmi je velice vhodný pro tisk zkušebních dílů, a to jak pro zástavbové zkoušky, tak i pro zkoušky funkčnosti daného dílu. Oproti základnímu materiálu ABS je ABSi dodáván pouze ve 3 barevných odstínech: červená, bílá a žlutá. [16]

Tabulka 2.: Mechanické vlastnosti materiálu ABSi [17]

Pevnost v tahu	37 MPa
Modul pružnosti v tahu	1,92 MPa
Prodloužení při tahové zkoušce	4,4 %
Pevnost v ohybu	62 MPa
Modul pružnosti v ohybu	1,92 MPa

Acrylonitrile/Butadiene/Styrene - ABS-M30

ABS-M30 má mnohem lepší mechanické vlastnosti než základní verze – ABS. Respektive až o 70 % větší pevnost v tahu a ohybu. Svými mechanickými vlastnostmi, lze díly používat při provozních podmínkách daného zařízení. Tisknutá vrstva daného modelu je silnější a pevnější než u ABS. Z cenového hlediska se jedná o jeden z nejdostupnějších materiálů s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi pro 3D tisk technologií FDM. Pro efektivnější vývoj produktu pracuje materiál s rozpustným supportním materiálem, využitelné barvy jsou potom: přírodní, bílá, černá, tmavě šedá, červená a modrá. [18]

Tabulka 3.: Mechanické vlastnosti materiálu ABS-M30 [19]

Pevnost v tahu	36 MPa
Modul pružnosti v tahu	2,4 MPa
Prodloužení při tahové zkoušce	4 %
Pevnost v ohybu	61 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2,3 MPa

Biocompatible Acrylonitrile/Butadiene/Styrene - ABS-M30i

Jak už název napovídá, jedná se o biokompatibilní materiál, který je využíván v lékařství, farmaceutickém a potravinářském průmyslu. V lékařství se používá pro tisk funkčních modelů jako jsou např. kolenní klouby. Mechanické vlastnosti materiálu ABS-M30i jsou velice dobré, obzvlášť vyniká vysoká pevnost materiálu v tahu a ohybu.

Vytisknuté modely určené pro výše zmíněné průmysly mohou být sterilizovány gama zářením nebo metodou EtO (Ethylen Oxide) ve sterilizačních komorách. Tento konstrukční termoplast využívá rozpustného podpůrného materiálu. [20]

Tabulka 4.: Mechanické vlastnosti materiálu ABS-M30i [21]

Pevnost v tahu	36 MPa
Modul pružnosti v tahu	2,4 MPa
Prodloužení při tahové zkoušce	4 %
Pevnost v ohybu	61 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2,3 MPa

Acrylonitrile Butadiene Styrene – Electrostatic Dissipative - ABS-ESD7

Oproti předchozím ABS typům má tato varianta unikátní vlastnost v rozptylu elektrostatického náboje, který předchází tvorbě statické elektřiny a zabraňuje ulpívání jemných prachových částic na jeho povrchu. ABS -ESD7 se používá pro koncové elektronické výrobky a přípravky pro montáž elektronických součástí. Používá se v provozu, kde hrozí nebezpečí poškození statickým nábojem, snížením výkonu nebo výbuchu zařízení. Materiál pracuje s rozpustnými podpůrnými materiály, tudíž není při jejich odstraňování zapotřebí ručního zásahu, a to i v případě složitých tvarů a dutin. [22]

Tabulka 5.: Mechanické vlastnosti materiálu ABS-ESD7 [22]

Pevnost v tahu	36 MPa
Modul pružnosti v tahu	2,4 MPa
Prodloužení při tahové zkoušce	3 %
Pevnost v ohybu	61 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2,4 MPa

3.3 Polycarbonate (PC)

Polykarbonát neboli PC je termoplast, který se uplatňuje v mnoha odvětvích průmyslu. Jak už v automobilovém, leteckém tak i ve lékařském.

Vytisknuté zkušební modely z polykarbonátu jsou velice přesné, pevné a odolné vůči rázům. Jeden z rozdílů mezi ABS a PC je ten, že polykarbonát má vyšší teplotu tání. Modely lze používat pro podobné účely jako ABS a jeho deriváty. Vytisknuté díly lze snadno opracovat dokončovacími operacemi, jako je broušení (ruční nebo strojní), lakování. Materiál je dodáván pouze v bílé barvě. [23]

Tabulka 6.: Mechanické vlastnosti materiálu PC [24]

Pevnost v tahu	68 MPa
Modul pružnosti v tahu	2,3 MPa
Prodloužení při tahové zkoušce	5 %
Pevnost v ohybu	104 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2,2 MPa

Typy PC:

- Polycarbonate ISO – PC-ISO
- Polycarbonate ABS – PC-ABS

Polycarbonate ISO – PC-ISO

Materiál PC-ISO je medicínsky kompatibilní. Z toho vyplívá, že je běžně používán ve zdravotnictví a v potravinářském průmyslu. Pro výrobní technologii FDM, jde o nejsilnější a nejvíce tepelně odolný biokompatibilní materiál. PC-ISO bývá sterilizován gama zářením a pomocí EtO (Ethylen Oxide). Materiál tím splňuje přísnou normu ISO 10993. Během tisku se vytvářejí, dle potřeby různé konstrukční podpory, které lze mechanicky odstranit. Materiál je dodáván ve dvou barevných provedení: bílá a průsvitná. [25]

Tabulka 7.: Mechanické vlastnosti materiálu PC-ISO [26]

Pevnost v tahu	57 MPa
Modul pružnosti v tahu	2 MPa
Prodloužení při tahové zkoušce	4 %
Pevnost v ohybu	90 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2,1 MPa

Polycarbonate ABS – PC-ABS

Jak už název napovídá, materiál PC-ABS je složen ze dvou velkých termoplastů pro výrobní technologii FDM. Tento kombinovaný materiál nabízí nejlepší mechanické vlastnosti jak ABS, tak polykarbonátu. Materiál je velice pevný, tepelně odolný (PC) a pružný (ABS). Je využíván v automobilovém, leteckém a elektro průmyslu. Konstrukční podpory lze odstranit chemicky nebo mechanicky. [27]

Tabulka 8.: Mechanické vlastnosti materiálu PC-ABS [28]

Pevnost v tahu	41 MPa
Modul pružnosti v tahu	1,9 MPa
Prodloužení při tahové zkoušce	6 %
Pevnost v ohybu	68 MPa
Modul pružnosti v ohybu	1,9 MPa

3.4 ULTEM 9085

Materiál ULTEM 9085 je termoplast pro technologii FDM, vyvinutý společností Stratasys. Je využíván v leteckém i automobilovém průmyslu. Tento materiál lze použít i pro vojenské účely. ULTEM 9085 se používá pro tisk prototypů a funkčních dílů, které jsou ideální pro pokročilé funkční prototypy. Materiál má vysoký poměr pevnosti ku hmotnosti a splňuje přísné hodnocení FST (flame, smoke, toxicity), neboli má velice dobrou odolnost vůči ohni a toxickým látkám. Oproti klasickému materiálu ABS-M30 má ULTEM 9085 dvakrát větší pevnost v tahu i ohybu. [29]

Tabulka 9.: Mechanické vlastnosti materiálu ULTEM 9085 [30]

Pevnost v tahu	71,6 MPa
Modul pružnosti v tahu	2,2 MPa
Prodloužení při tahové zkoušce	6 %
Pevnost v ohybu	115,1 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2,5 MPa

3.5 ULTEM 1010

Materiál ULTEM 1010 je na bázi pryskyřice. Tento materiál je nabízen ve dvou variantách, a to jak základní ULTEM 1010, tak biokompatibilní ULTEM 1010 CG. Jedná se o biokompatibilní materiál, který lze používat v potravinářském průmyslu. Materiál ULTEM 1010 se používá nejčastěji v automobilovém a leteckém průmyslu. Využití tohoto materiálu je možné i v medicíně, a to při tisku chirurgických nástrojů. Mezi jeho hlavní přednosti patří velice dobrá teplotní a chemická odolnost. Z tohoto materiálu lze technologií FDM vyrábět také tvářecí nástroje na výrobu kovových, plastových a kompozitních dílů. Pro výrobu forem pro kompozity je tento materiál velice vhodný, protože vydrží vysoké tlaky a teploty v autoklávu. [31]

Tabulka 10.: Mechanické vlastnosti materiálu ULTEM 1010 [32]

Pevnost v tahu	81 MPa
Modul pružnosti v tahu	2,7 MPa
Prodloužení při tahové zkoušce	3,3 %
Pevnost v ohybu	144 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2,82 MPa

3.6 Porovnání základních mech. vlastností materiálů používaných pro 3D tisk

Tabulka 11.: Porovnání mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk

	ABSi	ABS	ABS-M30	ABS-M30i	ABS-ESD7	PC	PC-ISO	PC-ABS	ULTEM 1010	ULTEM 9085
Pevnost v tahu [MPa]	37	37	36	36	36	68	57	41	81	71,6
Modul pružnosti v tahu [MPa]	1,92	2,32	2,4	2,4	2,4	2,3	2	1,9	2,7	2,2
Prodloužení při tahové zkoušce [%]	4,4	3	4	4	3	5	4	6	3,3	6
Pevnost v ohybu [MPa]	62	31	61	61	61	104	90	68	144	115,1
Modul pružnosti v ohybu [MPa]	1,92	2,25	2,3	2,3	2,4	2,2	2,1	1,9	2,82	2,5

Základní verze materiálu ABS má pevnost v tahu rovnu 37 MPa. Stejnou nebo podobnou hodnotu pevnosti v tahu mají všechny materiály na bázi ABS stejnou. Změnu mechanických vlastností ABS materiálu, se nejvíce projeví při ohybu. Základní verze ABS má pevnost v ohybu 31 MPa. ABS-M30 má skoro 2x větší pevnost v ohybu než základní verze ABS. Díky jeho velice dobrým mechanickým vlastnostem je vhodné tisknout i složitější díly, které lze používat v náročných provozních podmínkách. Materiál ABS-M30i má stejné mechanické vlastnosti jako ABS-M30, tento materiál je biokompatibilní verze ABS-M30. Nejčastěji se uplatňuje při tisku ve zdravotnictví.

U polykarbonátu je situace opačná. Základní materiál má oproti materiálu ABS-M30 daleko lepší mechanické vlastnosti, a to ve všech výše uvedených kritérii. Mechanická pevnost v tahu je dvakrát větší než u ABS-M30 a pevnost při ohybu je dokonce třikrát větší než u základního ABS. Mechanické vlastnosti biokompatibilního materiálu PC-ISO jsou sice nižší než u základní verze PC, ale tento materiál odolá daleko větším teplotám. Jde o nejsilnější a nejvíce tepelně odolný biokompatibilní materiál.

Lepší mechanické vlastnosti, než polykarbonát má materiál zvaný ULTEM. Oproti základním verzím výše zmíněných materiálů má třikrát větší pevnost v tahu a v ohybu než ABS. ULTEM 1010 a 9085 odolají větším teplotám než výše zmíněné druhy ABS a

PC. ULTEM 9085 má oproti ULTEM 1010 menší pevnost v tahu a v ohybu, ale zase má dvakrát větší prodloužení, a to o necelé tři procenta.

ULTEM 9085 je houževnatý a používá se pro tisk prototypů a funkčních dílů, které jsou ideální pro pokročilé funkční prototypy. ULTEM 1010 má velkou pevnost v tahu i ohybu. Nevýhodou tohoto materiálu je poměrně velká křehkost a malá vrubová houževnatost.

4. Proces výroby 3D modelu

Pro samotný tisk modelu, je nejprve nutné vytvořit CAD data neboli 3D model. CAD data lze definovat jako numerický model dané součásti nebo modelu, který se vytváří v počítačových konstrukčních programech. Mezi tyto programy lze zařadit program CATIA, NX, SolidWorks, atd. Data by měla být uzavřená, nejlépe objemové těleso – SOLID. Z konstrukčního programu se data musejí přenést do formátu STL.

Soubor STL neboli stereolithografický soubor je obecně kvalifikován jako CAD soubor. Formát byl vyvinut pro nejstarší technologii rapid prototyping, stereolithographii (SLA). Data ve formátu STL jsou vyjádřena pomocí trojúhelníkové sítě. Tyto data jsou přehlednější pro další úpravu, jelikož trojúhelníky tvoří povrch modelu a vytváří tak reálný dojem plošného modelu. STL data jsou používána pro přímý tisk na všech 3D tiskárnách. Jedná se o nejjednodušší vyjádření tvaru 3D modelu. [33]

Data jsou nahrána do příslušného programu, kde je nutné zadat vstupní a výstupní parametry. Po zadání všech potřebných parametrů, se vygeneruje vlastní program pro tiskárnu. Součástí programu jsou i automaticky vygenerované konstrukční podpory. Tyto podpory jsou následně tvořeny z podpůrného materiálu. Celý tiskařský program je ve finální fázi poslán do tiskárny.

5. Statická zkouška tahem

Mechanické zkoušky dělíme podle časového průběhu zatěžující síly na statické i dynamické. Statické zkoušky určují chování materiálu při působení stálých nebo plynule rostoucích sil. Zkušební těleso je zpravidla zatěžováno pouze jednou až do jeho přerušeni. Zkouška tahem se řadí do skupiny statických mechanických zkoušek. Dále do této skupiny patří zkoušky tlakem, ohybem, stříhem a krutem.

Tahová zkouška je prováděna na univerzálním zkušebním trhacím stroji, kde se do počítače ukládají data závislosti působící síly F na prodloužení zkušební vzorku. Prodloužení zkušební vzorku je snímáno průtahoměrem nebo je určeno z pohybu příčnicku zkušební stroje.

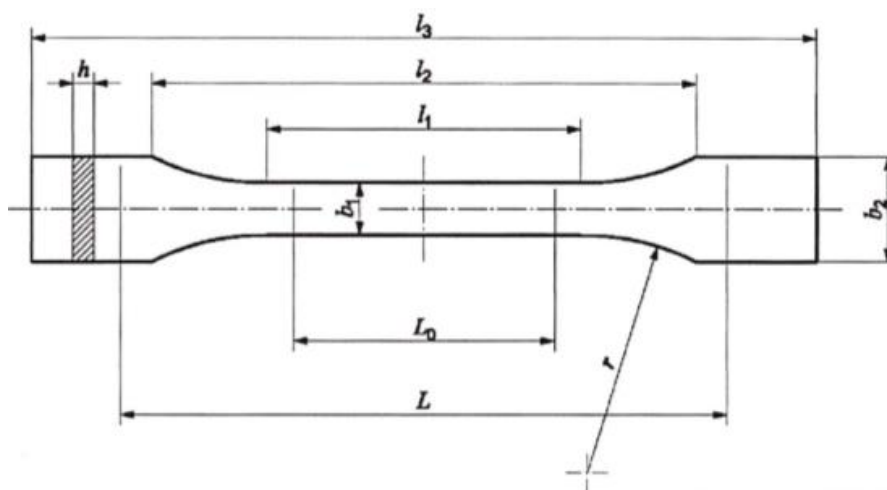
Zkouškou jsou zjišťovány čtyři normované vlastnosti. Jsou jimi mez pevnosti (R_m), mez kluzu (R_e), tažnost (A) a kontrakce (Z). Výsledek zkoušky je vykreslen ve smluvním diagramu. Zkušební vzorek plynule zatěžujeme a zjišťujeme závislost zátěžné síly (F) na prodloužení (Δl). Respektive napětí (σ) na poměrném prodloužení (ϵ). [34]

Stanovení tahových vlastností plastů dle normy ČSN EN ISO 527

Zkouška tahem pro plastové materiály vychází z normy ČSN EN ISO 527-1, která je přejata z normy ISO 527-1:2012. V normě ISO 527 jsou specifikovány obecné zásady pro stanovení tahových vlastností plastů a plastových kompozitů za definovaných podmínek zkoušení. [34]

5.1 Zkušební těleso

Pro zkoušku tahem, podle normy ČSN EN ISO 527-1, se používají 2 typy zkušební tělesa. Pokud je to možné, používají se zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek typu 1A a 1B (viz. obrázek xx). Typ 1A se používá pro vstřikovaná zkušební tělesa a lze ho použít také pro lisovaná zkušební tělesa, typ 1B pro obráběná zkušební tělesa. Tělesa mají normalizované rozměry normou ČSN EN ISO 527-2. [34]



Obr 5.1: Zkušební těleso typu 1A a 1B [34]

Rozměry zkušebních těles typu 1A a 1B jsou dány touto tabulkou, kde jsou rozměry jsou v milimetrech

Tabulka 12.: Rozměry zkušebních těles typu 1A a 1B [34]

	Typ zkušebního tělesa	1A	1B
l_3	Celková délka	170	≥ 150
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r	Poloměr	24 ± 1	$60,0 \pm 0,5$
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Šířka konců	$20,0 \pm 0,2$	
b_1	Šířka zúžené části	$10,0 \pm 0,2$	
h	Doporučená tloušťka	$4,0 \pm 0,2$	
l_0	Počáteční měřená délka	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
l	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	115 ± 1	115 ± 1

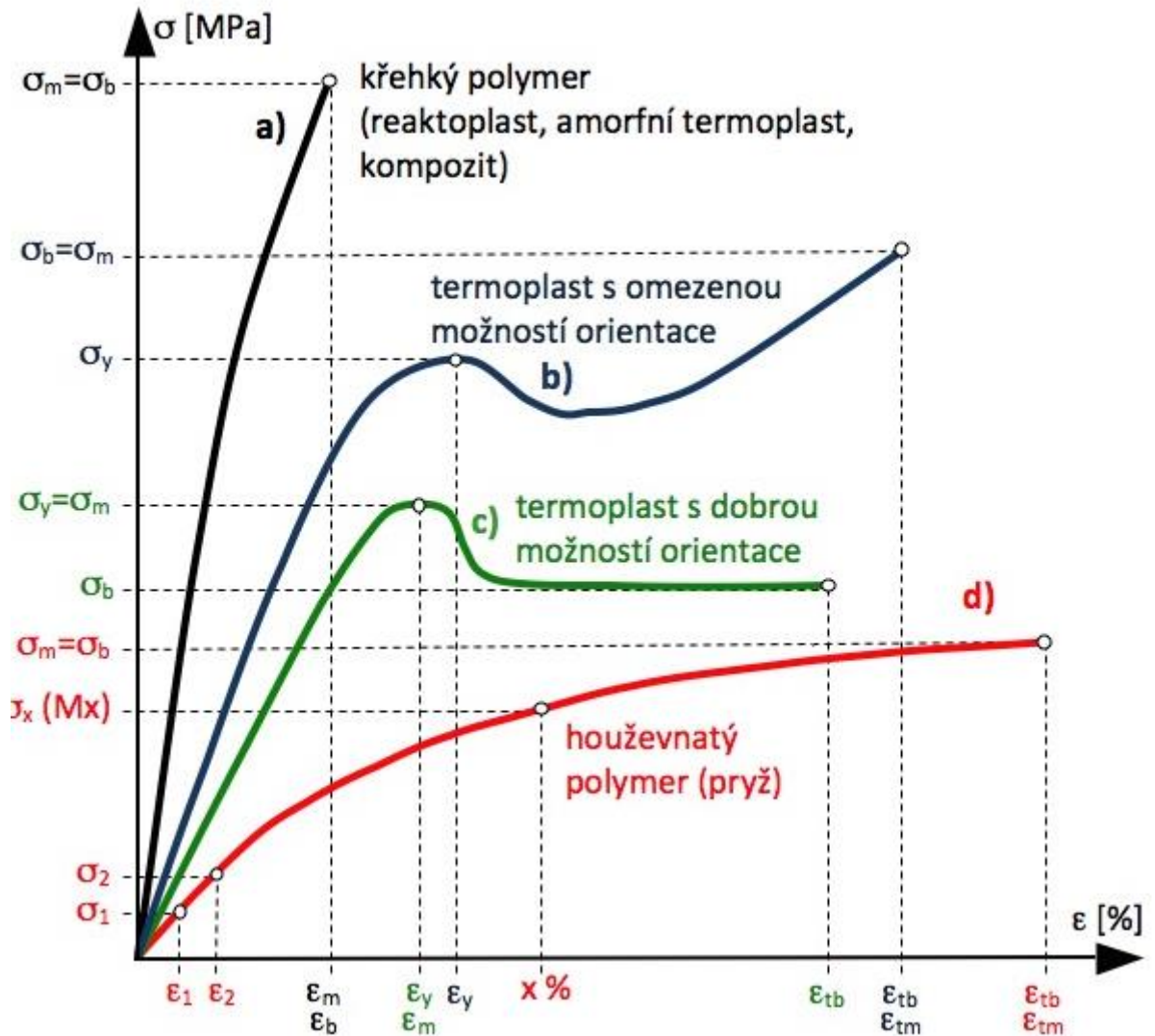
Pro víceúčelová tělesa se doporučuje počáteční měřená délka 75 mm. Počáteční měřená délka 50 mm bývá přijatelná pro řízení kvality a tam, kde je předepsáno.

5.2 Podstata zkoušky

Zkušební vzorek je protahován 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 měřené části zkušební vzorku. [34]

5.3 Vyjádření výsledků



Obr 5.3: Typické deformační křivky polymerů v tahu [34]

Na obrázku 5.3 jsou zobrazeny typické křivky v závislosti napětí na poměrném prodloužení. Křivka (a) představuje křehký materiál, který vykazuje přetržení bez meze kluzu. Křivka (d) představuje měkký materiál podobný pryži, ten vykazuje porušení při vyšších poměrných prodloužení (více jak 50%).

Během zkoušky je průběžně zaznamenávána síla (F) v závislosti na odpovídajících hodnotách zvětšení počáteční měřené délky a upínací vzdálenost mezi čelistmi. Je vhodné využívat automatického záznamového systému. [34]

5.3.1 Výpočet základních parametrů

Hodnoty napětí, se vypočítají pomocí základní rovnice:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [34]$$

σ – hodnota příslušného napětí [MPa]

F – příslušná naměřená síla [N]

S – počáteční plocha příčného průřezu [mm²] [34]

Hodnotu poměrného prodloužení je možné stanovit pomocí průtahoměru. Výpočet poměrného prodloužení představuje poměr měřených délek.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_o}{L_o} \quad [34]$$

ε – poměrné prodloužení [%]

L_o – počáteční měřená délka zkušební tělesa [mm]

ΔL_o – zvětšená počáteční délka zkušební tělesa [mm]

Modul pružnosti v tahu lze stanovit dvěma způsoby. Zaprvé modul pružnosti lze určit jako sečnu křivky napětí v závislosti na poměrném prodloužení a zadruhé pomocí regresivní analýzy.

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad [34]$$

E_t – modul pružnosti v tahu určen pomocí sečny [MPa]

E - modul pružnosti v tahu určen pomocí regresivní analýzy [MPa]

σ_1 – napětí, které je naměřeno při hodnotě poměrného prodloužení $\varepsilon_1 = 0,05$ %

σ_2 – napětí, které je naměřeno při hodnotě poměrného prodloužení $\varepsilon_2 = 0,25$ %

$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ – směrnice regresivní křivky [MPa]

Poissonův poměr se určí z následující rovnice:

$$\mu = -\frac{L_0}{n_0} \frac{\Delta n}{\Delta L_0} \quad [34]$$

μ – Poissonův poměr

L_0, n_0 – počáteční měřené délky v podélném, resp. příčném směru [mm]

Δn – pokles počáteční měřené délky zkušebního tělesa v příčném směru [mm]

ΔL_0 – odpovídající pokles počáteční měřené délky v podélném směru [mm]

6. PRAKTICKÁ ČÁST

6.1 Tisk normalizovaných zkušebních vzorků

K tisku zkušebních vzorků byla použita 3D tiskárna Stratasys Fortus 450mc, která používá výrobní technologii Fused Deposition Modeling (FDM). Materiál pro stavbu zkušebních vzorků byl zvolen ULTEM 1010 a podpurný materiál ULTEM 1010 Support. Testovací vzorky byly tištěny s využitím trysek – T14 (0,254 mm) pro modelový materiál a T16 (0,33 mm) pro podpurný materiál.

6.1.1 Stratasys Fortus 450mc

3D výrobní systémy Fortus využívají výrobní technologii Fused Deposition Modeling (FDM). Výroba modelu technologií FDM spočívá v nanášení tenkých vrstev roztaveného materiálu.

Tiskárna využívá software Insight. Tento software slouží k na polohování modelu při tisku, dále se používá k nastavení počátečních podmínek (jako např. tloušťka vrstvy, výběr materiálu, výběr stroje atd.). Nakonec je vygenerován program a je odeslán do programu ControlCenter. Ten se používá pro rozmístění modelů na pracovní ploše a k nakopírování dalších duplicitních modelů. Konečný program je odeslán do tiskárny.

Tiskárny Fortus 450mc nabízí maximální pracovní prostor o rozměrech 406 x 355 x 406 mm. Stroj má čtyři zásobníky pro materiály (dva pro modelový materiál, dva pro podpurný materiál). Tloušťka jedné vrstvy modelu je závislá na zvolené trysce. K dispozici jsou trysky T10 (0,127 mm – používá se pro nejjemnější detaily), T12 (0,178 mm), T14 (0,254 mm), T16 (0,33 mm). Výběr trysky pro daný materiál je volen v softwaru Insight. Každý materiál má předem nastavené nejmenší tloušťky vrstev, a to jak u modelového, tak i u podpurného materiálu (např. pro ULTEM 1010 lze použít nejmenší tryska T14 a pro podpurný materiál T16, pro ABS-M30 lze použít nejmenší tryska T10 a pro podpurný materiál také T10). Celkové rozměry stroje jsou 1270 x 902 x 1943 mm a váha je 601 kg. [35]

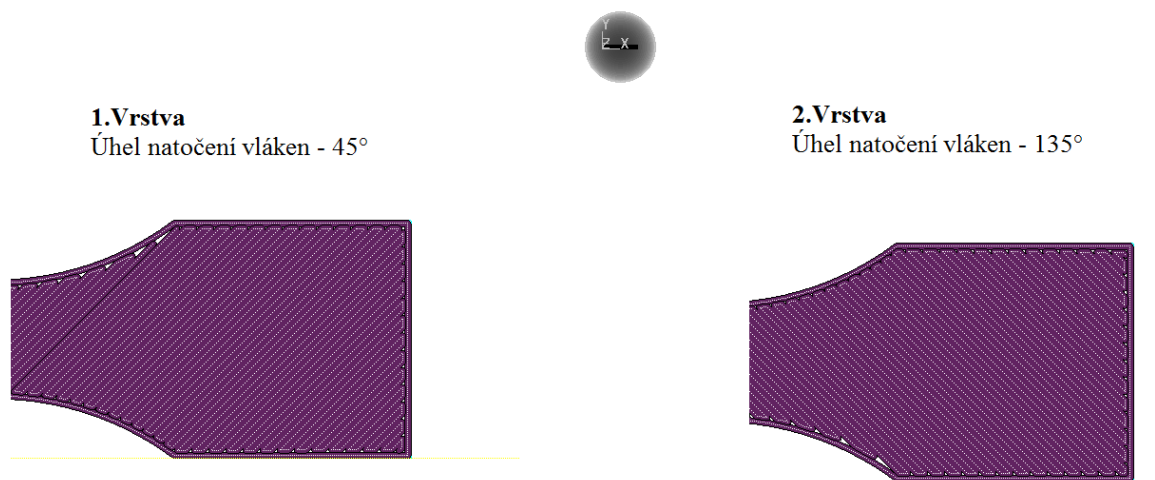
6.2 Stručný popis přípravy tisku pro technologii FDM pro stroj Stratasys Fortus 450

Tisková plocha v tiskárně je osazena speciální folií – podložkou, která se používá jako základ pro 3D tisk. Dle použitého materiálu se používá i vhodná folie. Před tiskem je nutné nainstalovat vhodnou trysku pro stavební a podpůrný materiál. Posléze jsou instalovány zásobníky s materiály. Vkládají se dva materiály (modelovací a podpůrný). Na ovládacím panelu stroje je nastavena pozice modelu na plastové fólii, která je pomocí vakua přisáta k pracovní ploše. Následně je spuštěn program. Na začátku každého programu je nutné ohřátí materiálů a trysek na předepsanou teplotu, a to jak modelového, tak podpůrného. Po ohřevu trysky dochází k nadefinování horizontální osy Z a tiskárna začne tisknout. Výsledný model je připravený k dalšímu použití. [35]

6.3 Způsoby jednotlivých tisků

Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$)

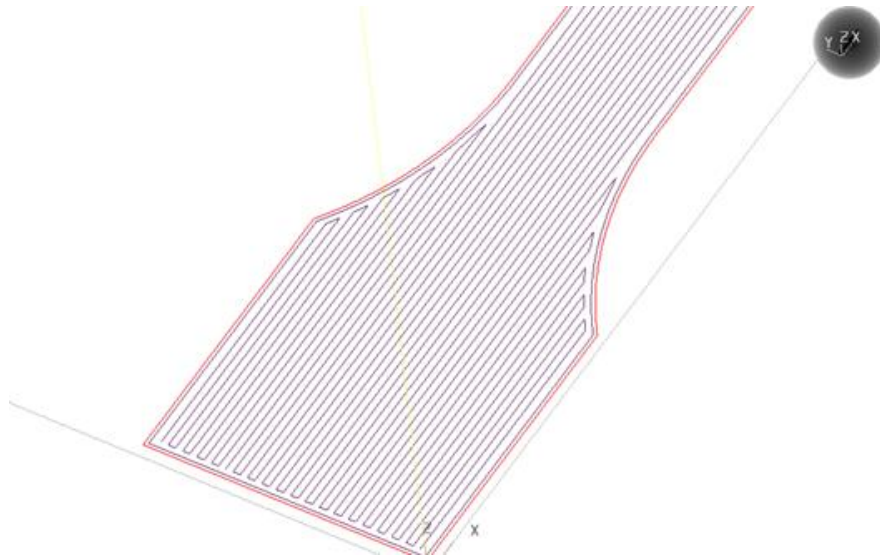
Zkušební vzorek při tomto tisku je vzhledem k rovině xz natočen pod úhlem 0° . V první vrstvě jsou vlákna tisknutá v rovině xy pod úhlem 45° . (viz. Obr.6.3.1) Ve druhé vrstvě jsou vlákna budoucího zkušebního vzorku tisknuta v rovině xy pod úhlem 135° . (viz. Obr.6.3.1) Další vrstvy se postupně opakují ve stejném pořadí. Všech 21 vrstev se vzájemně překrývají a jsou tisknuty přes sebe, tím se výsledný model zpevní.



Obr.6.3.1.: Ukázka prvních dvou vrstev tisknutého modelu Tisku ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$)

Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) - totožná orientace vláken

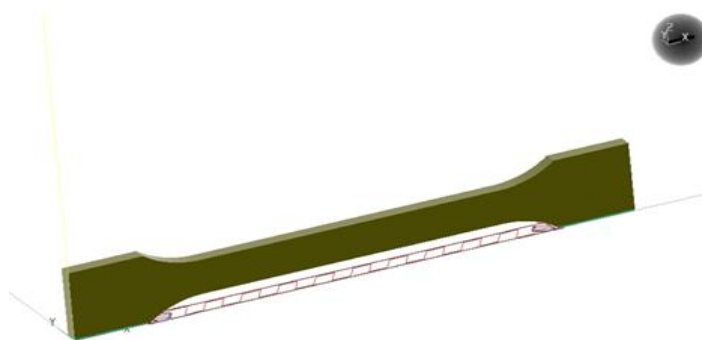
Zkušební normalizovaný vzorek je stejně orientovaný v prostoru jako předešlý tisk, tzn. vzorek je vzhledem k rovině xz natočen pod úhlem 0° . Vlákná první vrstvy jsou tisknuta v rovině xy pod úhlem 0° a jsou vzájemně rovnoběžná. Dalších zbývajících dvacet vrstev má totožnou orientaci.



Obr.6.3.2.: Zobrazení jednotlivých totožně orientovaných vláken materiálu pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) - totožná orientace vláken

Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$)

Zkušební vzorek při tomto způsobu tisku je v rovině xz natočen pod úhlem 0° a v rovině yz natočen pod úhlem 90° . V první vrstvě jsou vlákna tisknutá v rovině xy pod úhlem 45° . Ve druhé vrstvě jsou vlákna budoucího zkušebního vzorku tisknuta v rovině xy pod úhlem 135° . Další vrstvy se postupně opakují ve stejném pořadí. Všech 84 vrstev se vzájemně překrývají a jsou tisknuty přes sebe, tím se výsledný model zpevní.



Obr.6.3.3.: Naorientovaný model v prostoru umístěný na pracovní ploše pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$)

Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 90^\circ$) – totožná orientace vláken

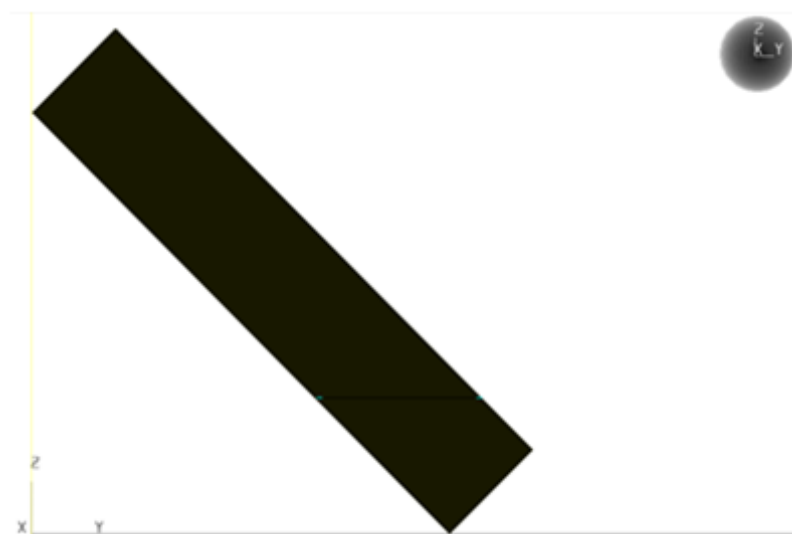
Zkušební normalizovaný vzorek je stejně orientovaný v prostoru jako předešlý tisk (tzn. rovina $xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 90^\circ$). Vlákná první vrstvy jsou tisknuta v rovině xy pod úhlem 0° a jsou vzájemně rovnoběžná. Všechny další vrstvy mají totožnou orientaci.



Obr.6.3.4.: Zobrazení jednotlivých totožně orientovaných vláken materiálu v rovině xy , pro Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 90^\circ$) - totožná orientace vláken

Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$)

Vzorek je při tomto způsobu tisku v rovině xz natočen pod úhlem 0° , v rovině yz natočen pod úhlem 135° . V první vrstvě jsou vlákna tisknutá v rovině xy pod úhlem 45° . Ve druhé vrstvě jsou vlákna budoucího zkušební vzorku tisknuta v rovině xy pod úhlem 135° . Další vrstvy se postupně opakují ve stejném pořadí. Všech 71 vrstev se vzájemně překrývají a jsou tisknuty přes sebe, tím se výsledný model zpevní.



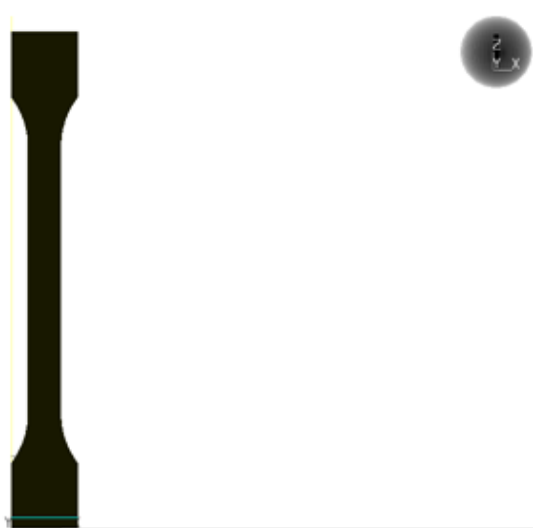
Obr.6.3.5.: Naorientovaný model v rovině yz umístěný na pracovní ploše pro Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$)

Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) – totožná orientace vláken

Zkušební normalizovaný vzorek je stejně orientovaný v prostoru jako předešlý tisk (tzn. rovina $xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$). Vlákná první vrstvy jsou tisknuta v rovině xy pod úhlem 0° a jsou vzájemně rovnoběžná. Všechny další vrstvy mají totožnou orientaci.

Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$)

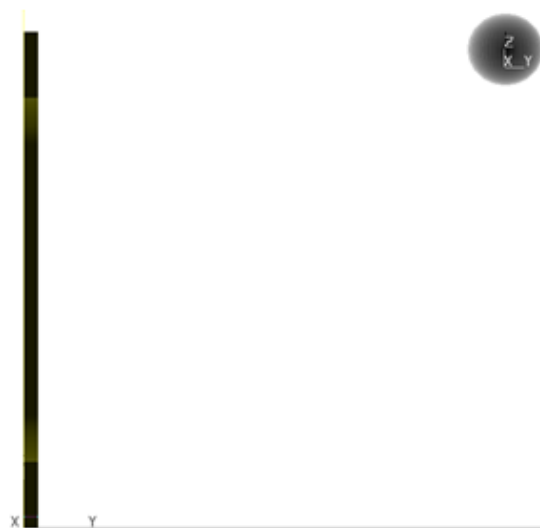
Vzorek je při této metodě tisku kolmý k pracovní ploše. V první vrstvě jsou vlákna tisknutá v rovině xy pod úhlem 45° . Ve druhé vrstvě jsou vlákna budoucího zkušební vzorku tisknuta v rovině xy pod úhlem 135° . Další vrstvy se postupně opakují ve stejném pořadí. Všech 596 vrstev se vzájemně překrývají a jsou tisknuty přes sebe, tím se výsledný model zpevní.



Obr.6.3.6.: Naorientovaný model v rovině

xz umístěný na pracovní ploše pro

Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$)



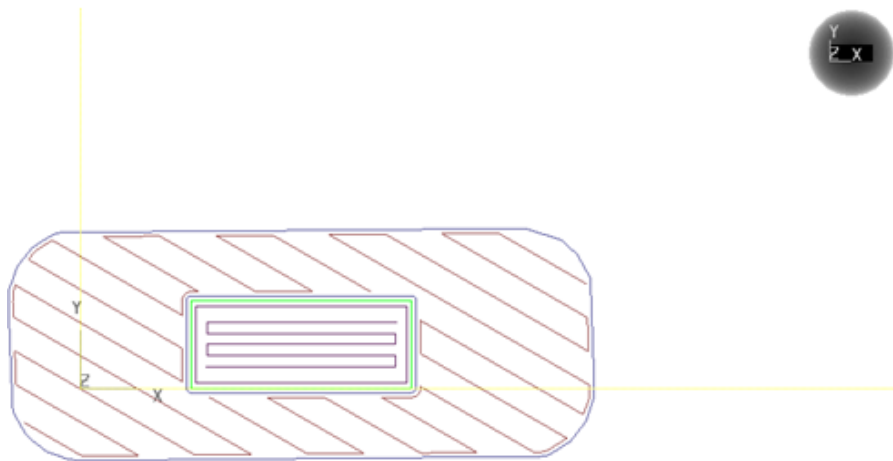
Obr.6.3.7.: Naorientovaný model v rovině

yz umístěný na pracovní ploše pro

Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$)

Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$) – totožná orientace vláken

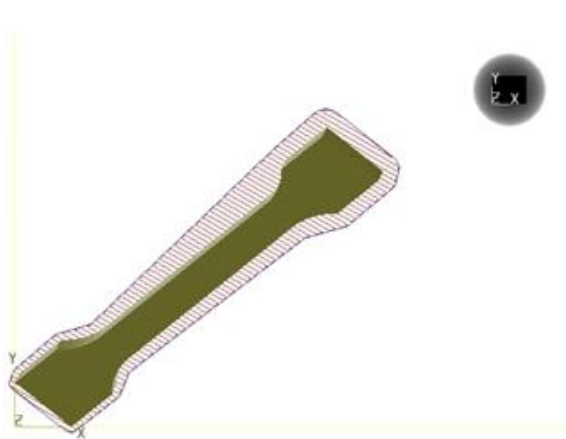
Zkušební normalizovaný vzorek je stejně orientovaný v prostoru jako předešlý tisk (tzn. rovina $xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$). Vlákná první vrstvy jsou tisknuta v rovině xy pod úhlem 0° a jsou vzájemně rovnoběžná. Všechny další vrstvy mají totožnou orientaci. Při tomto tisku je velká spotřeba podpůrného materiálu, protože z hlediska stability vzorku je po obvodu modelu tisknuta stabilizační konstrukce. Ta zabraňuje zborcení modelu během tisku.



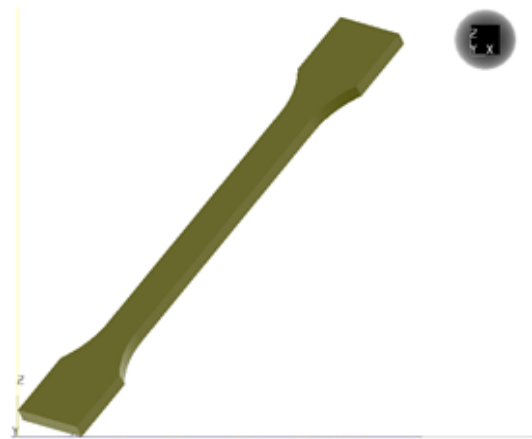
Obr.6.3.8.: Zobrazení jednotlivých totožně orientovaných vláken materiálu, v rovině xy , pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$) - totožná orientace vláken

Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$)

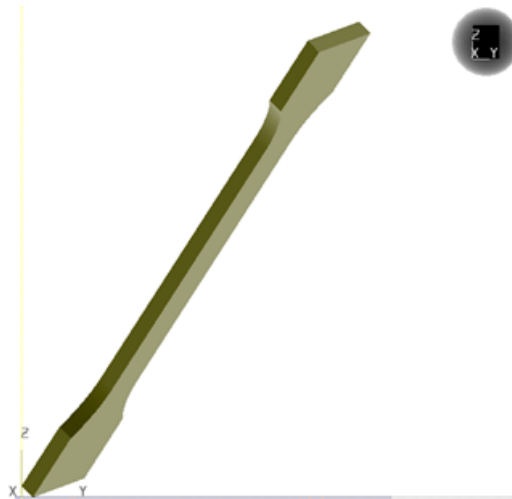
Této polohy při tisku je dosaženo, automatickou orientací v softwaru Insight. Zkušební vzorek v této poloze je v rovině xy natočen pod úhlem 45° , v rovině xz natočen pod úhlem 45° a v rovině yz natočen pod úhlem 45° . V první vrstvě jsou vlákna tisknutá v rovině xy pod úhlem 45° . Ve druhé vrstvě jsou vlákna budoucího zkušební vzorku tisknuta v rovině xy pod úhlem 135° . Další vrstvy se postupně opakují ve stejném pořadí. Všech 442 vrstev se vzájemně překrývají a jsou tisknuty přes sebe, tím se výsledný model zpevní.



Obr.6.3.9.: Naorientovaný model v rovině xy umístěný na pracovní ploše pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$)



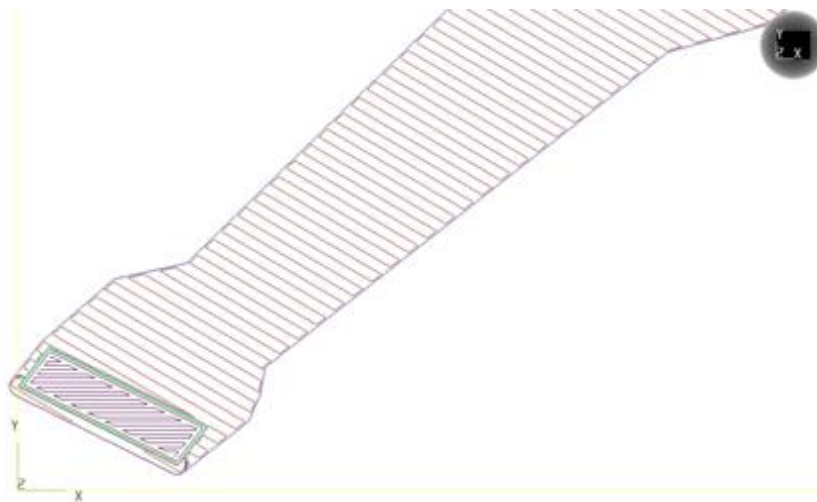
Obr.6.3.10.: Naorientovaný model v rovině xz umístěný na pracovní ploše pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$)



Obr.6.3.11.: Naorientovaný model v rovině yz umístěný na pracovní ploše
pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$)

Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) – totožná orientace vláken

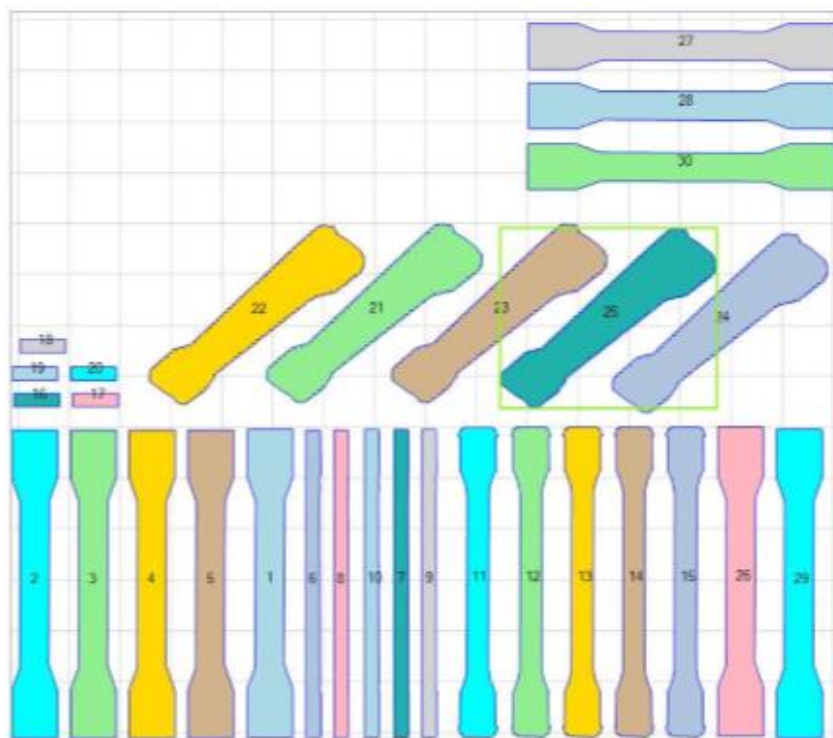
Zkušební normalizovaný vzorek je stejně orientovaný v prostoru jako předešlý tisk (tzn. rovina $xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$). Vlákná první vrstvy jsou tisknuta v rovině xy pod úhlem 0° a jsou vzájemně rovnoběžná. Všechny další vrstvy mají totožnou orientaci. Při tomto tisku je velká spotřeba podpůrného materiálu, a to z důvodu orientace modelu v prostoru.



Obr.6.3.12.: Zobrazení jednotlivých totožně orientovaných vláken materiálu, v rovině
 xy , pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) - totožná orientace vláken

6.4 Rozmístění modelů na pracovní ploše

Všechny nadefinované modely jsou nahrány do programu ControlCenter, kde je každý model čtyřikrát duplikován. Duplikování modelů se provádí pro zprůměrování hodnot během tahové zkoušky. Všechny 45 zkušebních vzorků jsou tisknuty z modelového materiálu ULTEM 1010 (tryska T14) a konstrukční podpory z podpůrného materiálu ULTEM 1010 Support (tryska T16). Z důvodu velkého počtu vzorků a velikosti pracovní plochy je tisk rozdělen na dvě části. Výsledná spotřeba materiálu ULTEM 1010 je 550,32 cm³ a ULTEM 1010 Support je 440,88 cm³. Konečný čas tisku všech částí je 34 hodin a 12 minut.



Obr.6.4.: Rozmístěné modely vzorků na pracovní ploše 3D tiskárny – 1.Část

Legenda

Čísla 1-5 – Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$)

Čísla 6-10 – Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 90^\circ$)

Čísla 11-15 – Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$)

Čísla 16-20 – Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 90^\circ$, $yz\ 90^\circ$)

Čísla 21-25 – Tisk ($xy\ 45^\circ$, $xz\ 45^\circ$, $yz\ 45^\circ$)

Čísla 26-30 – Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$) – totožná orientace vláken

6.5 Kontrola rozměrů vytisknutých vzorků

Pro zkoušku tahem jsou důležité rozměry zkušební vzorku na dvou místech, a to šířka zúžené části vzorku a tloušťka ve zúžené části. Ke kontrole a k naměření hodnot, které jsou nutné pro tahovou zkoušku, byl použit mikrometr s přesností 0,01 mm. CAD model má šířku 10 mm a tloušťku 4 mm, ale výsledné hodnoty jednotlivých rozměrů se liší. (viz. Příloha 17) To je dáno orientací modelu během výroby. Ideální orientace pro šířku vyšel tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$) a pro tloušťku vzorku je ideální orientace při tisku ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 90^\circ$).

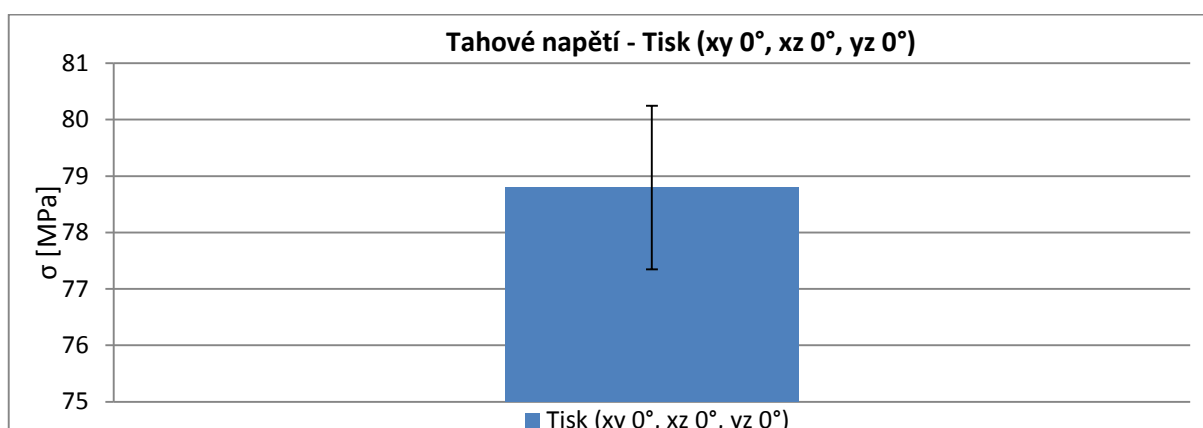
6.6 Zkouška tahem

Mechanická zkouška tahem byla prováděna na zkušebním trhacím stroji TiraTest 2300. Zkouška tahem byla prováděna dle normy ČSN EN ISO 527-2. Ke zkoušce bylo použito všech 44 zkušebních vzorků. Všechny zkoušky byly prováděny s totožnými počátečními podmínkami. Rychlost posuvu čelistí byla zvolena 50 mm/min. Vzdálenost mezi měřícími čelistmi byla nastavena na hodnotu 115 mm. Během zkoušky je v programu TiraTest 2300 zaznamenána závislost zvětšující se síly (F) na odpovídajících hodnotách zvětšení počáteční měřené délky zkušební vzorku. Výsledek zkoušky je vyobrazen ve smluvním diagramu tahové zkoušky. [34]

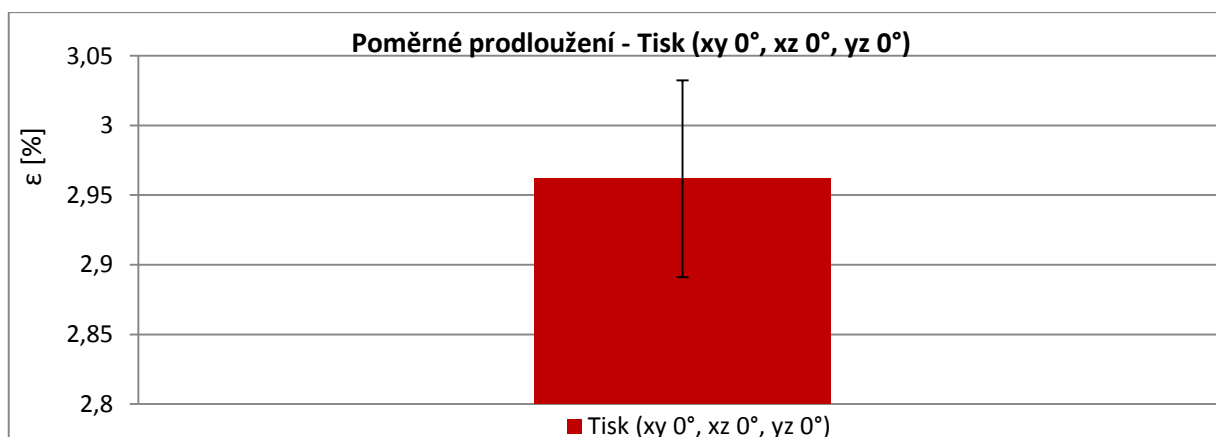
Každý zkušební vzorek byl podroben zkoušce tahem a vyhodnocen. Pro výsledný diagram jednotlivých skupin vzorků, je vhodné dělat ze všech výsledků aritmetický průměr. Pro nejvyšší hodnoty výsledné síly a prodloužení zkušební tyče je nutné vypočítat další důležité parametry (σ , ϵ). Všechny aritmetické průměry všech výsledků se posléze porovnají.

Tahová zkouška pro Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$)

Zkušební vzorky vyráběné technologií FDM byly během tisku naorientovány v rovině xy pod úhlem 0° , v rovině xz a yz také pod úhlem 0° . Jednotlivá vlákna materiálu tiskne tryska T14 v rovině xy pod úhlem 45° . V další vrstvě jsou vlákna budoucího zkušebního vzorku tisknuta v rovině xy pod úhlem 135° . Průměrná hodnota šířky zúžené části je 10,066 [mm] a průměrná tloušťka pěti vzorků je 4,19 [mm].



Graf 1.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$)

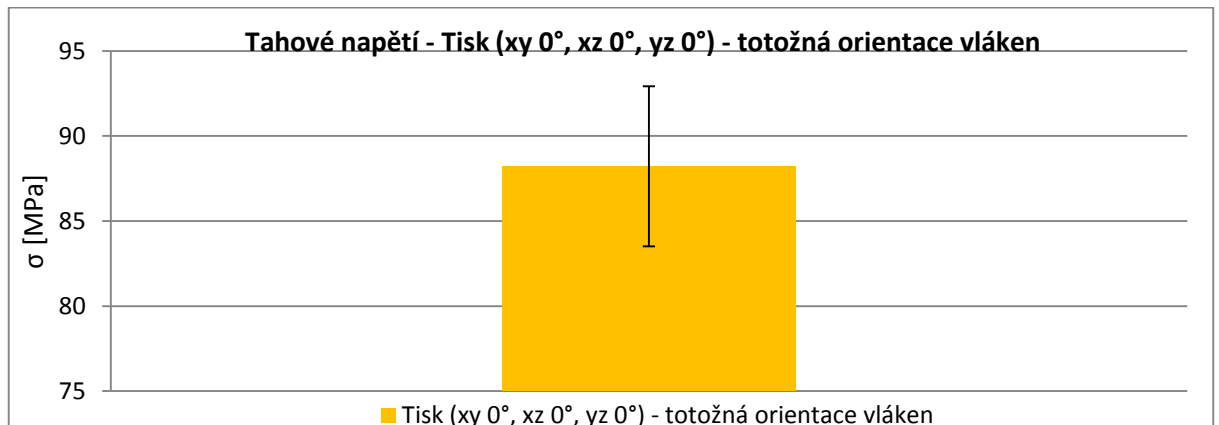


Graf 2.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$)

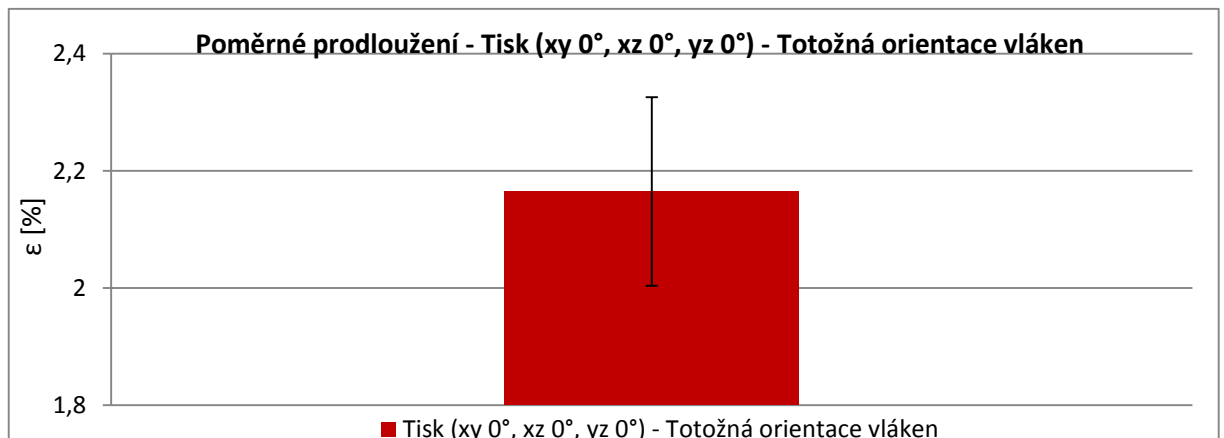
Všech 5 zkušebních vzorů, které byly zatěžovány postupně zvyšující se silou, mají exponenciální průběh diagramu. (viz. Příloha 1) Největší tahové napětí zaznamenal v pořadí pátý vzorek, který překročil hranici 80 [MPa] – přesněji 80,7 [MPa]. Tohoto napětí bylo dosaženo při působení síly o velikosti 3402,6 [N]. Třetí zkušební vzorek má podobný průběh diagramu jako vzorek pátý, dosáhl podobného tahového napětí (79,8 [MPa]). Oba vzorky (třetí a pátý) jako jediní, překročily hranici 3 % poměrného prodloužení. Hodnoty poměrného prodloužení jsou si velice blízké ($\epsilon_3 = 3,022$ [%], $\epsilon_5 = 3,018$ [%]). Oba vzorky dosáhly největšího prodloužení, které přesahuje 1,5 [mm].

Tahová zkouška pro tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$) - totožná orientace vláken

Zkušební vzorky, které byly vyráběné technologií FDM, byly během tisku naorientovány v rovině xy pod úhlem 0° , v rovině xz a yz také pod úhlem 0° . Všechna vlákna materiálu tiskne hlava s tryskou T14 v rovině xy pod úhlem 0° a všechna vlákna jsou vzájemně rovnoběžná. Průměrná hodnota šířky zúžené části je 9,754 [mm] a průměrná tloušťka pěti vzorků je 4,118 [mm].



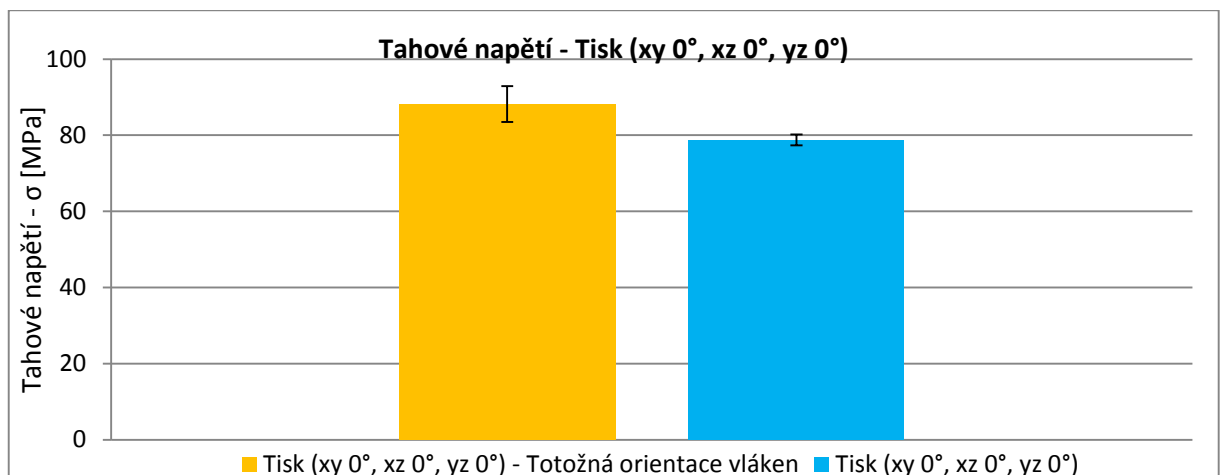
Graf 3.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$) – totožná orientace



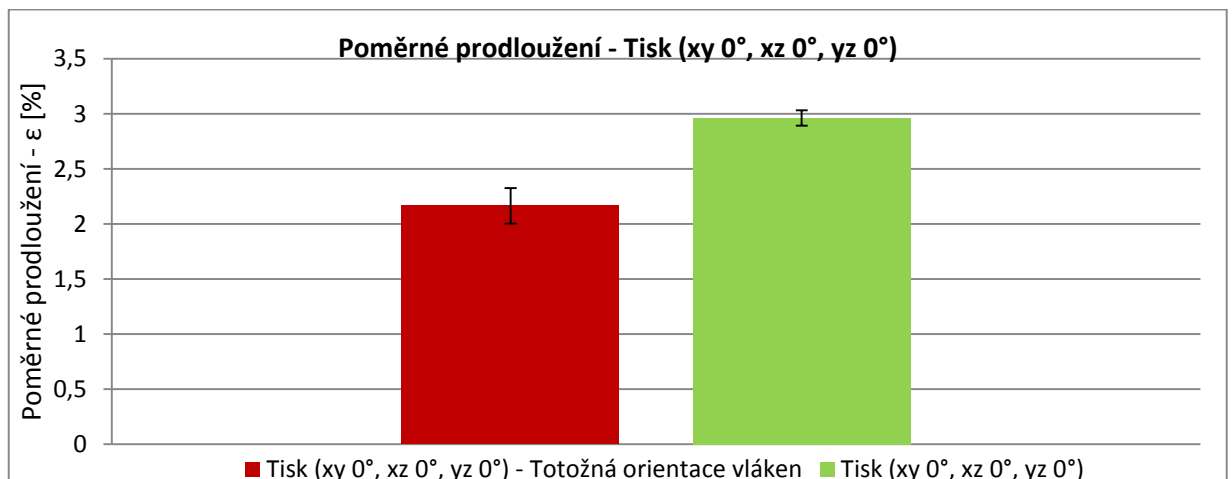
Graf 4.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$) – totožná orientace vláken

Všech 5 zkoušených vzorů, které byly zatěžovány postupně zvyšující se silou, má exponenciální průběh diagramu. Exponenciální růst je zde velice pomalý, průběh diagramu lze přirovnat k lineárnímu. (viz. Příloha 2) Největší tahové napětí zaznamenal v pořadí druhý vzorek, který překročil hranici 92 [MPa] – přesněji 92,38 [MPa]. Tohoto napětí bylo dosaženo při působení síly o velikosti 3714,7 [N]. Třetí zkušební vzorek má podobný průběh diagramu jako vzorek druhý a dosáhl tahového napětí (91,4 [MPa]). Maximální poměrné prodloužení dosáhl v pořadí druhý vzorek, kde $\varepsilon_2 = 2,33$ [%]. U druhého vzorku bylo zjištěno prodloužení o 1,166 [mm].

Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) vs. Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) - totožná orientace vláken



Graf 5.: Střední hodnoty tahových napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) – totožná orientace vláken



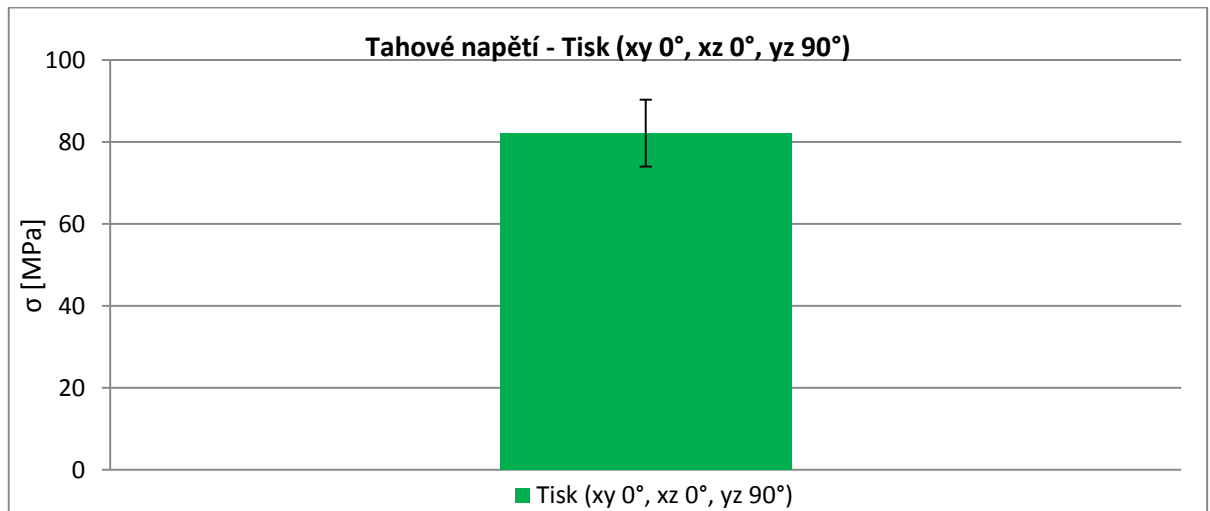
Graf 6.: Střední hodnoty poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) – totožná orientace vláken

Výsledné závislosti vznikly zprůměrováním všech zatěžovaných vzorků. Všechny závislosti mají exponenciální průběh. Křivka Tisku ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) má větší exponenciální růst, než křivka Tisku ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$), kde je totožná orientace vláken. Průběh křivky u orientovaných vláken připomíná lineární průběh. (viz. Příloha 3) Výsledný rozdíl tahových napětí mezi průměrnými závislostmi je 11,5 [MPa] ve prospěch tisku s orientovanými vlákny. Vzorky s orientovanými vlákny mají všechny vrstvy vytisknuty v totožných souřadnicích, tím dochází k lepším vazebním silám mezi jednotlivými vlákny při tahovém namáhání. Vazební síly u orientovaných vláken mají velký vliv, také na hodnotu poměrného prodloužení.

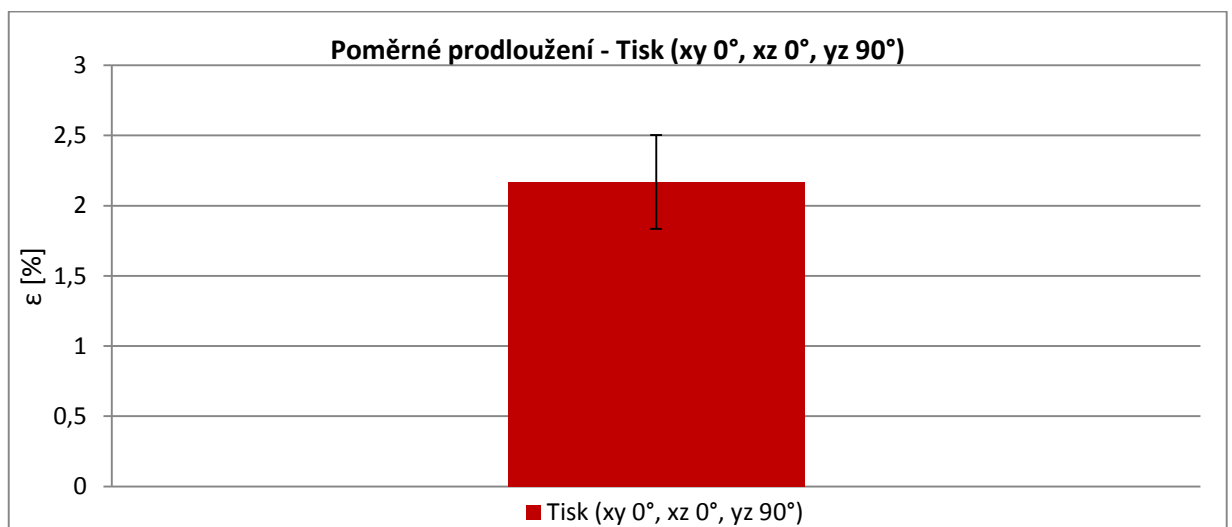
Všechny zkušební vzorky s orientovanými vlákny dosáhly menšího prodloužení než vzorky u Tisku ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$). Rozdíl poměrného prodloužení mezi průměrnými závislostmi je 0,7 %. To je dáno vazbami vláken, které na sebe vzájemně působí. U tisku ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$) jsou tyto vazby silnější a dovolují většímu prodloužení zkušebního vzorku.

Tahová zkouška pro tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 90^\circ$)

Zkušební vzorky, které byly vyráběné technologií FDM, byly během tisku naorientovány v rovině yz pod úhlem 90° a v rovině xy a xz pod úhlem 0° . Všechna vlákna materiálu tiskne hlava s tryskou T14 v rovině xy pod úhlem pod úhlem 45° . V další vrstvě jsou vlákna budoucího zkušebního vzorku tisknuta v rovině xy pod úhlem 135° . Průměrná hodnota šířky zúžené části je 10,244 mm a průměrná tloušťka čtyř vzorků je 4,048 mm.



Graf 7.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 90^\circ$)



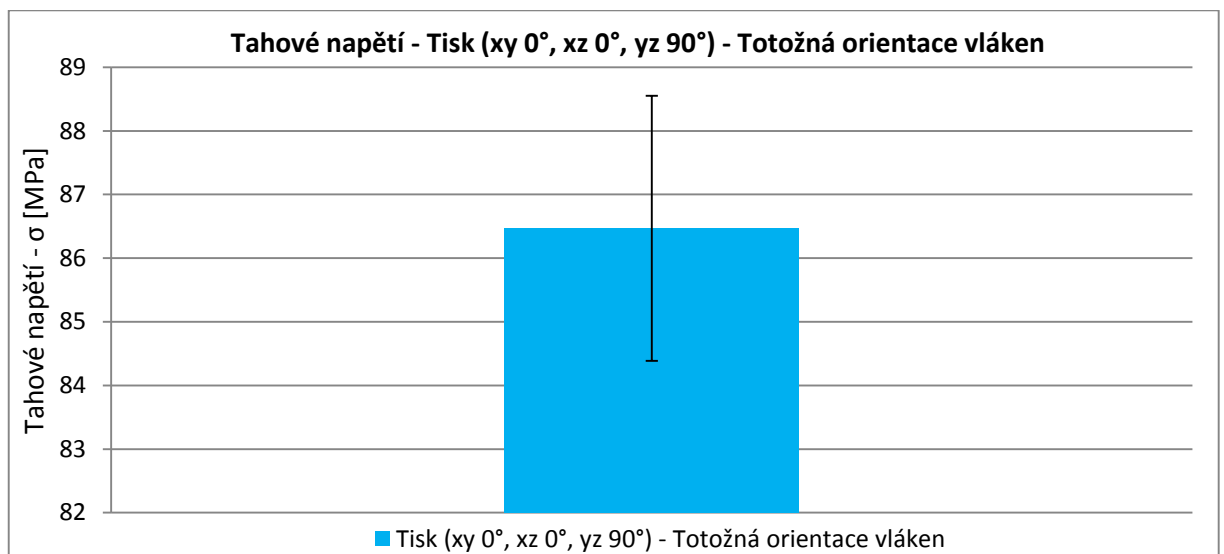
Graf 8.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 90^\circ$)

Všechny 4 zkušební vzorky, které byly zatěžovány postupně zvyšující se silou, mají exponenciální průběh diagramu. (viz. Příloha 4) Největší tahové napětí zaznamenal v pořadí druhý vzorek, který se dostal nejbližší k hranici 90 [MPa] – přesněji 89,7 [MPa]. K dosažení maximálního napětí bylo potřeba působit silou o velikosti 3712 [N].

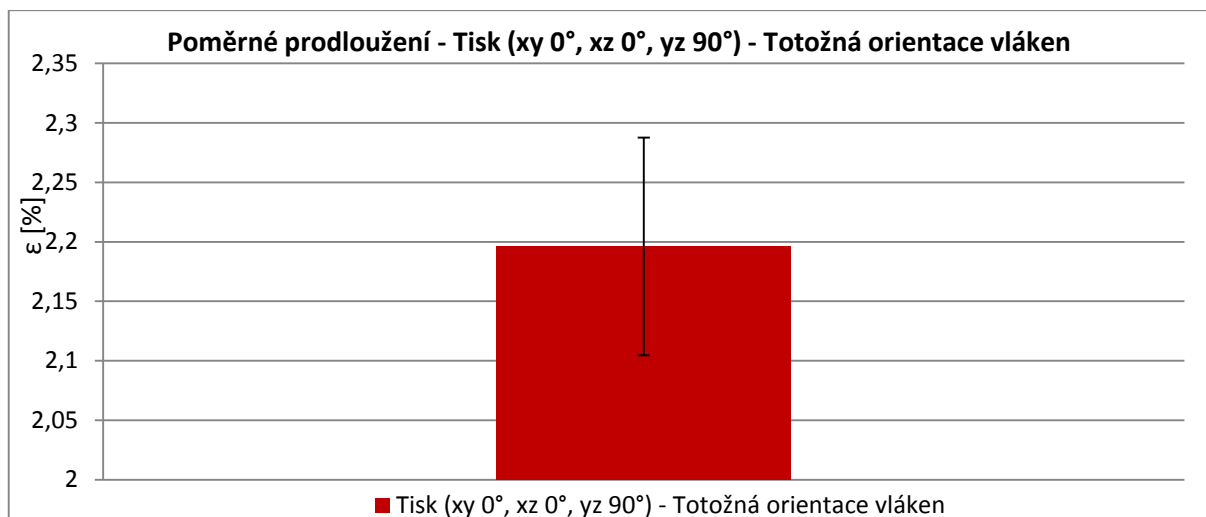
Třetí zkušební vzorek má podobný průběh diagramu jako vzorek pátý, který dosáhl i podobného tahového napětí (88,3 [MPa]). Hodnoty poměrného prodloužení jsou si velice blízké ($\varepsilon_2 = 2,48$ [%], $\varepsilon_3 = 2,42$ [%]). Oba vzorky dosáhly největšího prodloužení, které přesahuje 1,2 [mm].

Tahová zkouška pro tisk (xy 0°, xz 0°, yz 90°) – totožná orientace vláken

Zkušební vzorky, které byly vyráběné technologií FDM, byly během tisku naorientovány v rovině yz pod úhlem 90° a v rovině xz a xy pod úhlem 0°. Všechna vlákna materiálu tiskne hlava s tryskou T14 v rovině xy pod úhlem 0° a všechna vlákna jsou vzájemně rovnoběžná. Průměrná hodnota šířky zúžené části je 10,213 [mm] a průměrná tloušťka čtyř vzorků je 3,81 [mm].



Graf 9.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 90°) – totožná orientace vláken

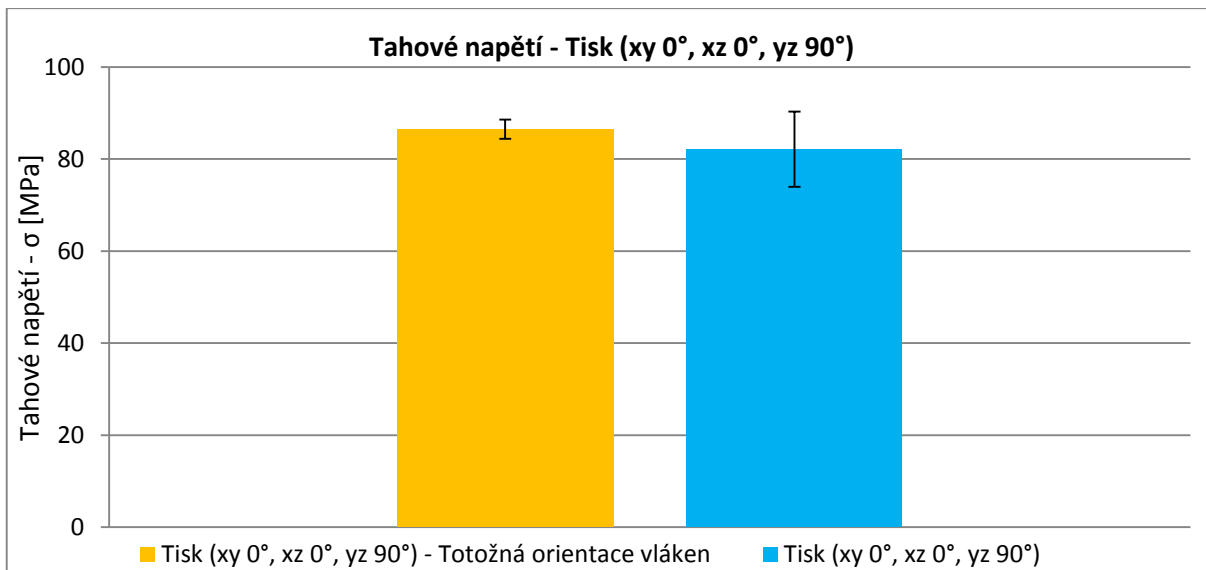


Graf 10.: *Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 90°) – totožná orientace vláken*

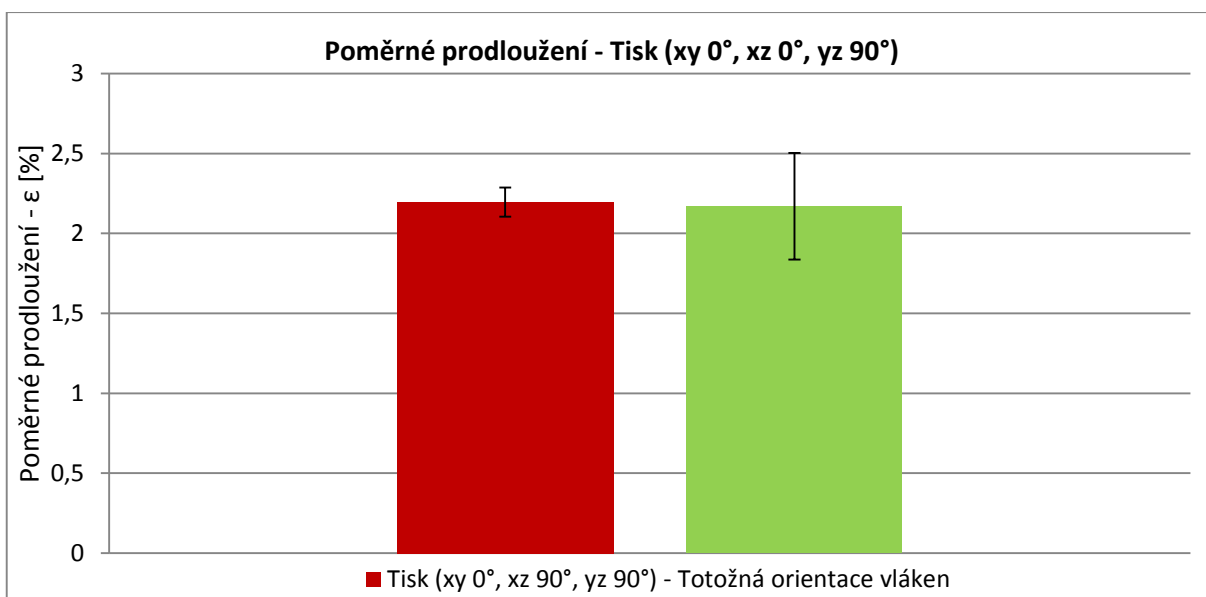
Čtyři zkoušené vzorky, které byly zatěžovány postupně zvyšující se silou, mají exponenciální průběh diagramu. (viz. Příloha 5) Největší tahové napětí zaznamenal poslední vzorek, který se nejvíce přiblížil k hodnotě 90 [MPa] – přesněji 88,8 [MPa]. Tohoto napětí bylo dosaženo při působení síly o velikosti 3645,1 [N]. Maximální poměrné prodloužení dosáhl taktéž poslední vzorek, kde $\epsilon_4 = 2,32$ [%]. Poslední vzorek dosáhl maximálního prodloužení své délky o 1,161 [mm].

Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 90°) vs. Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 90°) - totožná orientace vláken

Výsledné závislosti vznikly zprůměrováním všech vzorků. Všechny závislosti mají exponenciální průběh. Obě křivky mají shodný průběh, ale křivka Tisku (xy 0°, xz 0°, yz 90°) má větší exponenciální růst, než křivka Tisku (xy 0°, xz 0°, yz 90°), kde je totožná orientace vláken. (viz. Příloha 6) Rozdíl tahového napětí mezi průměrnými závislostmi je velice malý a má hodnotu 0,9 [MPa] ve prospěch tisku s překrývající mi se vlákny jednotlivých vrstev. Vláknina materiálu ve zkušebním vzorku byla tisknuta, oproti Tisku (xy 0°, xz 0°, yz 0°), příčně. To přispělo k zhoršení vazebních sil mezi vlákny a vrstvami zkušebního tělesa. Vazby nevydrží tak velké tahové namáhání jako u předešlého způsobu výroby a po překročení určité tahové síly se vazby poruší a dojde k přetržení zkušebního tělesa. Všechny zkušební vzorky s orientovanými vlákny dosáhly menšího prodloužení než vzorky u Tisku (xy 0°, xz 0°, yz 90°). Rozdíl poměrného prodloužení mezi průměrnými závislostmi je 0,15 %. Rozdíl v prodloužení těles je pouze 0,07 [mm] a prodloužení v obou případech je identické.



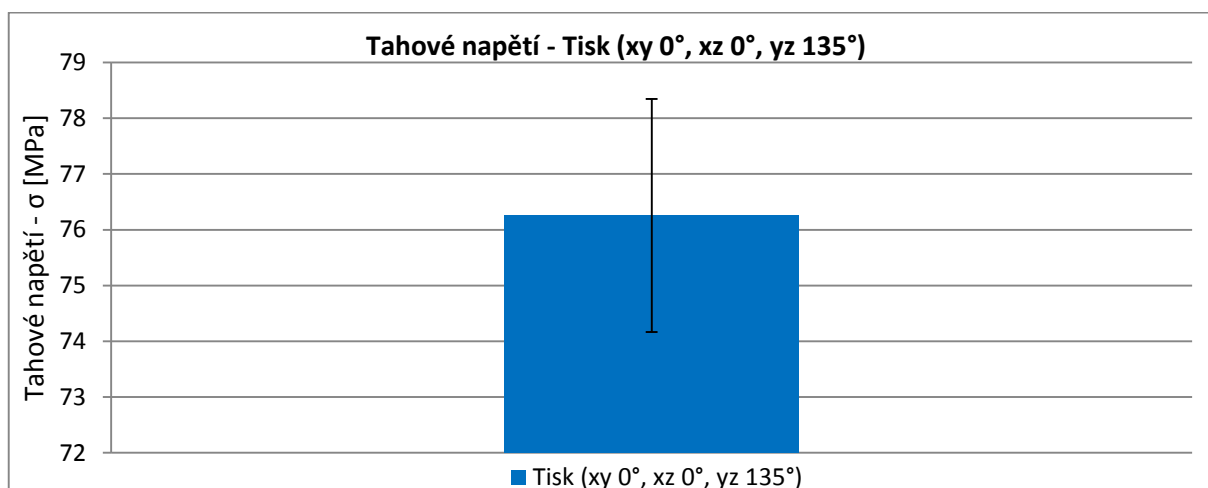
Graf 11.: Střední hodnoty tahových napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) – totožná orientace vláken



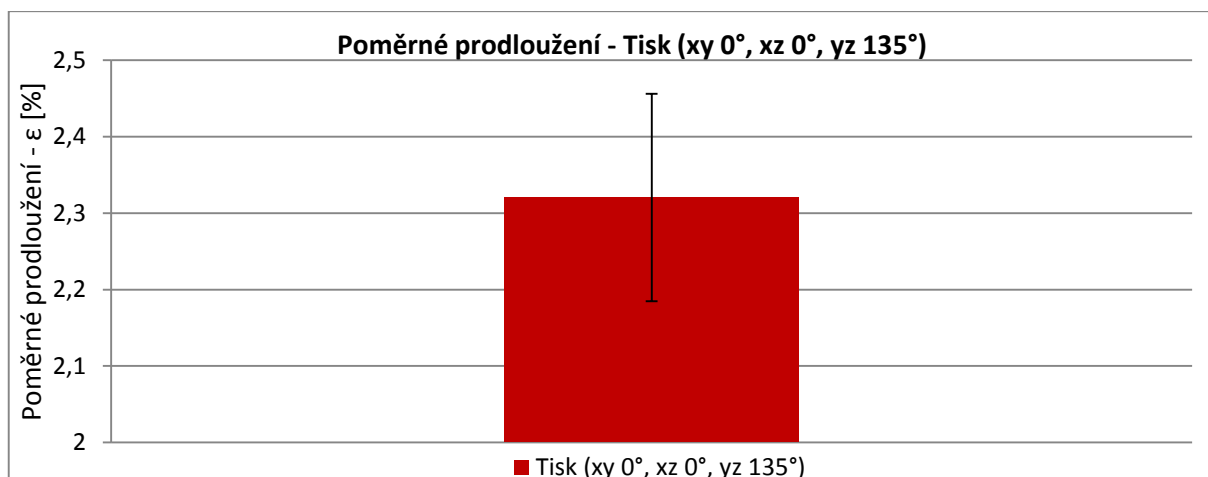
Graf 12.: Střední hodnoty poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) – totožná orientace vláken

Tahová zkouška pro tisk (xy 0°, xz 0°, yz 135°)

Zkušební vzorky, které byly vyráběné technologií FDM, byly během tisku naorientovány v rovině yz pod úhlem 135° a v rovině xz a xy pod úhlem 0°. Všechna vlákna materiálu tiskne hlava s tryskou T14 v rovině xy pod úhlem pod úhlem 45°. V další vrstvě jsou vlákna budoucího zkušební vzorku tisknuta v rovině xy pod úhlem 135°. Průměrná hodnota šířky zúžené části je 10,374 [mm] a průměrná tloušťka je 4,184 [mm].



Graf 13.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 135°)

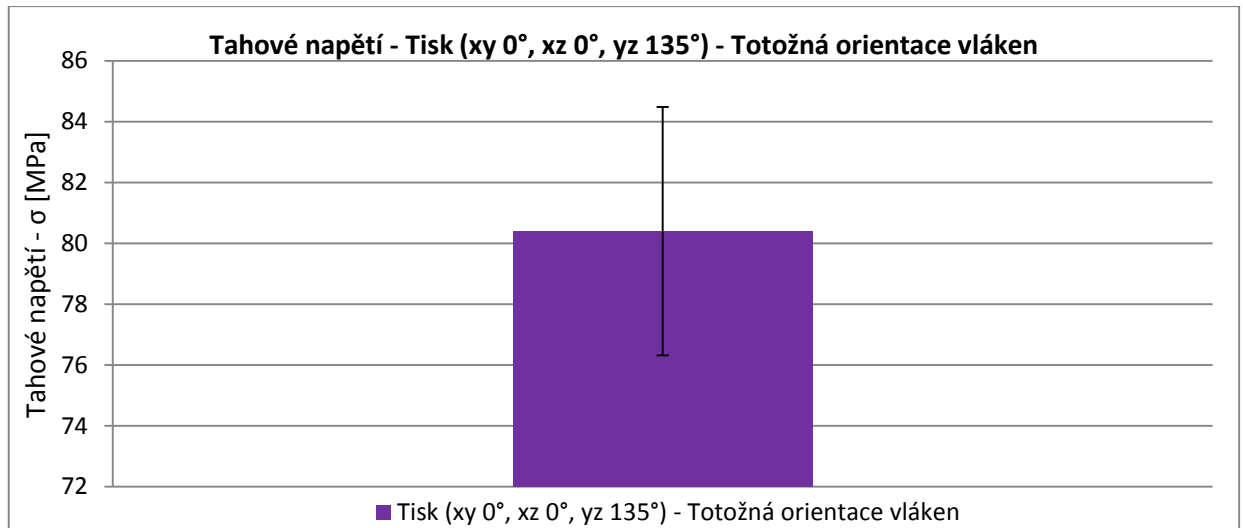


Graf 14.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 135°)

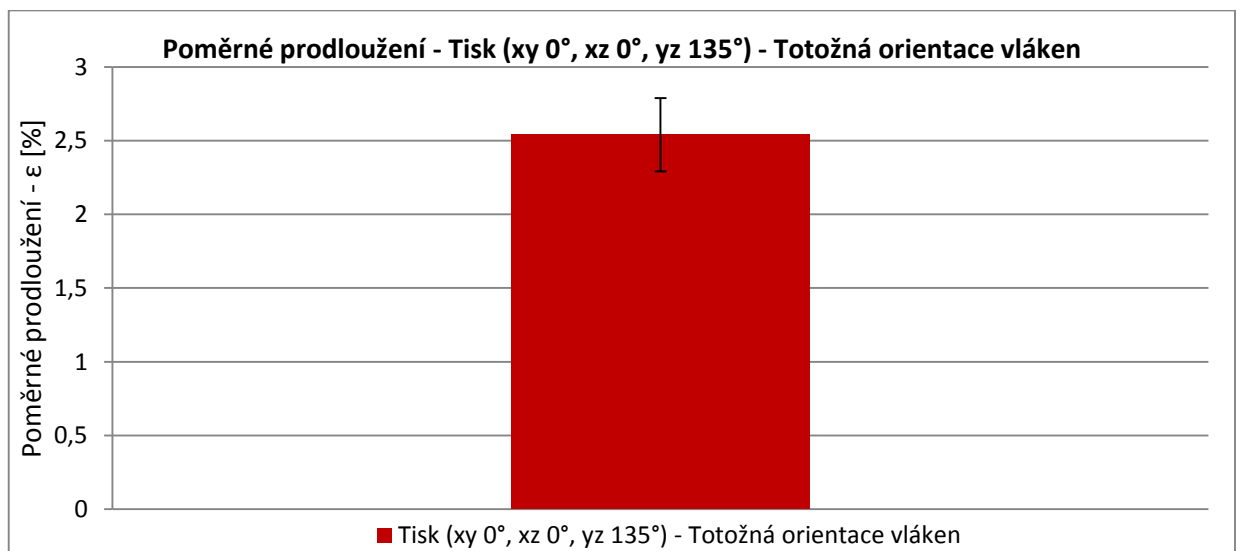
Zkušební vzorky, které byly zatěžovány postupně zvyšující se silou, mají exponenciální průběh diagramu. (viz. Příloha 7) Největší tahové napětí zaznamenal první vzorek, který se dostal nejbližší k hranici 80 [MPa] – přesněji 79,5 [MPa]. K dosažení maximálního napětí bylo potřeba působit tahovou silou o velikosti 3419,7 [N]. První vzorek dosáhl také největšího prodloužení ze všech pěti vzorků. Vzorek se při maximální tahové síle prodloužil o 1,26 [mm], neboli o 2,52 [%] své měřené délky.

Tahová zkouška pro tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$) – totožná orientace vláken

Zkušební tělesa byla během tisku naorientována v rovině yz pod úhlem 135° a v rovině xz a xy pod úhlem 0° . Všechna vlákna materiálu tiskne hlava s tryskou T14 v rovině xy pod úhlem 0° a všechna vlákna jsou vzájemně rovnoběžná. Průměrná hodnota šířky zúžené části je 10,18 [mm] a průměrná tloušťka čtyř vzorků je 4,144 [mm].



Graf 15.: Střední hodnota tahového napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$) – totožná orientace vláken

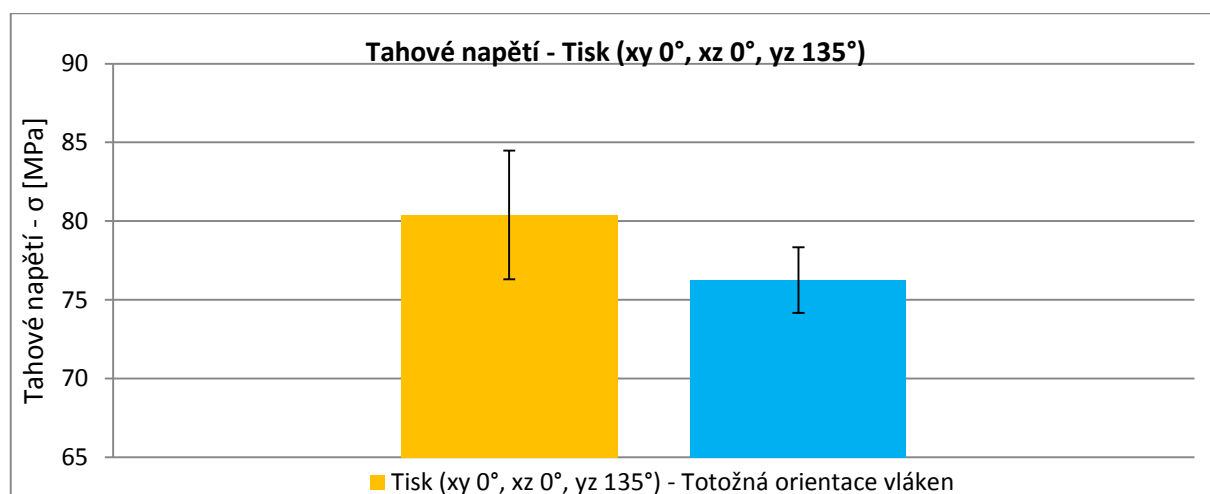


Graf 16.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$) – totožná orientace vláken

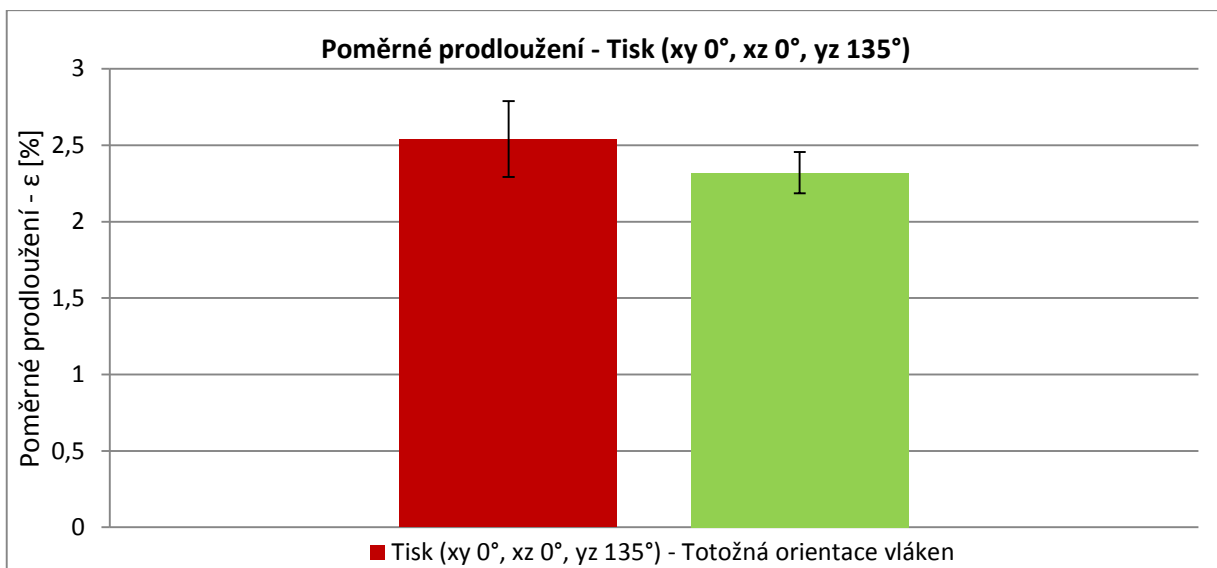
Všechna zkoušená tělesa byla zatěžována postupně zvyšující se silou. Výsledný graf závislosti všech těles má exponenciální průběh. (viz. Příloha 8) Největší tahové napětí zaznamenal vzorek s pořadovým číslem dva, který jako jediný překročil hranici 84 [MPa] – přesněji 84,16 [MPa]. Tohoto tahového napětí bylo dosaženo při působení síly o velikosti 3543,5 [N]. Druhý vzorek dosáhl také největšího prodloužení ze všech pěti vzorků. Vzorek se při maximální tahové síle prodloužil o 1,38 [mm], neboli o 2,77 [%] své měřené délky.

Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$) vs. Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$) - totožná orientace vláken

Výsledný graf vznikl porovnáním průměrných výsledků všech zkoušených těles. Závislost tisku bez orientovaných vláken má exponenciální průběh shodný s tiskem, který má orientovaná vlákna. Exponenciální růst je totožný pro obě dvě křivky. (viz. Příloha 9) Výsledný rozdíl tahových napětí mezi průměrnými závislostmi je 4,7 [MPa] ve prospěch tisku s orientovanými vlákny. Vzorky s orientovanými vlákny mají všechny vrstvy vytisknuty v totožných souřadnicích, tím dochází k lepším vazebním silám mezi jednotlivými vlákny při tahovém namáhání. Vazební síly u orientovaných vláken mají velký vliv, také na hodnotu poměrného prodloužení. Všechna tělesa s orientovanými vlákny dosáhla většího poměrného prodloužení než vzorky u tisku bez orientovaných vláken. Rozdíl poměrného prodloužení mezi průměrnými závislostmi je 0,2 %. To je dáno vazbami vláken, které na sebe vzájemně působí.



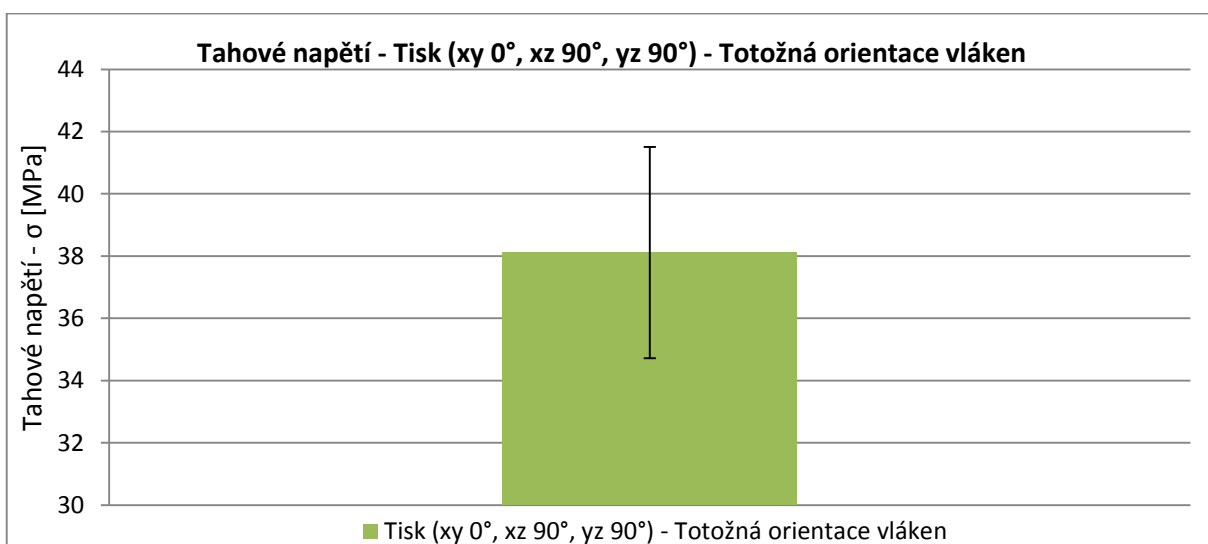
Graf 17.: Střední hodnoty tahových napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$) – totožná orientace vláken



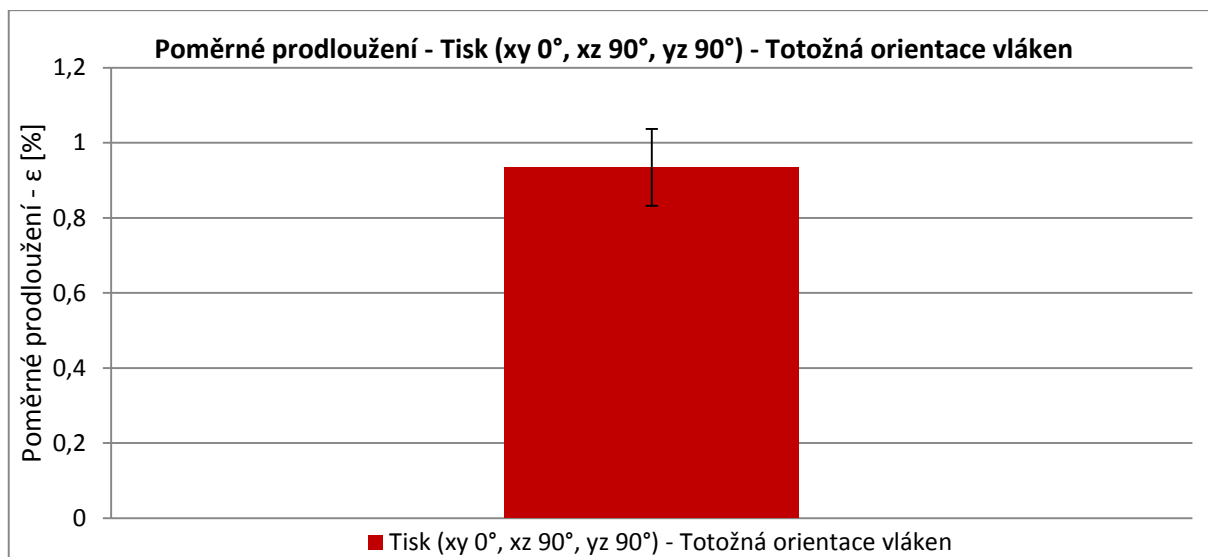
Graf 18.: Střední hodnoty poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) – totožná orientace vláken

Tahová zkouška pro tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$) – totožná orientace vláken

Zkušební tělesa byla během tisku naorientována v rovině xy pod úhlem 0° a v rovinách xz a yz pod úhlem 90° . Všechna vlákna materiálu tiskne hlava s tryskou T14 v rovině xy pod úhlem 0° a všechna vlákna jsou vzájemně rovnoběžná. Průměrná hodnota šířky zúžené části je 10,246 [mm] a průměrná tloušťka všech vytisknutých vzorků je 4,26 [mm].



Graf 19.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$) – totožná orientace vláken



Graf 20.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk (xy 0°, xz 90°, yz 90°) – totožná orientace vláken

Všechna zkoušená tělesa, která byla zatěžována postupně zvyšující se silou, mají lineární průběh diagramu. (viz. Příloha 10) Největší tahové napětí zaznamenal první vzorek, který jako jediný překonal hranici 40 [MPa] – přesněji 41 [MPa]. První vzorek tohoto napětí dosáhl při působení síly o velikosti 1779 [N]. Maximální prodloužení zaznamenal taktéž první vzorek, který se prodloužil o 0,5 [mm] své měřené délky. První vzorek jako jediný překročil hodnotu poměrného prodloužení 1 [%] – přesněji 1,03 [%].

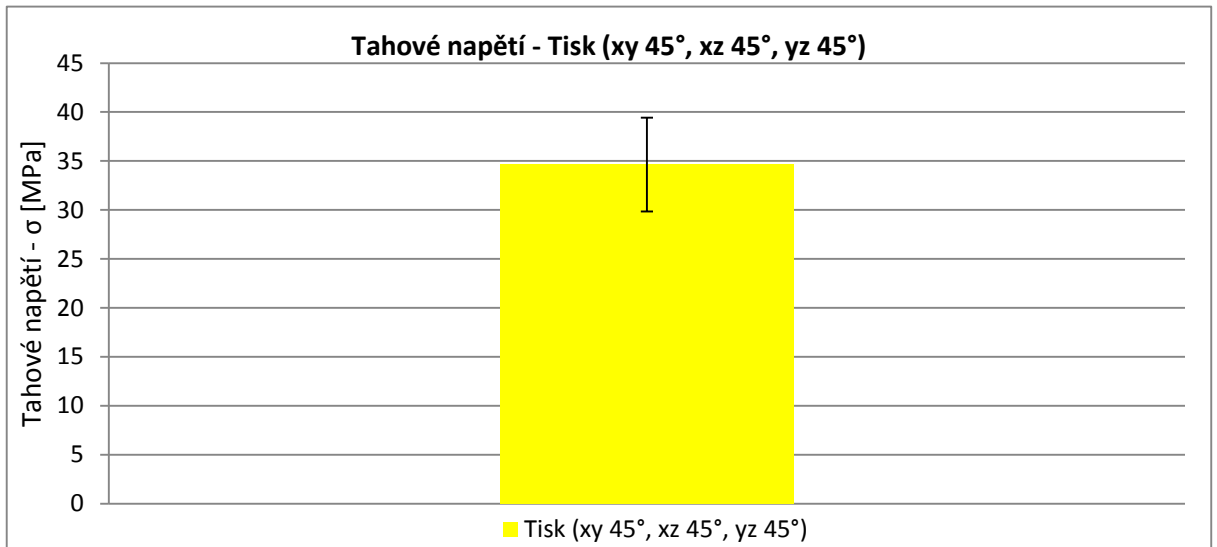
Tisk (xy 0°, xz 90°, yz 90°) vs. Tisk (xy 0°, xz 90°, yz 90°) - totožná orientace vláken

Všechny vytisknuté vzorky ze skupiny Tisk (xy 0°, xz 90°, yz 90°) nebyly zatěžovány v trhacím zařízení. Během tisku se vzorky odlomily z pracovního stolu, kvůli nedostatečné výšce podpěrné konstrukce z podpůrného materiálu. Všechny vzorky se zničily ještě před tahovou zkouškou, a tudíž se nedaly použít pro měření tahových vlastností.

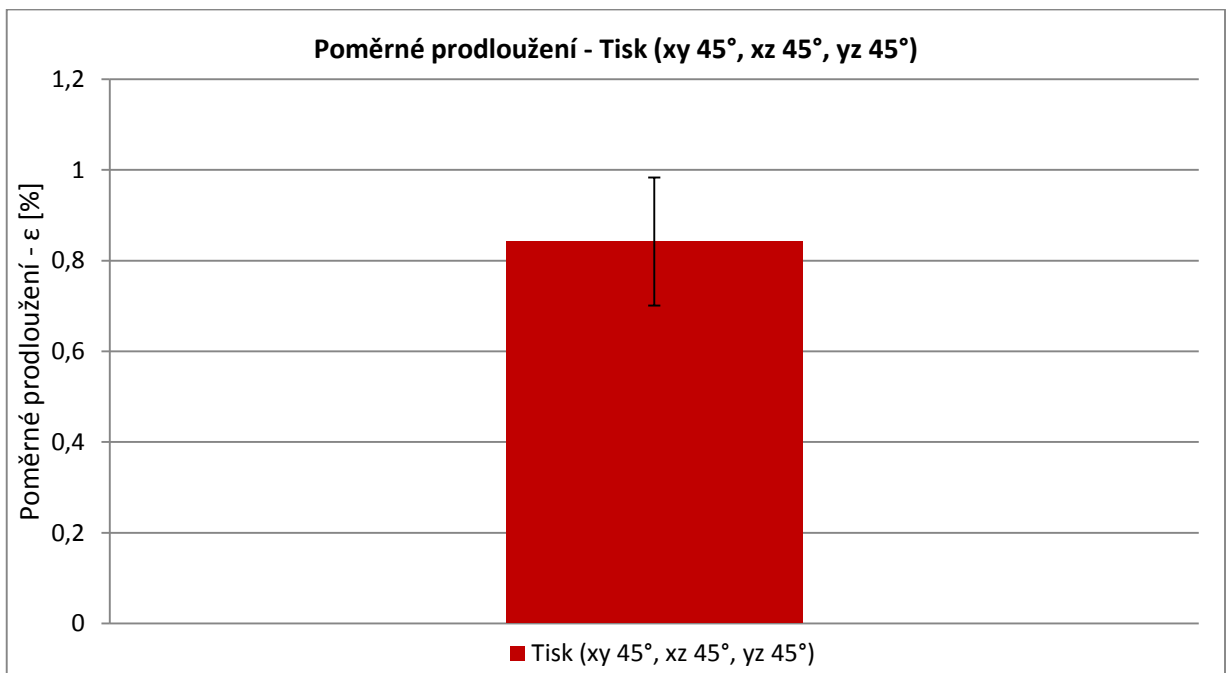
Diagram vznikl vytvořením průměrné závislosti všech zkoušených těles u tisku s orientovanými vlákny. Výsledná křivka se zdá být lineární, ale lineární není. Závislost napětí a poměrném prodloužení je mírně exponenciální. (viz. Příloha 10) Křivka Tisku (xy 0°, xz 90°, yz 90°) s orientovanými vlákny má malý exponenciální růst. Zkušební vzorek se při maximálním průměrném tahovém napětí o velikosti 41[MPa] prodloužil o 1,03 [%], neboli o 0,5 [mm] své délky.

Tahová zkouška pro tisk (xy 45°, xz 45°, yz 45°)

Zkušební vzorky byly vyráběné technologií FDM a během tisku byly naorientovány v prostoru, kde ve všech rovinách byly vzorky natočené pod úhlem 45°. Všechna vlákna materiálu tiskne hlava s tryskou T14 v rovině xy pod úhlem pod úhlem 45°. V další vrstvě jsou vlákna budoucího zkušebního vzorku tisknuta v rovině xy pod úhlem 135°. Průměrná hodnota šířky zúžené části je 10,202 [mm] a průměrná tloušťka je 4,306 [mm].



Graf 21.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk (xy 45°, xz 45°, yz 45°)

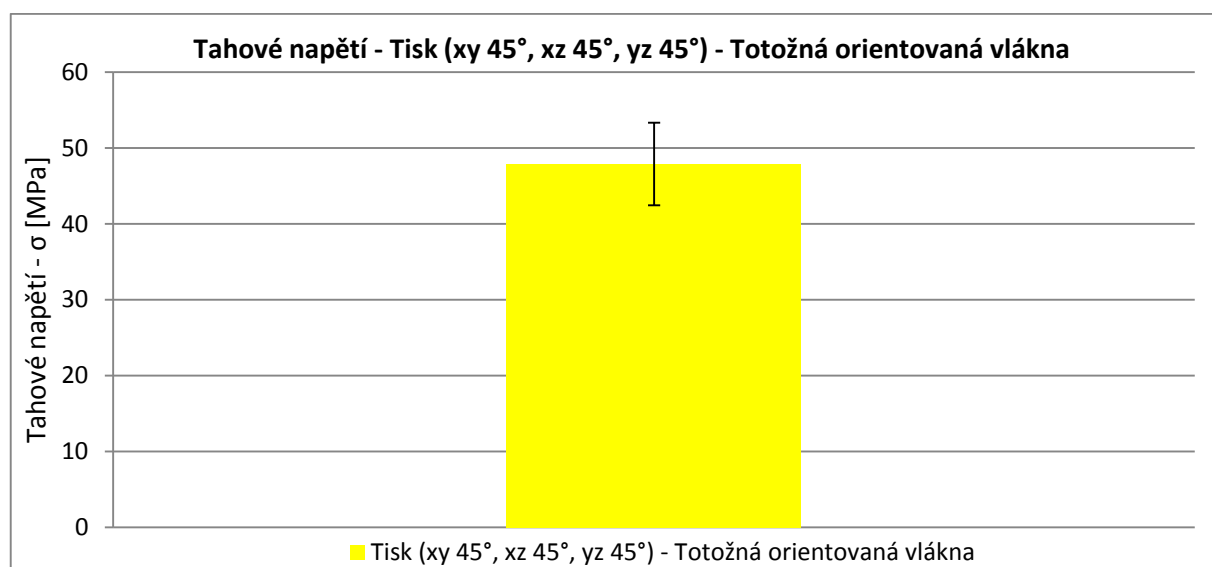


Graf 22.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk (xy 45°, xz 45°, yz 45°)

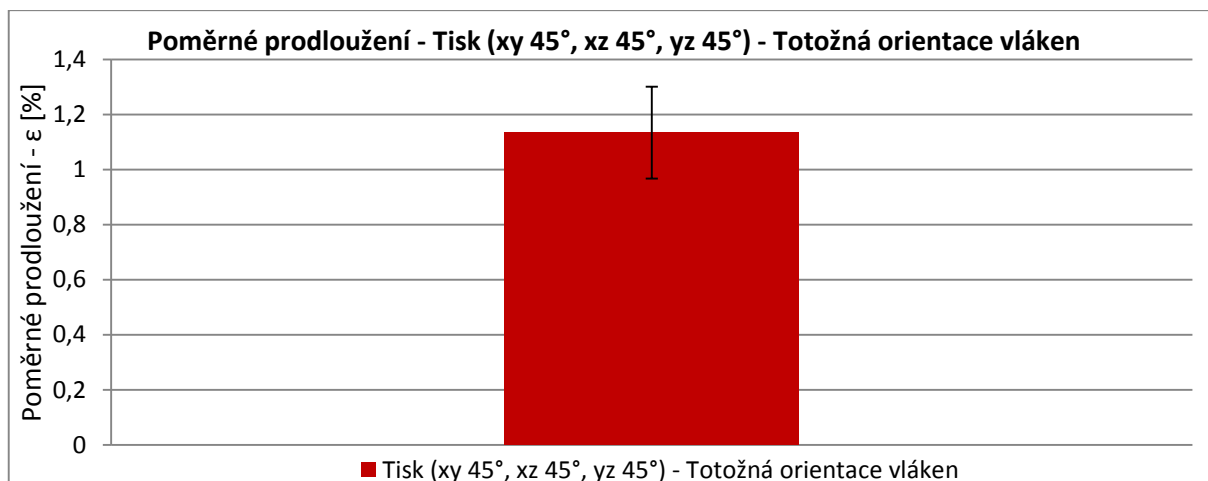
Výsledný graf závislostí všech těles má exponenciální průběh. (viz. Příloha 11) Největší tahové napětí zaznamenal třetí vzorek, který se nejvíce přiblížil hodnotě 40 [MPa] – přesněji 39,7 [MPa]. Tohoto tahového napětí bylo dosaženo při působení síly o velikosti 1749,7 [N]. Vzorek s pořadovým číslem tři dosáhl maximálního poměrného prodloužení ze všech pěti vzorků. Těleso se při maximální tahové síle prodloužil o 0,51 [mm], neboli o 1,01 [%] své měřené délky.

Tahová zkouška pro tisk (xy 45°, xz 45°, yz 45°) – totožná orientace vláken

Zkušební vzorky vyráběné technologií FDM byly během tisku naorientovány v prostoru, kde ve všech rovinách byly vzorky natočené pod úhlem 45°. Všechna vlákna materiálu tiskne hlava s tryskou T14 v rovině xy pod úhlem 0° a všechna vlákna jsou vzájemně rovnoběžná. Průměrná hodnota šířky zúžené části je 10,15 [mm] a průměrná tloušťka je 4,36 [mm].



Graf 23.: Střední hodnota tahové napětí pro Tisk (xy 45°, xz 45°, yz 45°) – totožná orientace vláken

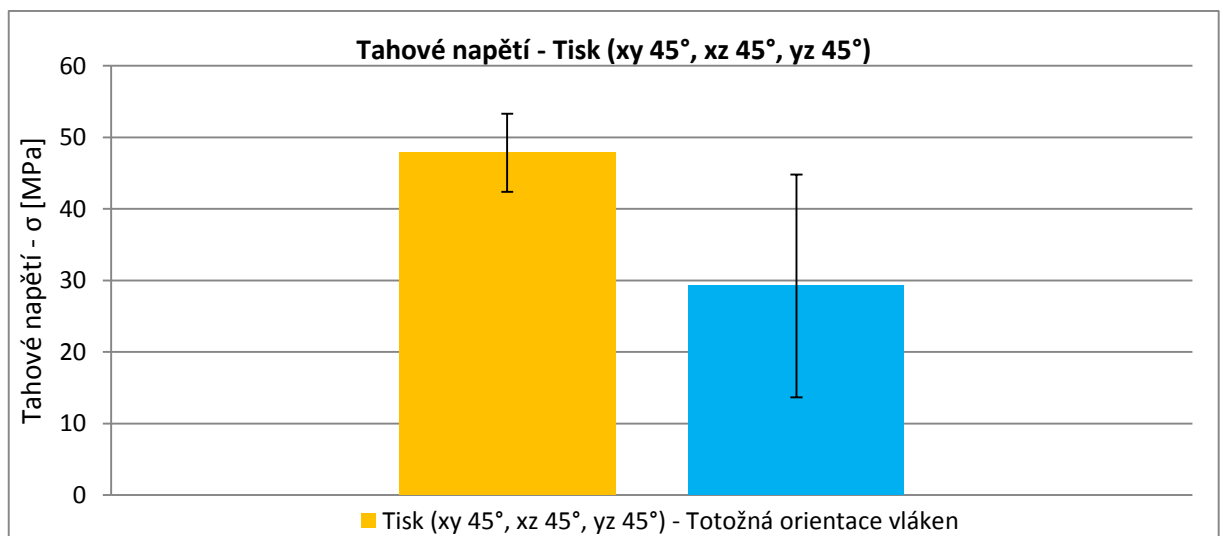


Graf 24.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro Tisk (xy 45°, xz 45°, yz 45°) – totožná orientace vláken

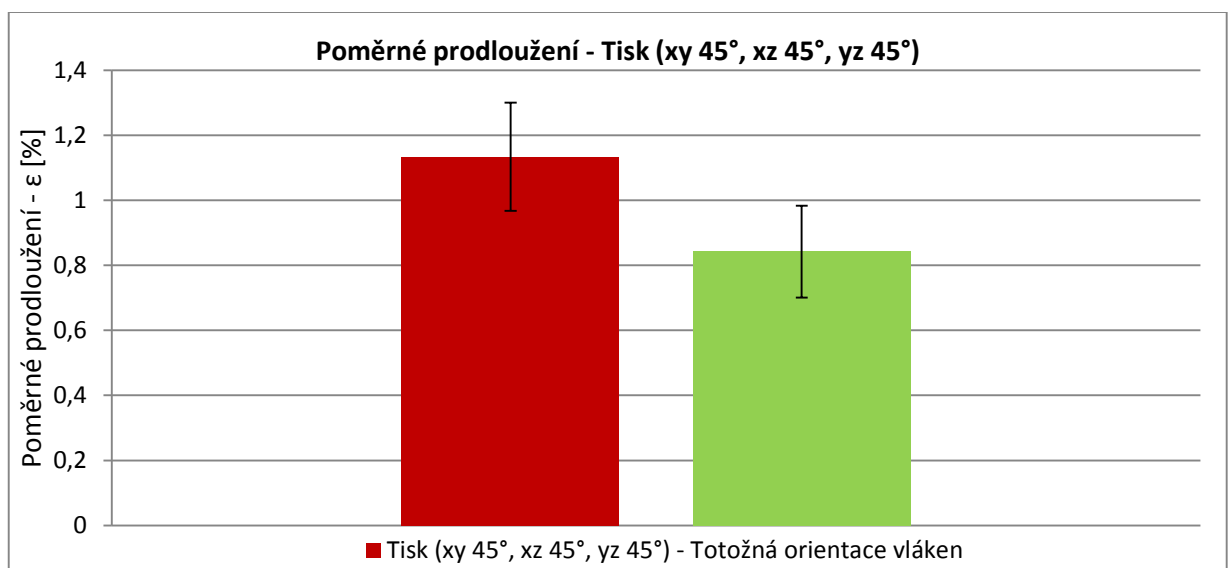
Všech pět zkušebních těles, které byly zatěžovány postupně zvyšující se silou, mají exponenciální průběh diagramu. (viz. Příloha 12) Největší tahové napětí zaznamenal čtvrtý vzorek. Velikost tahového napětí před přetržením zkušebního tělesa činila 55,5 [MPa]. K dosažení maximálního napětí bylo potřeba působit silou o velikosti 2422,6 [N]. Pátý zkušební vzorek má podobný průběh diagramu jako vzorek pátý, který dosáhl i podobného tahového napětí (51,2 [MPa]). Hodnoty poměrného prodloužení jsou si velice blízké ($\epsilon_4 = 1,34$ [%], $\epsilon_5 = 1,27$ [%]). Obě tělesa dosáhla největšího prodloužení, které se pohybuje okolo 0,6 [mm].

Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) vs. Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) - totožná orientace vláken

Výsledné závislosti vznikly zprůměrováním všech vzorků. Všechny závislosti mají exponenciální průběh. Obě křivky mají malý exponenciální růst. (viz. Příloha 13) Rozdíl tahových napětí mezi průměrnými závislostmi je velký, jeho hodnota je 15,6 [MPa] ve prospěch tisku s totožně orientovanými vlákny jednotlivých vrstev. Všechny zkušební vzorky s orientovanými vlákny dosáhly také většího prodloužení než vzorky u Tisku ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$). Rozdíl poměrného prodloužení mezi průměrnými závislostmi je také velice velký 0,35 %. Rozdíl v prodloužení těles je pouze 0,15 [mm].



Graf 25.: Střední hodnoty tahových napětí pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) a Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) – totožná orientace vláken



Graf 26.: Střední hodnoty poměrného prodloužení pro Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) a Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) – totožná orientace vláken

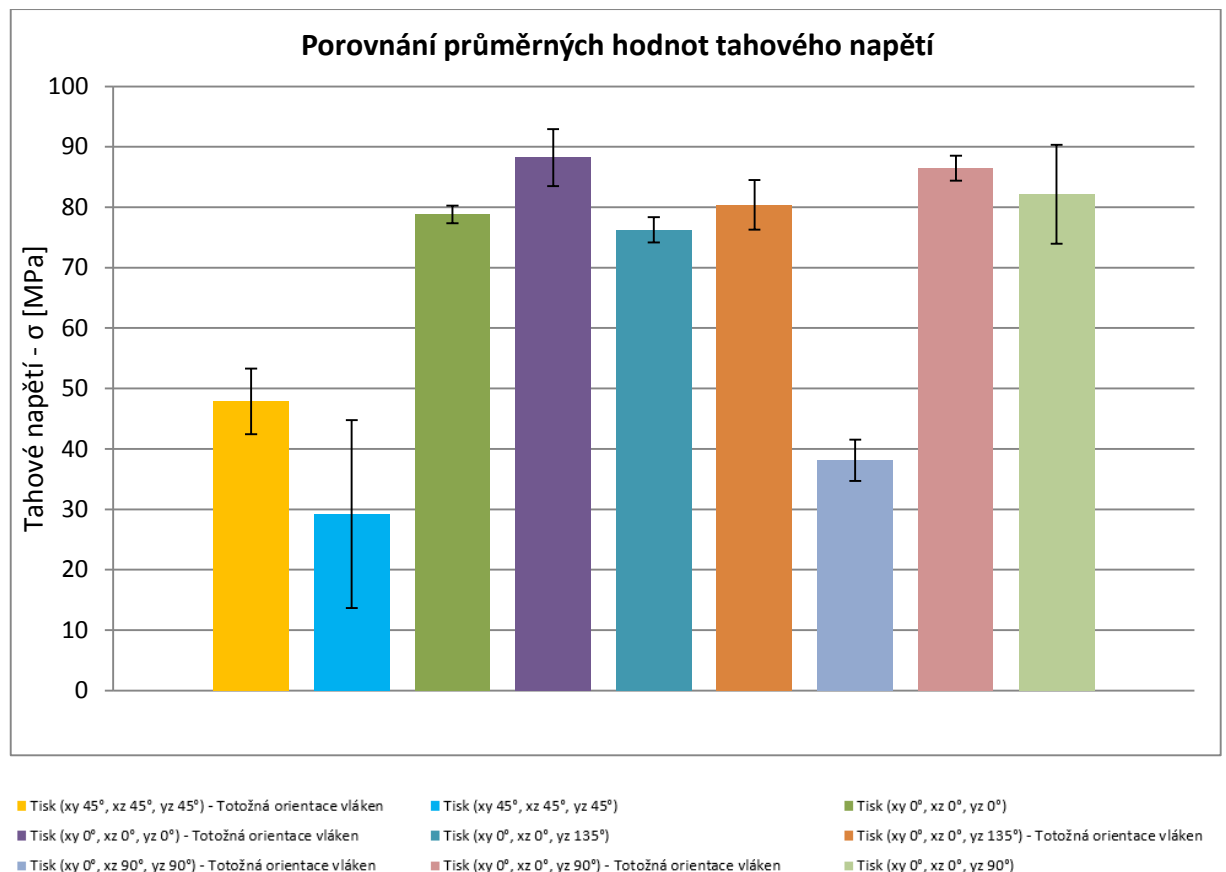
6.7 Porovnání všech průměrných výsledků

Materiál ULTEM 1010 má dle materiálového listu, který je udáván výrobcem, Pevnost v tahu 81 [MPa] a prodloužení při tahové zkoušce 3,3 [%]. [32] Tyto hodnoty vyplívají z tahové zkoušky, která byla prováděna dle normy ČSN EN ISO 527 [34] na vzorcích vyrobených technologií Rapid Prototyping.

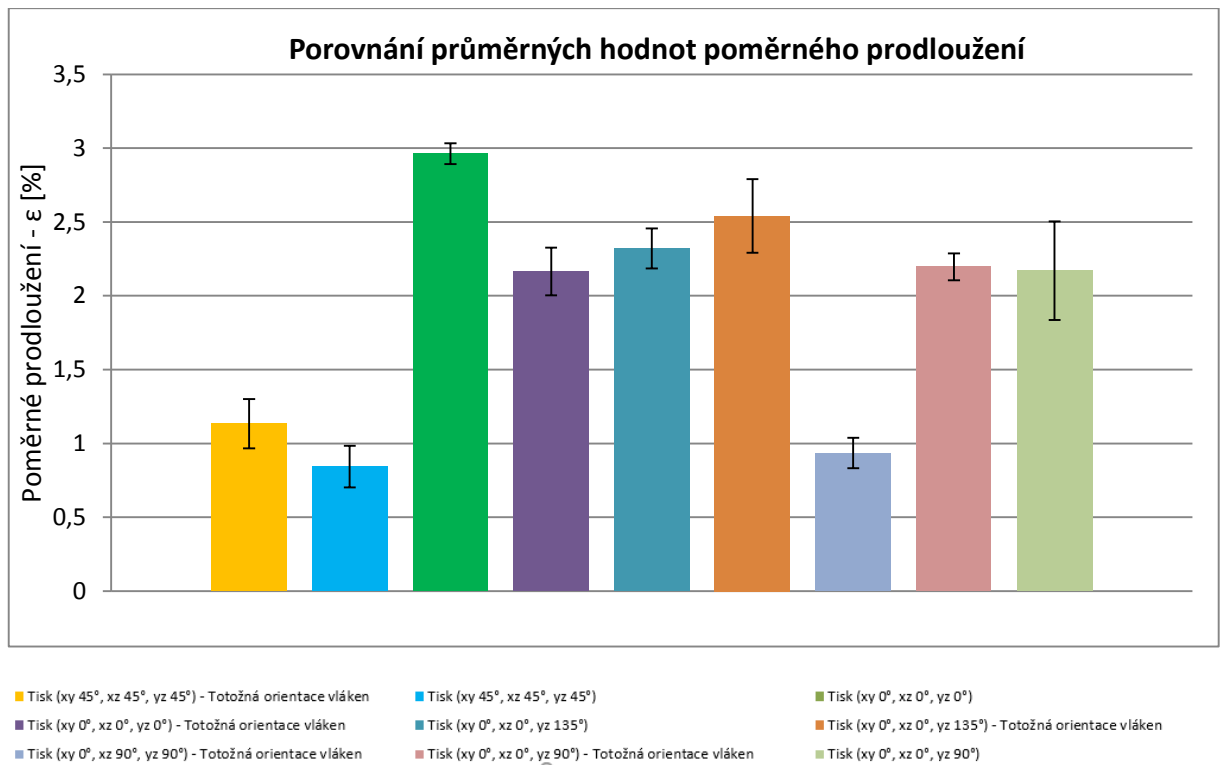
Dle materiálového listu výrobce, ULTEM 1010 má pevnost v tahu 81 [MPa]. [32] Přes tuto horní hranici se vyšplhaly čtyři vzorky, které mají lepší tahové napětí než originál a další dva vzorky mají podobnou pevnost v tahu jako vzorek vyrobený vstříkovací technologií. Podobná tahová pevnost byla zjištěna u vzorků, které byly naorientovány v prostoru během výroby pod úhlem 0° a 135° . Jedná se o – Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$). Oba dva tyto tisky nemají rovnoběžná vlákna materiálu, ale mají jednotlivé vrstvy překryté přes sebe. Tisknutím jednotlivých vrstev přes sebe nedochází ke zlepšení tahového napětí, protože vazby nevydrží tak velké tahové namáhání a po překročení určité tahové síly se vazby poruší a dojde k přetržení zkušebního tělesa. Překročení předepsané hodnoty tahového napětí bylo zjištěno u čtyřech vzorků. Jedná se o – Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) totožná orientace vláken, Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) totožná orientace vláken, Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) a Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) totožná orientace vláken. Z těchto čtyřech skupin jsou tři skupiny vzorků s orientovanými vlákny a jeden ze skupiny bez orientovaných vláken. Maximální pevnosti v tahu dosáhly vzorky z kategorie Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) totožná orientace vláken, kde z pěti vzorků překročilo hranici 81 [MPa] [32] hned čtyři vzorky. U kategorie Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) totožná orientace vláken se dostalo přes hodnotu 81 [MPa] [32] z pěti vzorků, vzorky tři. U kategorie Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) totožná orientace vláken se dostalo přes hodnotu 81 [MPa] [32] ze čtyř vzorků, vzorky tři. Vzorky, které mají vlákna materiálu rovnoběžná, mají hodnotu pevnosti v tahu vyšší než tělesa bez orientovaných vláken. Tyto vzorky mají všechny vrstvy vytisknuty v totožných souřadnicích, a tím dochází k lepším vazebním silám mezi jednotlivými vlákny při tahovém namáhání. (viz. Příloha 14)

Dle materiálového listu má materiál ULTEM 1010 poměrné prodloužení o velikosti 3,3 [%]. [32] Této hodnoty nedosáhl žádný vytisknutý vzorek. Nejvíce se přiblížil skupina vzorků z kategorie Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) totožná orientace vláken. Vzorky z této kategorie dosáhly maximálního poměrného prodloužení o velikosti 3,05 [%].

Většina vytisknutých vzorků se vyskytuje v rozmezí od 2 do 2,5 [%]. Jedná se o – Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 135°) totožná orientace vláken, Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 90°) totožná orientace vláken, Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 135°), Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 90°) a Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 0°) totožná orientace vláken.



Graf 27.: Porovnání průměrných hodnot tahového napětí u vzorků vyrobených technologií Rapid Prototyping



Graf 28.: Porovnání průměrných hodnot poměrného prodloužení u vzorků vyrobených technologií Rapid Prototyping

7. Výroba normalizovaných zkušebních vzorků – vstřikování

K výrobě vstřikovaných zkušebních vzorků byl využit vstřikovací lis Katedry strojírenské technologie – oddělení tváření kovů a plastů. Vstřikovací lis ARBURG 270S 400 - 100, který má uzavírací sílu 2 000 – 5 000 [kN]. [36]

Rozdrcený materiál z tahových zkoušek tisknutých dílů, bylo nutné nejprve vysušit. Sušení materiálu před vstřikováním trvalo 6 [hod] při teplotě 120 [°C] ve vakuové sušičce. Vstřikování prvních vzorků proběhlo z originálního materiálu ULTEM 1010, určeného pro tuto výrobní technologii. Tento materiál byl zvolen pro simulaci automatického cyklu, resp. pro nastavení pracovní teploty formy. Doporučená teplota formy pro vstřikování termoplastů je při ohřevu olejem 140 °C, ale z technologických důvodů byla forma nahřáta vodou pouze na teplotu 95 [°C]. Tudiž všechny posléze vstřikované zkušební normalizované vzorky, které byly z rozdrcených zbytků vytisknutých vzorků, byly vyrobeny při teplotě vstřikovací formy 90 [°C]. Doporučená teplota materiálu při vstřikování je v intervalu od 350 do 400 [°C]. Skutečná teplota materiálu při vstřikování byla 380 [°C].



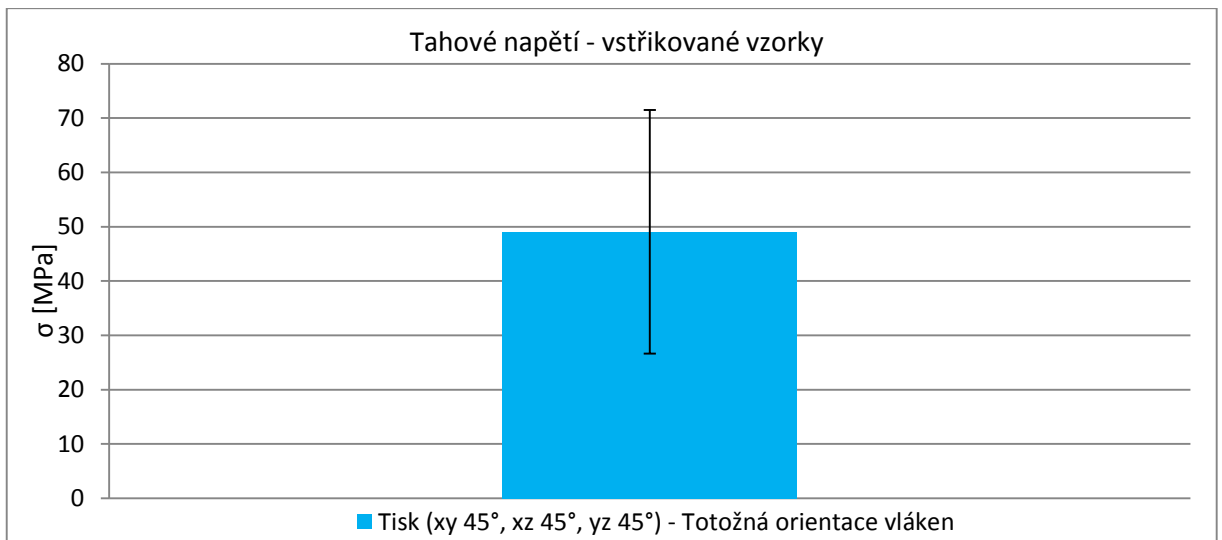
Obr.7.: Vstřikovací lis ARBURG 270S 400 – 100 [36]

7.1 Zkouška tahem

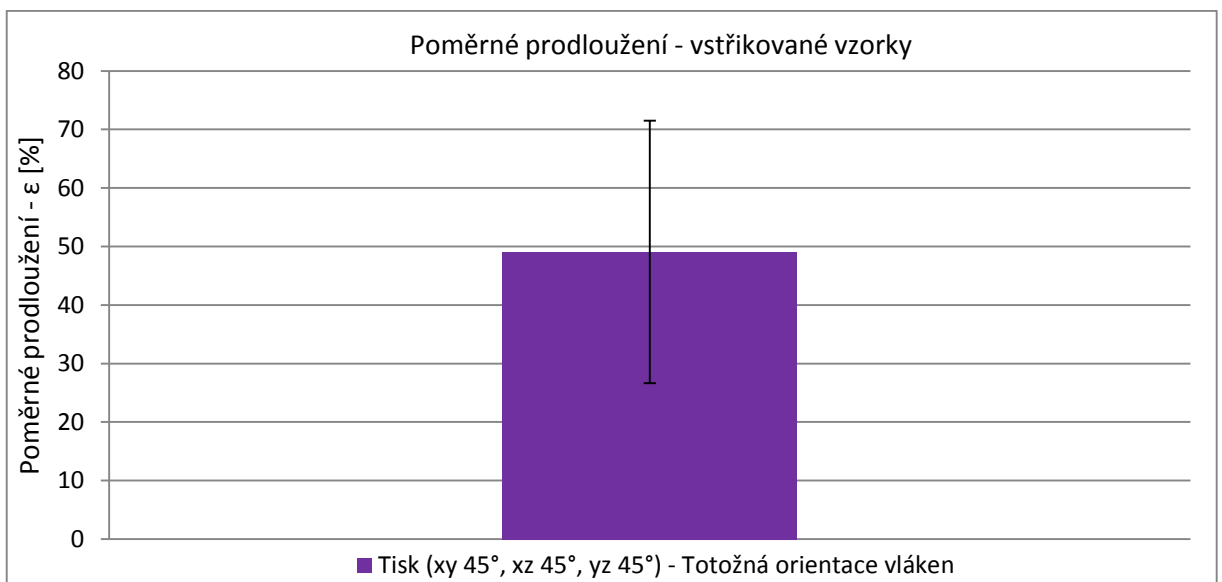
Mechanická zkouška tahem byla prováděna na zkušebním trhacím stroji TiraTest 2300, který byl použit pro tahovou zkoušku vzorků vyrobených technologií Rapid Prototyping. Zkouška tahem byla prováděna dle normy ČSN EN ISO 527. [34] Ke zkoušce bylo použito pět vstříkovaných zkušebních vzorků. Všechny zkoušky byly prováděny s totožnými počátečními podmínkami. Rychlost posuvu čelistí byla zvolena 50 mm/min. [34] Vzdálenost mezi měřícími čelistmi byla nastavena na hodnotu 115 mm. [34] Během zkoušky je v programu TiraTest 2300 zaznamenána závislost zvětšující se síly (F) na odpovídajících zvětšení počáteční měřené délky zkušební vzorku. Výsledek zkoušky je vyobrazen ve smluvním diagramu tahové zkoušky.

Průběh smluvního diagramu tahové zkoušky se na rozdíl od předešlých diagramů hodně liší. Vstříkované vzorky mají plně zaplněn svůj objem, to pro vzorky z 3D tiskárny neplatí. Ty nemají svůj objem zaplněn úplně, z důvodu nanášení jednotlivých vrstev tryskou a vniknutím vzduchových bublin uvnitř jednotlivých vláken. Vstříkovaný vzorek je tudíž velice houževnatý a maximální hodnota poměrného prodloužení dosáhla hodnoty 87 [%]. Této hodnoty dosáhl poslední pátý vzorek, zbývající vzorky mají poměrné prodloužení v rozsahu 31 až 58 [%].

Dle materiálového listu výrobce materiálu má ULTEM 1010 pevnost v tahu 81 [MPa]. [32] Tato pevnost v tahu platí pro technologii Rapid Prototyping, pro výrobní technologii vstříkování termoplastů má ULTEM 1010 pevnost v tahu 110 [MPa]. [37] Tuto hodnotu překročily všechny vzorky a maximální pevnost v tahu byla naměřena 115,2 [MPa]. Dalo by se říci, že této hodnoty dosáhly všechny vzorky. Rozdíl mezi vzorky je velice malý a největší je 0,2 [MPa]. (viz. Příloha 15)



Graf 29.: Střední hodnota tahové napětí pro vstříkované vzorky

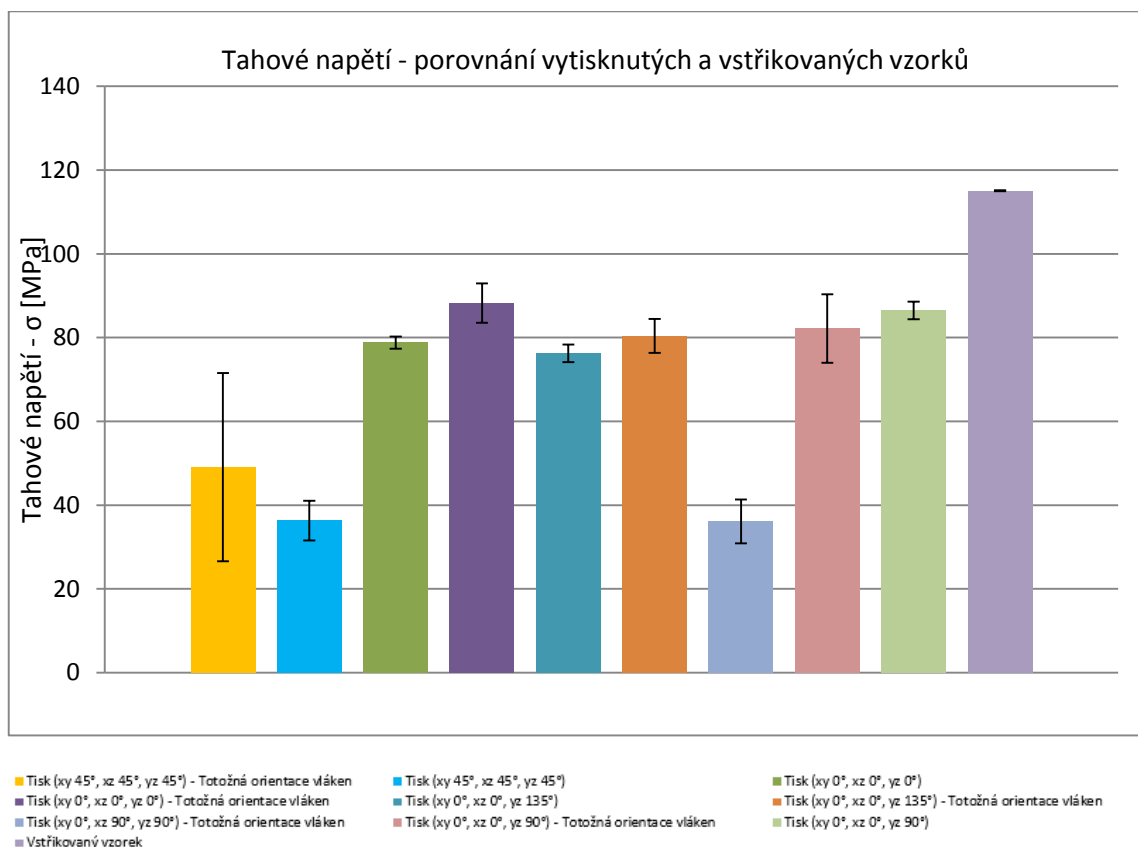


Graf 30.: Střední hodnota poměrného prodloužení pro vstříkované vzorky

7.2 Porovnání mezi vytisknutými a vstříkovanými vzorky

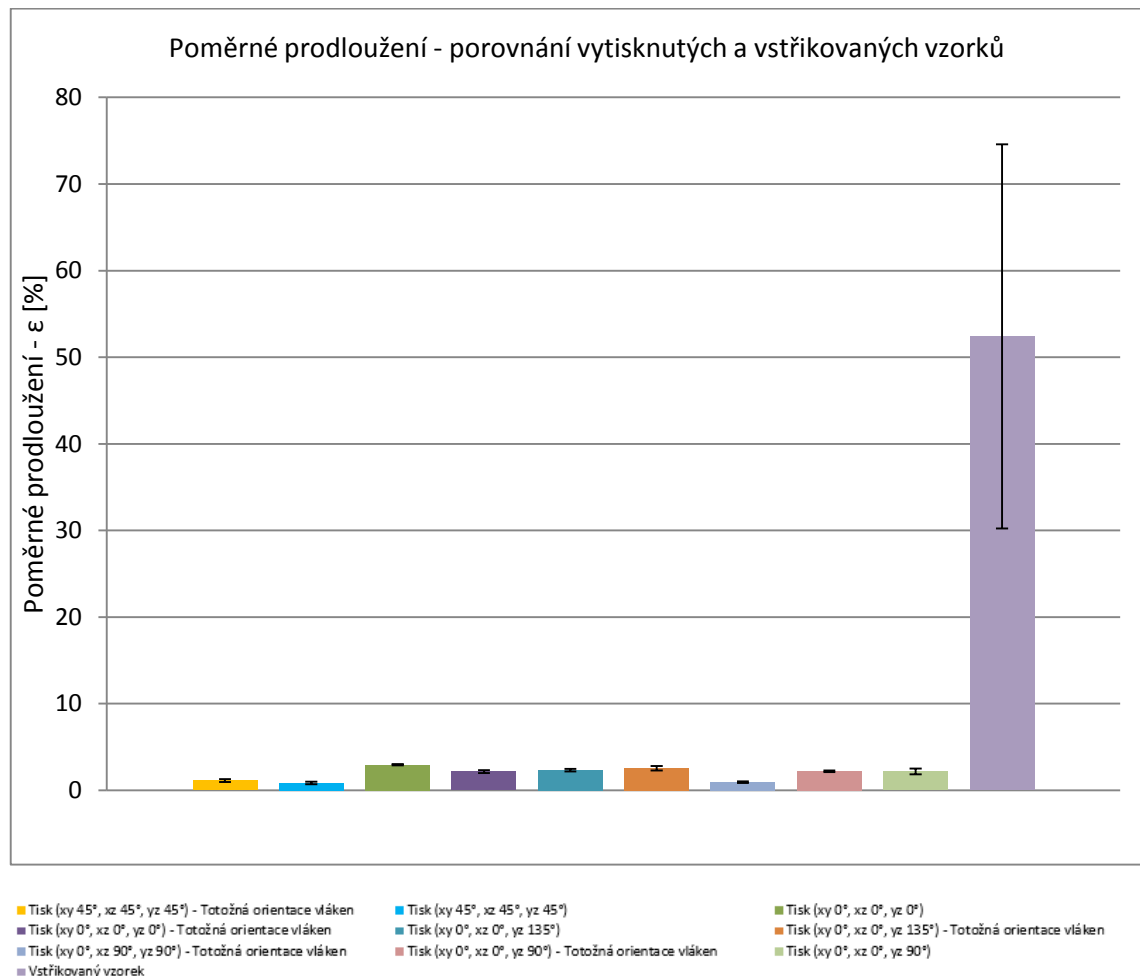
Materiál ULTEM 1010 pro technologii Rapid Prototyping má dle materiálového listu udávané výrobcem hodnotu pevnosti v tahu 81 [MPa]. [32] Oproti tomu, ULTEM 1010 určený pro vstříkování termoplastů má pevnost v tahu 110 [MPa]. Hodnoty poměrného prodloužení se také velice liší. Pro tisknutí technologií FDM má poměrné prodloužení při tahové zkoušce hodnotu 3 [%] [32], naopak vzorky vyrobené vstříkovací technologií mají, dle materiálového listu 60 [%]. [37] Rozdíl v tahovém napětí je 29 [MPa] a rozdíl v poměrném prodloužení je obrovských 57 [%].

Střední hodnota tahového napětí u vstříkovaných vzorků činí 115,06 [MPa]. U skupiny Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) – totožná orientace vláken, který dosáhl maximálních hodnot z vytisknutých vzorků je střední hodnota tahového napětí 88,229 [MPa]. Rozdíl ve středních hodnotách je 26,83 [MPa]. Průběh diagramu napětí – poměrné prodloužení mají vytisknuté vzorky exponenciální. Průběh u vstříkovaných těles je odlišný. Počáteční fáze diagramu má při lineárním zatěžování exponenciální průběh, a to až do chvíle, kdy dojde k dosažení maximální hodnoty tahového napětí. Po překročení této hodnoty dochází ke snižování tažné síly, z důvodu elasticity vstříkovaného vzorku. Po určitém čase se tahové napětí ustálí v malém intervalu o velikosti 1 [MPa]. (Viz. Příloha 17) Tažná síla se taktéž pohybuje v malém intervalu o velikosti 2 [N]. Po zbylý čas tahové zkoušky dochází k prodlužování měřené délky zkušební tělesa, a to až k jeho destrukci. Vstříkované vzorky jsou houževnaté z toho důvodu, že jejich objem je plně zaplněn, a to pro vzorky z 3D tiskárny neplatí. Ty nemají svůj objem zaplněn úplně, z důvodu nanášení jednotlivých vrstev tryskou a vniknutím vzduchových bublin uvnitř jednotlivých vláken.



Graf 31.: Střední hodnoty tahových napětí pro všechny zkušební vzorky

U vytisknutých vzorků se poměrné prodloužení pohybuje většinou v intervalu 2,5 až 1 [%]. Naopak vstřikovaná tělesa jsou velice elastická a jejich střední hodnota poměrného prodloužení je 52,48 [%]. Jeden vzorek dokonce dosáhl poměrného prodloužení o velikosti 87 [%] a prodloužil se o 43,8 [%] oproti své měřené délce. Jeden z důvodů tak velkého poměrného prodloužení je popsán v předchozím odstavci. Dalším faktorem, který ovlivňuje prodloužení, je že při výrobě vzorků se do vstřikovací formy dostalo s rozdrčeným materiálem také malé procento stoprocentního ULTEMu 1010.



Graf 32.: *Střední hodnoty poměrných prodloužení pro všechny zkušební vzorky*

Lze konstatovat, že lepších mechanických vlastností dosáhly zkušební vzorky vyrobené vstřikovací technologií. Největší rozdíl nebyl v pevnosti vzorků, ale v elasticitě. Vytisknuté vzorky, které byly natočeny ve všech rovinách pod úhlem 0°, a které mají shodně orientována vlákna mají horší tahové napětí o 26,83 [MPa]. Vytisknutá tělesa jsou křehká z důvodu nízké hodnoty poměrného prodloužení. Naopak vstřikovaná tělesa jsou tažná, pružná a pevná.

Vyhodnocení

Dosažené výsledky je možné shrnout do několika základních poznatků. Pro výrobu vytisknutých vzorků byl zvolen pouze jeden materiál, který má předepsanou pevnost v tahu a poměrné prodloužení materiálovým listem od výrobce. Vytisknuté vzorky byly všechny tisknuty stejným zařízením – Stratasys Fortus 450mc a při stejných počátečních podmínkách. Přesto po provedení tahových zkoušek se hodnoty mechanických vlastností významně lišily.

Bylo vytisknuto dohromady 5 kategorií vzorků, které byly v software Insight různě umístěny na pracovní ploše. U jednotlivých vytisknutých vzorků se měnily parametry natočení v každé konstrukční rovině, a to vzhledem k pracovní ploše stroje. Také se měnila orientace jednotlivých vláken. U jedněch vzorků se vlákna po vrstvách překrývají a u dalších mají vzorky totožně orientována vlákna v každé vrstvě. Tyto způsoby tisku mají velký vliv na mechanické vlastnosti dílů, které jsou vyrobené technologií Rapid Prototyping. Z tahových zkoušek vyšlo, že nejlepších mechanických vlastností z hlediska tahového napětí dosáhly vzorky, které měli vlákna materiálu v každé vrstvě orientována pod stejným úhlem. Dle tahových zkoušek vyšla, nejvhodnější orientace vzorku při tisku v každé konstrukční rovině pod úhlem 0° . Tahovou zkouškou byl měřen také další parametr – prodloužení zkušebního vzorku. Vytisknuté vzorky dosahovaly malých hodnot poměrného prodloužení. Prodloužení vzorků se pohybovalo v řádech desetinách milimetrů. Vytisknuté vzorky jsou velice křehké a oproti klasickému ABS také pevné.

Dalším krokem bakalářské práce, byla výroba zkušebních vzorků technologií vstřikování termoplastů. Materiál byl stejný jako pro tisknuté díly – ULTEM 1010. Při porovnání mechanických vlastností jednotlivých vzorků, vyrobených odlišnými výrobními technologiemi. Bylo zjištěno že vzorky vyrobené vstřikovací technologií mají lepší mechanické vlastnosti než vytisknuté díly. Pevnost v tahu je o jednu čtvrtinu vyšší než u vytisknutých vzorků. Největší rozdíl byl v prodloužení těles během tahové zkoušky. Vstřikované vzorky mají daleko větší tažnost než vytisknuté vzorky. Vstřikované vzorky jsou tažné z toho důvodu, že jejich objem je plně zaplněn, a to pro vzorky z 3D tiskárny neplatí. Ty nemají svůj objem zaplněn úplně, z důvodu nanášení jednotlivých vrstev tryskou a vniknutím vzduchových bublin uvnitř jednotlivých vláken.

Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce je analýza mechanických vlastností materiálu ULTEM 1010 z pohledu vlivu orientace 3D tisku zkušebních těles na výsledné mechanické zkoušky tahem.

Výsledné grafy a jejich komentáře znázorňují jasně a názorně skutečné průběhy diagramů Tahové napětí – Poměrné prodloužení. Vznikl tak základní přehled o vlivu orientace modelu a jednotlivých vláken modelu u materiálu ULTEM 1010 na mechanické vlastnosti. Ve výrobní praxi je nezbytné mít povědomí o vlastnostech jednotlivých materiálů, obzvláště pak mechanické vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou jednou z nejdůležitějších vlastností materiálů, které je třeba znát při další aplikaci materiálů v reálném provozu. Technologie 3D tisku se používá nejčastěji v počáteční fázi vývoje nových dílů. Většina složitějších plastových výrobků jsou v hromadné výrobě, vyráběny technologií vstřikování termoplastů. Z tohoto důvodu obsahuje tato práce také zkušební vzorky vyrobené vstřikovací technologií. Tyto vzorky byly podrobeny zkoušce tahem a jejich výsledky byly porovnány s vytisknutými vzorky. Tento dokument bude sloužit jako elementární pomůcka v Laboratoři prototypových technologií Katedry výrobních systémů a automatizaci.

Tato bakalářská práce definuje změnu mechanických vlastností materiálu ULTEM 1010 vyrobený technologií 3D tisku. Přesněji výrobní technologií FDM. Bylo otestováno celkem 45 ks vytisknutých zkušebních vzorků a 5 ks vstřikovaných těles. Data z tahových zkoušek jsou zaznamenána jak ve sloupcových grafech, kde je vyobrazena střední hodnoty určité skupiny vzorků. Tak i ve xy grafech kde je zaznamenán průběh každého diagramu a jsou zde také porovnány jednotlivé technologie mezi sebou, tyto grafy jsou k nalezení v přílohách.

Použitá literatura

- [1] Syscae [online]. c1994-2004 [cit. 2017-06-23]. Dostupné z WWW:
http://www.sysca.cz/web/page_112.php
- [2] Stratasys. *Stratasys* [online]. [cit. 2017-06-23]. Dostupné z:
<http://www.stratasys.com/materials/fdm>
- [3] Základy 3D tisku. In: *Prusa Research* [online]. 2014 [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
<http://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [4] ŘASA, J.; KEREČANINOVÁ, Z.: Nekonenční metody obrábění 9. díl : 9 Rapid Prototyping. Nekonenční technologie : inovace. 19. listopadu 2008, 081127, str.50. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonencnimetody-obrabeni-9-dil>>.
- [5] VACULÍK, Martin. *Rapid prototyping* [online]. Zlín, 2011 [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16106/vacul%C3%ADk_2011_bp.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Michal Staněk Ph.D.
- [6] DRÁPELA, M. Modul Rapid Prototyping. [online]. [cit. 27.12.2009]. Dostupné na World Wide Web:
<http://www.vu.vutbr.cz/digidesign/Moduly/Rapid%20Prototyping%20%20Ing.%20Milosvav%20Drápela.pdf>
- [7] ŘASA, J.; KEREČANINOVÁ, Z.: Nekonenční metody obrábění 10. díl :Rapid Prototyping. Nekonenční technologie : inovace. 17. prosince 2008, 081207, str.38. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonencnimetody-obrabeni-10-dil>>.
- [8] Selective laser sintering [online]. [cit. 21.4.2010]. Dostupné na World Wide Web:
<http://www.kenwalt.com/prototype_casting_SLS.gif>.
- [9] Fused deposition modelling [online]. [cit. 29.4.2010]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapidprototyping/fdm.png>

- [10] CAD.cz [online]. [cit. 2010-16-10]. Dostupné z WWW: <http://www.rcmt.cvut.cz/actions/20100225_emo2009/10_stroje_pro_rychle_prototypovani.pdf
- [11] Schéma technologie PolyJet. In: *3DAddFab* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://www.3daddfab.com/technology/>
- [12] *TECNOTRADE* [online]. Kuřim, 2012 [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy>
- [13] *TECNOTRADE* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy/pc>
- [14] *Stratasys: PC (polycarbonate)* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/uploads/files/Fortus-MS-PC-01-13-web.pdf>
- [15] *3D Tisk* [online]. 2015 [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://3dtisk1.webnode.cz/material-tisku/>
- [16] *TECNOTRADE* [online]. 2015 [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy/absi>
- [17] *Stratasys* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_ABSi.pdf#_ga=2.243078278.565793112.1498254647-77168462.1485705517
- [18] *TECNOTRADE* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy/abs-m30>
- [19] *Stratasys* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/uploads/files/Fortus-MS-ABS-M30-01-13-web.pdf>
- [20] *TECNOTRADE* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy/abs-m30i>
- [21] *Stratasys* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/uploads/files/Fortus-MS-M30i-01-13-web.pdf>
- [22] *TECNOTRADE* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy/abs-esd7>
- [23] *TECNOTRADE* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy/pc>
- [24] *Stratasys* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/uploads/files/Fortus-MS-PC-01-13-web.pdf>

- [25] *TECNOTRADE* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
<http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy/pc-iso>
- [26] *Stratasys* [online]. 2013 [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
<http://www.objet.cz/uploads/files/Fortus-MS-PC-ISO-01-13-web.pdf>
- [27] *TECNOTRADE* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
<http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy/pc-abs>
- [28] *Stratasys* [online]. 2013 [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
<http://www.objet.cz/uploads/files/Fortus-MS-PC-ISO-01-13-web.pdf>
- [29] *TECNOTRADE* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
<http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy/ultem-9085>
- [30] *Stratasys: ULTEM 9085* [online]. 2013 [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
<http://www.objet.cz/uploads/files/Fortus-MS-ULTEM9085-01-13-web.pdf>
- [31] *Stratasys*: [online]. 2017 [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
<http://www.stratasys.com/materials/fdm/ultem-1010>
- [32] *Stratasys: ULTEM 1010 Resin* [online]. 2015 [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_ULTEM1010.pdf#_ga=2.217325458.565793112.1498254647-77168462.1485705517
- [33] *OpenTheFile* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
<http://www.openthefile.net/cs/extension/stl>
- [34] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. 2012-02-14. Praha, 2012.
- [35] *Stratasys: Fortus® 450mc 3D Production System* [online]. 2014 [cit. 2017-06-24].
Dostupné z: <http://engatech.com/wp-content/uploads/2014/06/Fortus-450-User-Guide.pdf>
- [36] Laboratoř progresivních strojírenských technologií. In: *Technická Univerzita v Liberci* [online]. [cit. 2017-06-24]. Dostupné z: <https://cxi.tul.cz/strojirenstvi/oddeleni-prumyslovych-technologii/laborator-progresivnich-strojirenskych-technologii>
- [37] *Sabic: ULTEM 1010 Resin* [online]. 2015 [cit. 2017-06-24]. Dostupné z:
<https://www.sabicip.com/gepapp/eng/weather/weatherhtml?sltUnit=SI&sltRegionList=1002002000&sltPrd=1002003018&sltGrd=1002011258&sltModule=DATASHEETS&sltType=Online&sltVersion=Internet&sltLDAP=0>

Seznam příloh

Příloha A – Obsah přiloženého CD

Příloha 1: Diagram tahové zkoušky – Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$)

Příloha 2: Diagram tahové zkoušky – Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$) totožná orientace vláken

Příloha 3: Diagram zkoušky tahem - Porovnání průměrných hodnot -
Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 0^\circ$)

Příloha 4: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 90^\circ$)

Příloha 5: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 90^\circ$) - totožná orientace vláken

Příloha 6: Diagram zkoušky tahem - Porovnání průměrných hodnot –
Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 90^\circ$)

Příloha 7: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$)

Příloha 8: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$) - totožná orientace vláken

Příloha 9: Diagram zkoušky tahem - Porovnání průměrných hodnot –
Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 0^\circ$, $yz\ 135^\circ$)

Příloha 10: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 0^\circ$, $xz\ 90^\circ$, $yz\ 90^\circ$) - totožná orientace vláken

Příloha 11: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 45^\circ$, $xz\ 45^\circ$, $yz\ 45^\circ$)

Příloha 12: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 45^\circ$, $xz\ 45^\circ$, $yz\ 45^\circ$) - totožná orientace vláken

Příloha 13: Diagram zkoušky tahem - Porovnání průměrných hodnot –
Tisk ($xy\ 45^\circ$, $xz\ 45^\circ$, $yz\ 45^\circ$)

Příloha 14: Porovnání průměrných hodnot

Příloha 15: Diagram zkoušky tahem – Vstříkované vzorky

Příloha 16: Diagram zkoušky tahem – Vstříkované vzorky a vytisknuté vzorky

Příloha 17: Tabulka s naměřenými hodnotami šířky zúžené části a doporučené tloušťky

Přílohy

Příloha A - Obsah přiloženého CD

Text bakalářské práce

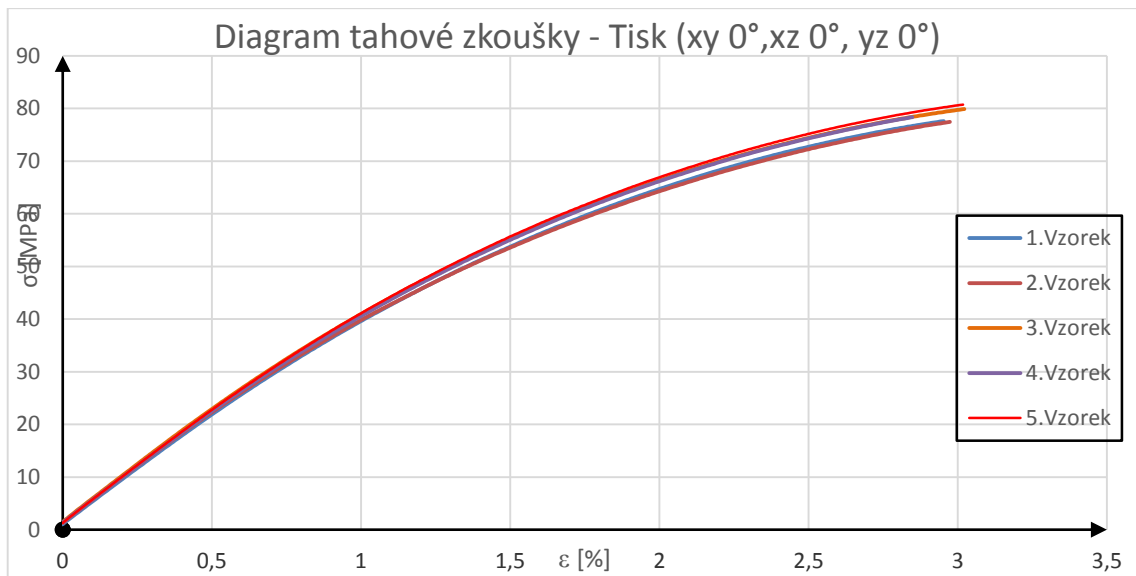
- bakalářská_práce_2017_Aleš_Pajr
- kopie_zadání_bakalářská_práce_2017_Aleš_Pajr

Grafy a zdrojová data z tahové zkoušky pro jednotlivé způsoby tisku

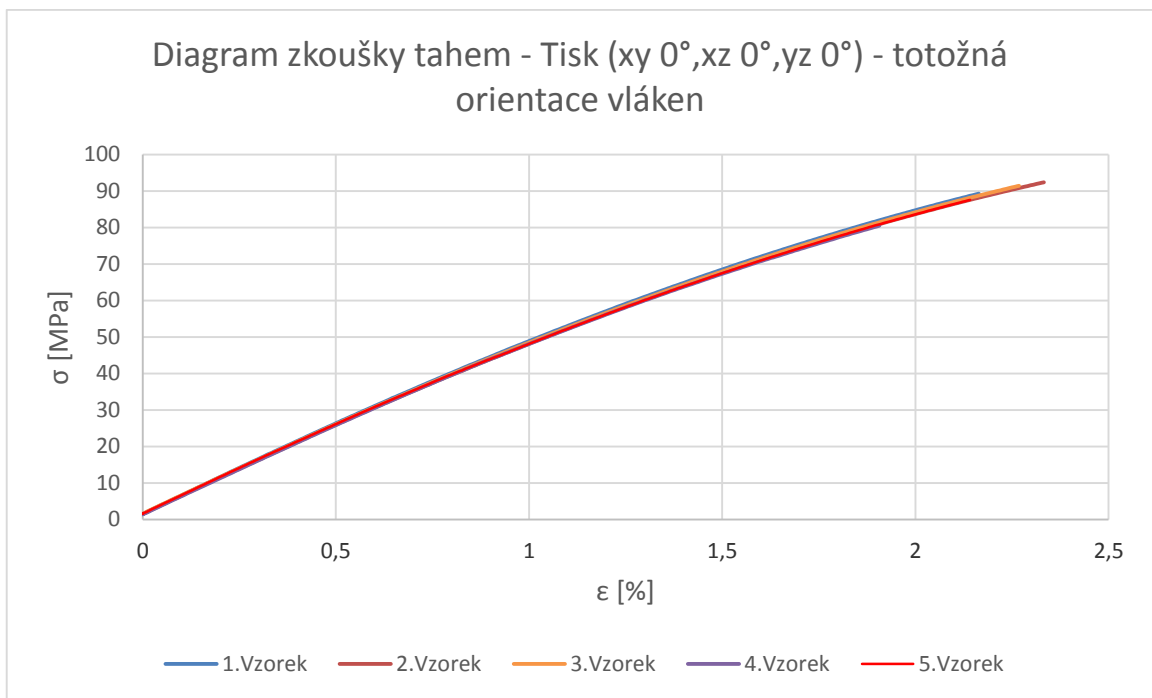
- data_z_tahových_zkoušek_vytisknutých_vzorků
- data_z_tahových_zkoušek_vstřikovaných_vzorků

Fotografie

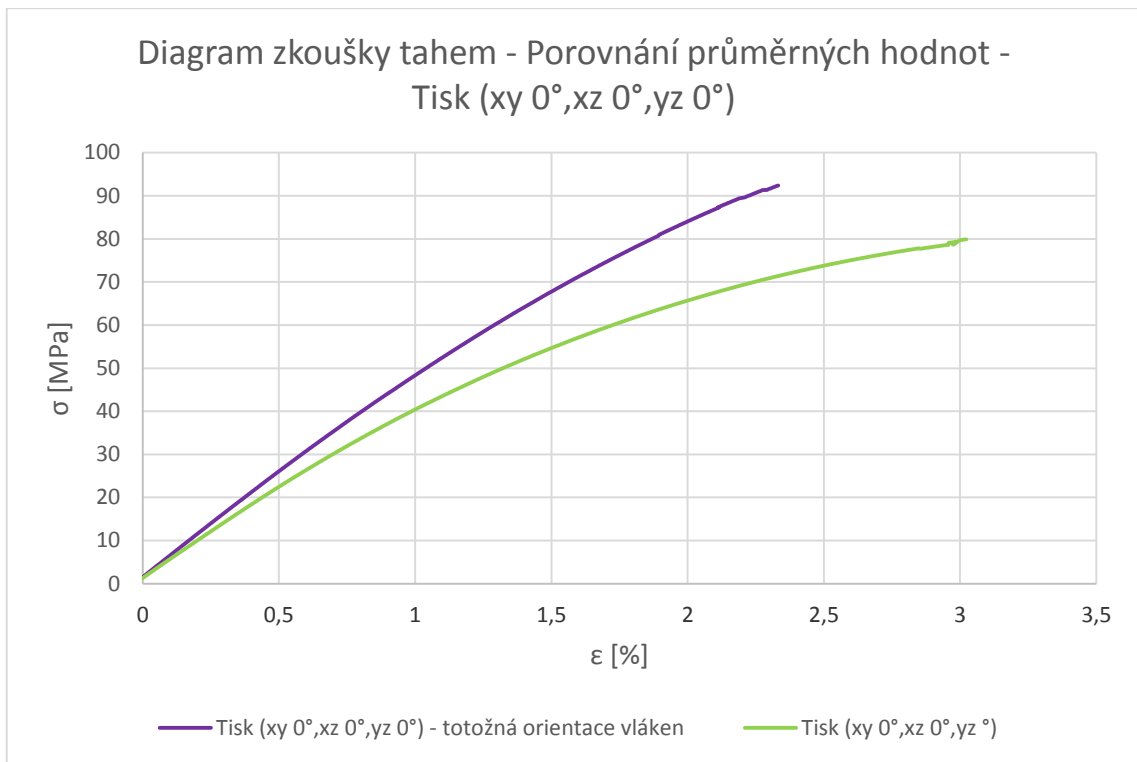
- trhací_zkouška_pro_vytisknuté_vzorky
- trhací_zkouška_pro_vstřikované_vzorky



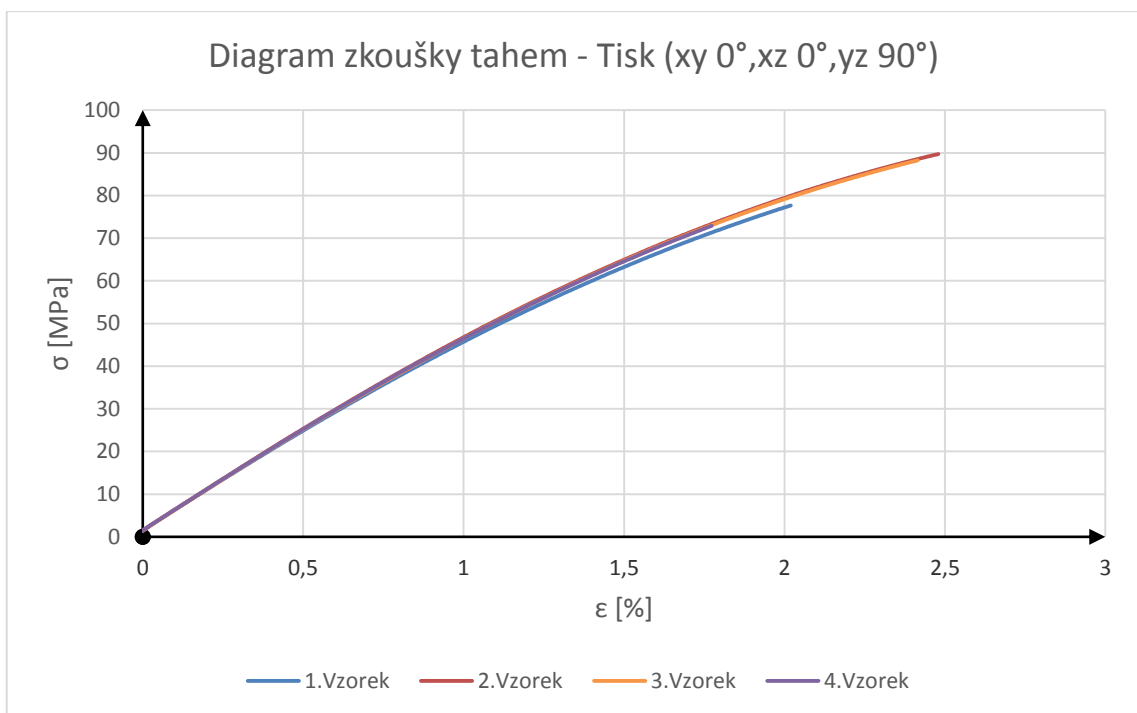
Příloha 1: Diagram tahové zkoušky – Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$)



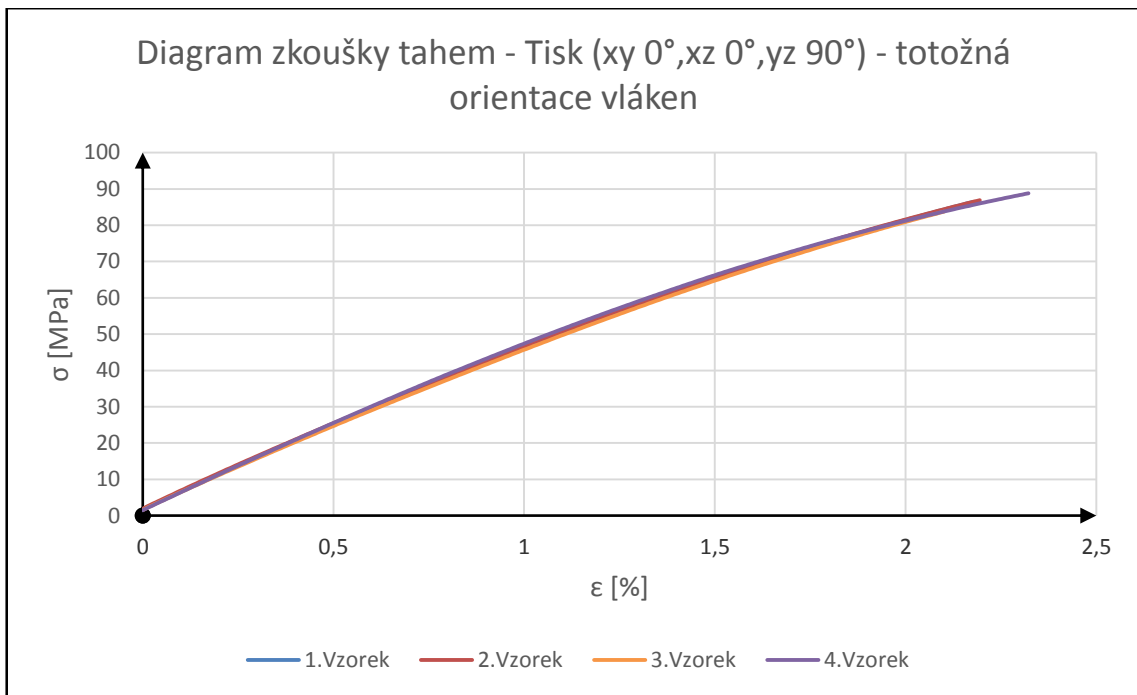
Příloha 2: Diagram tahové zkoušky – Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$) totožná orientace vláken



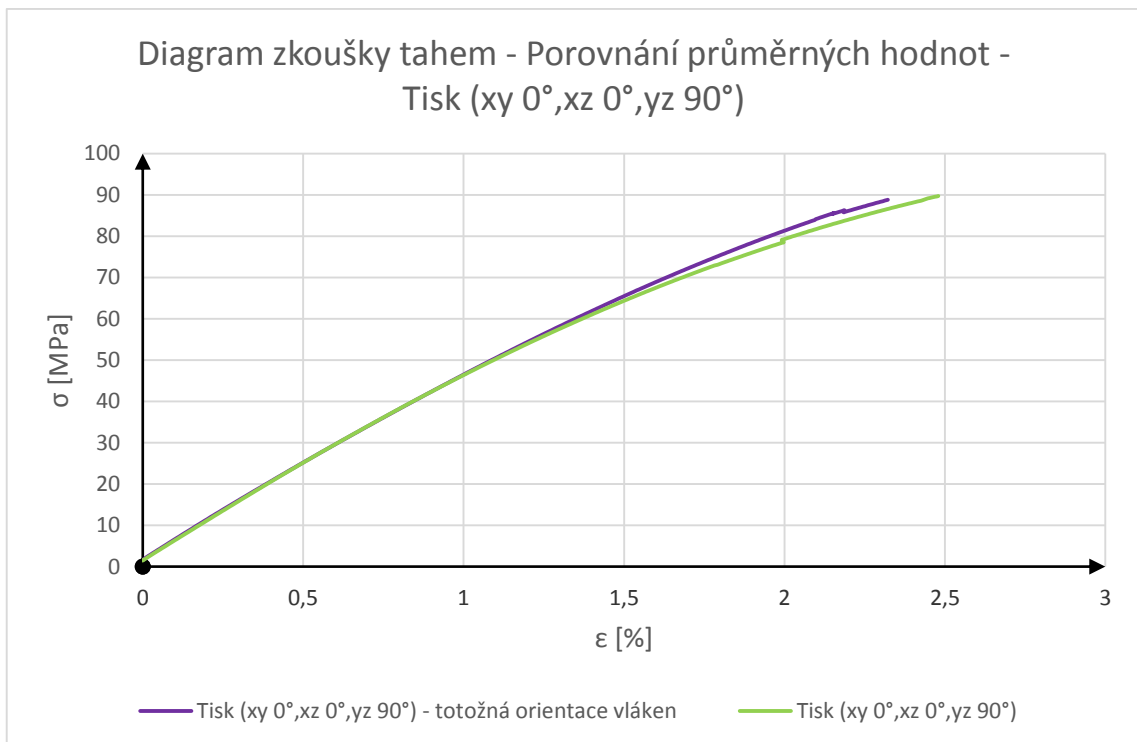
**Příloha 3: Diagram zkoušky tahem - Porovnání průměrných hodnot -
Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 0^\circ$)**



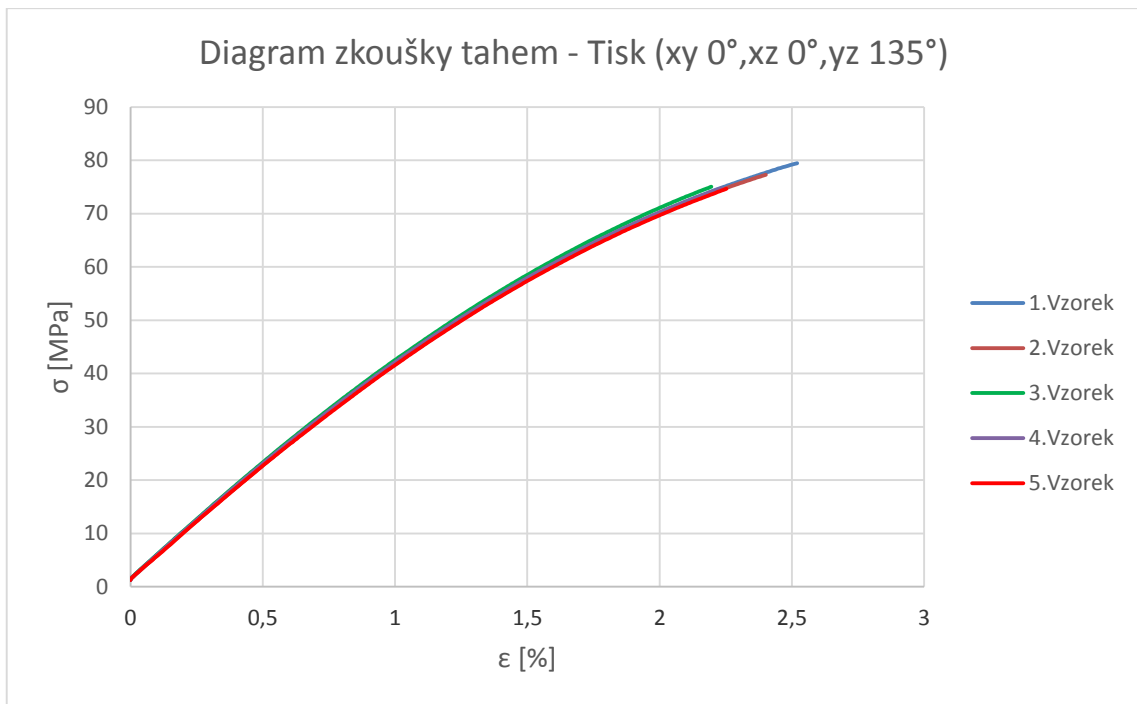
Příloha 4: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$)



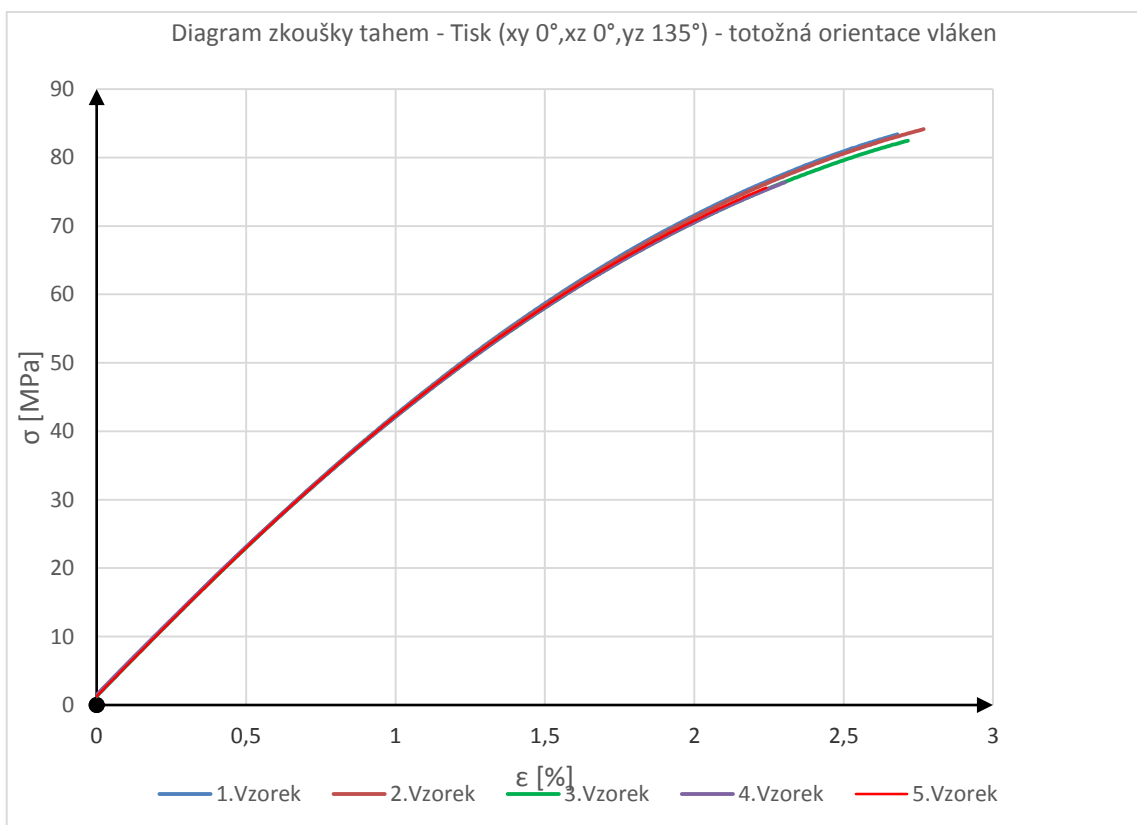
Příloha 5: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$) - totožná orientace vláken



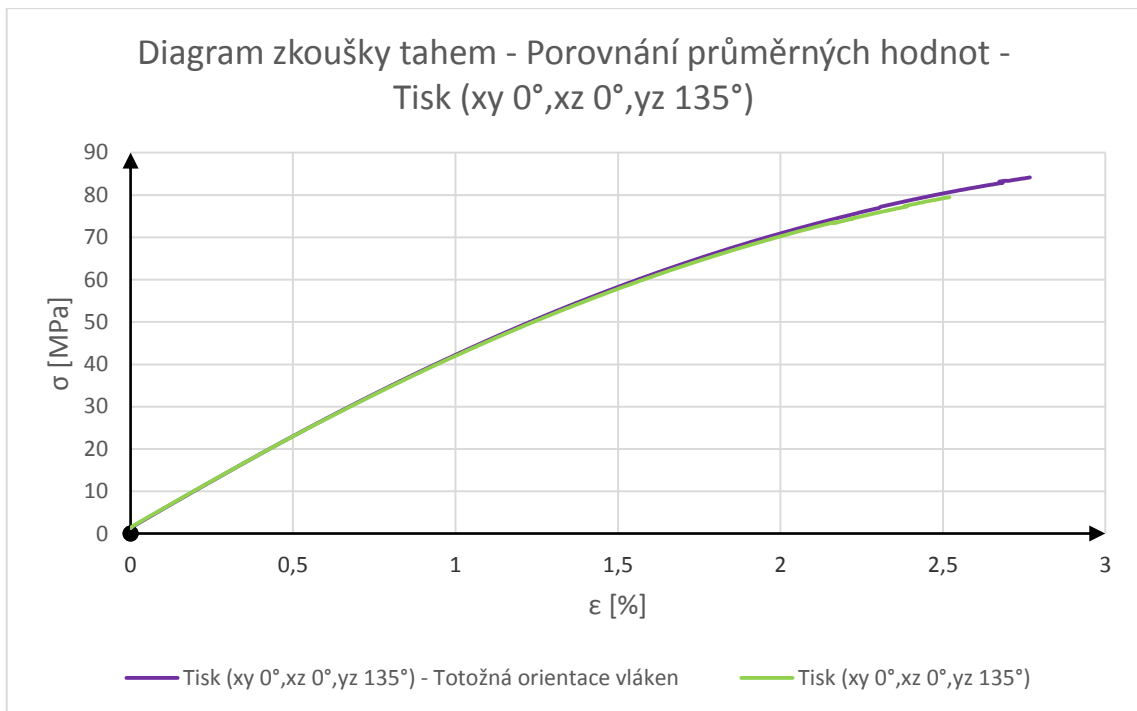
Příloha 6: Diagram zkoušky tahem - Porovnání průměrných hodnot – Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 90^\circ$)



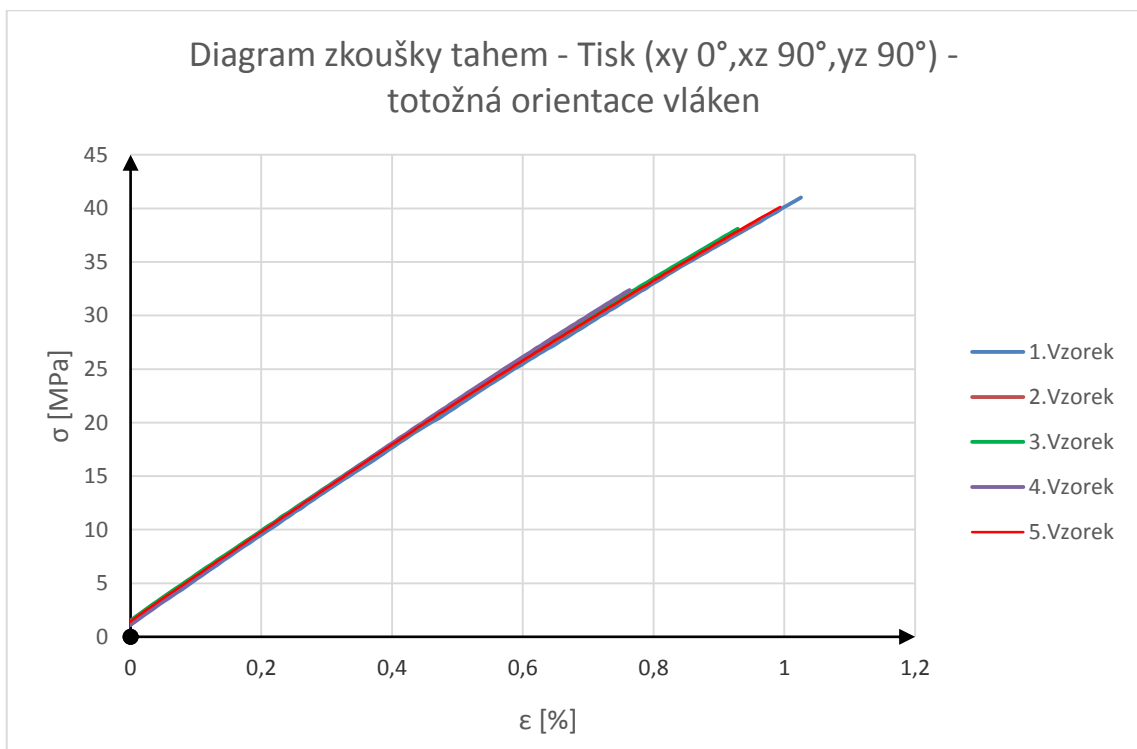
Příloha 7: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$)



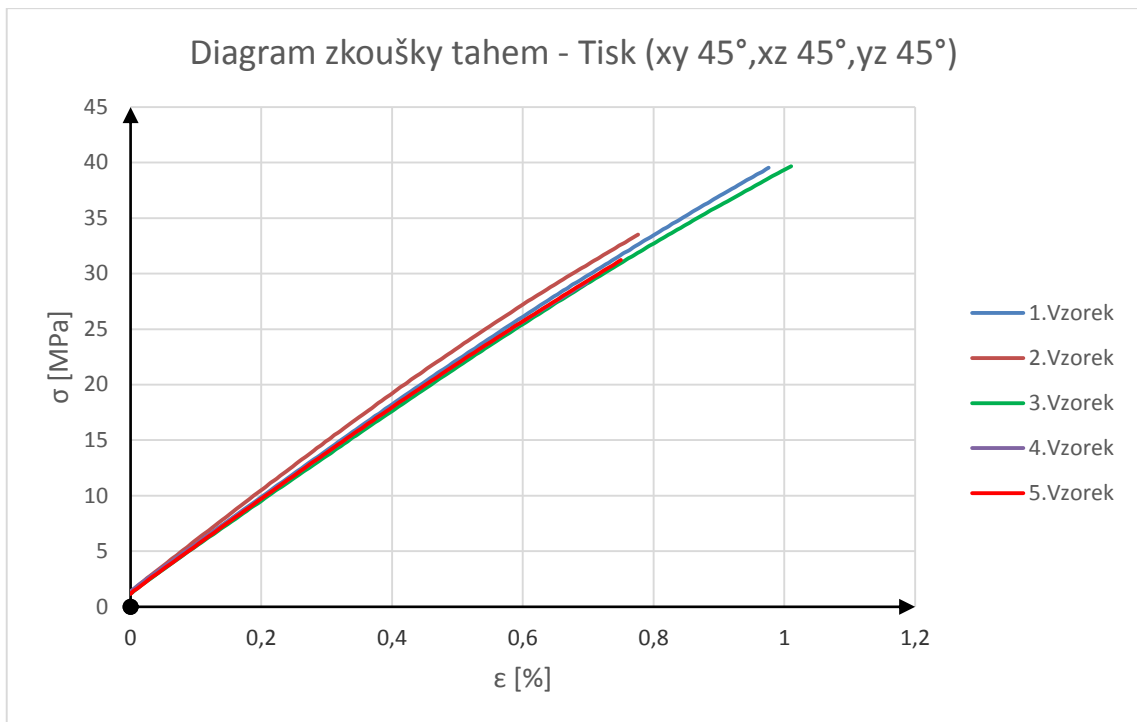
Příloha 8: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$) - totožná orientace vláken



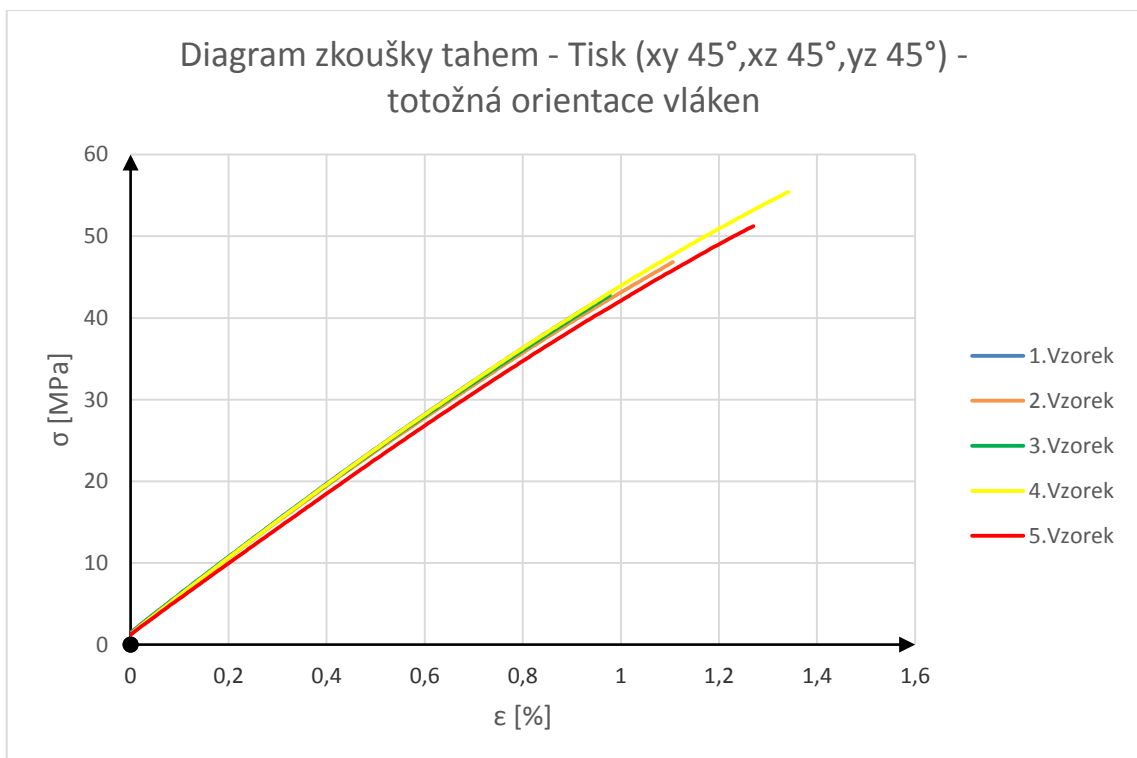
Příloha 9: Diagram zkoušky tahem - Porovnání průměrných hodnot –
Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 0^\circ, yz\ 135^\circ$)



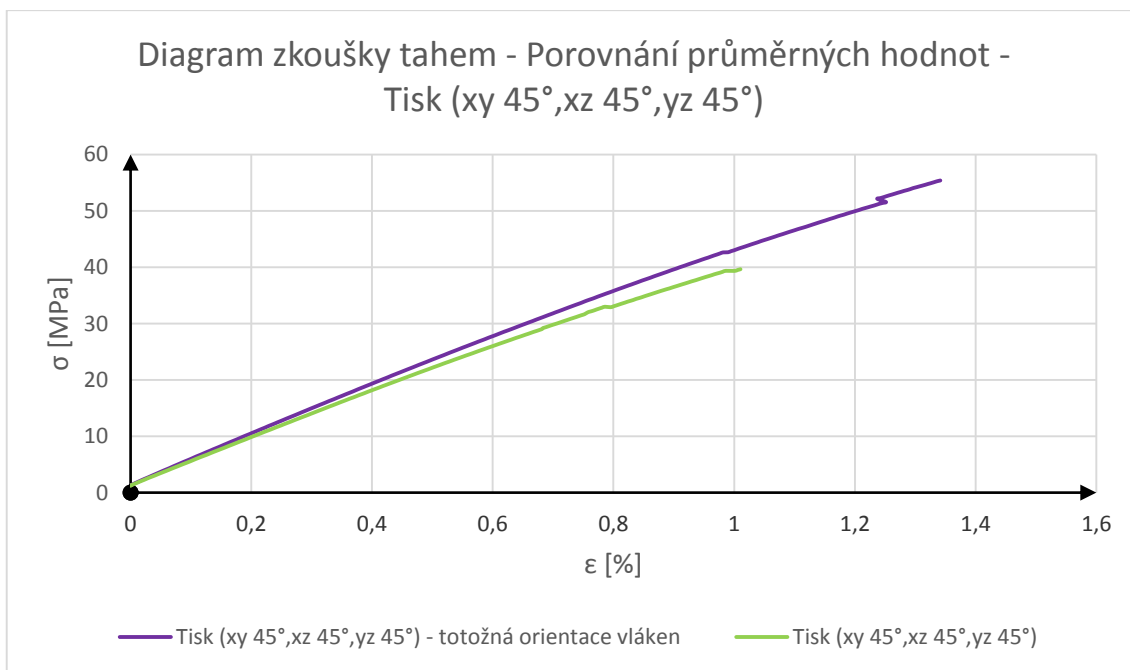
Příloha 10: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 0^\circ, xz\ 90^\circ, yz\ 90^\circ$) - totožná orientace
vláken



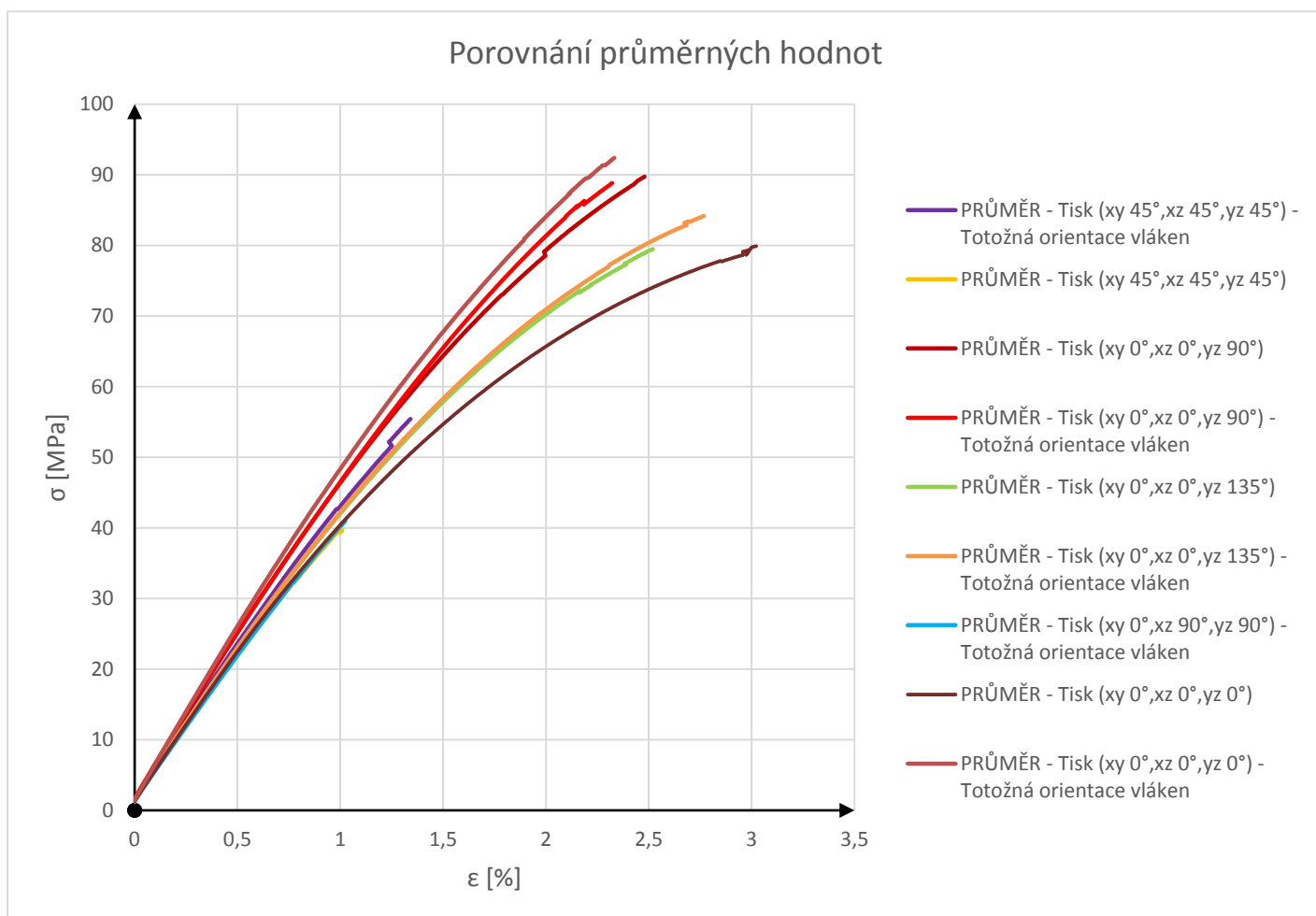
Příloha 11: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$)



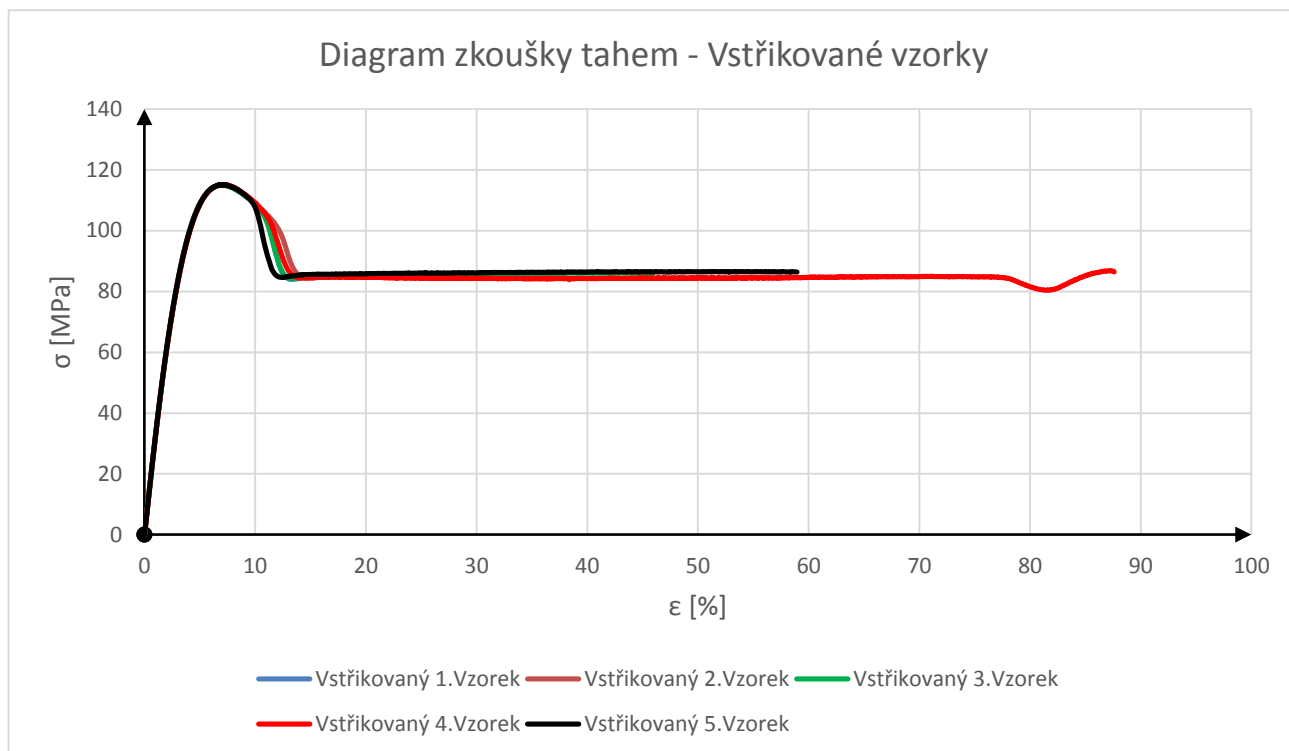
Příloha 12: Diagram zkoušky tahem - Tisk ($xy\ 45^\circ, xz\ 45^\circ, yz\ 45^\circ$) - totožná orientace vláken



Příloha 13: Diagram zkoušky tahem - Porovnání průměrných hodnot –
Tisk (xy 45°,xz 45°,yz 45°)

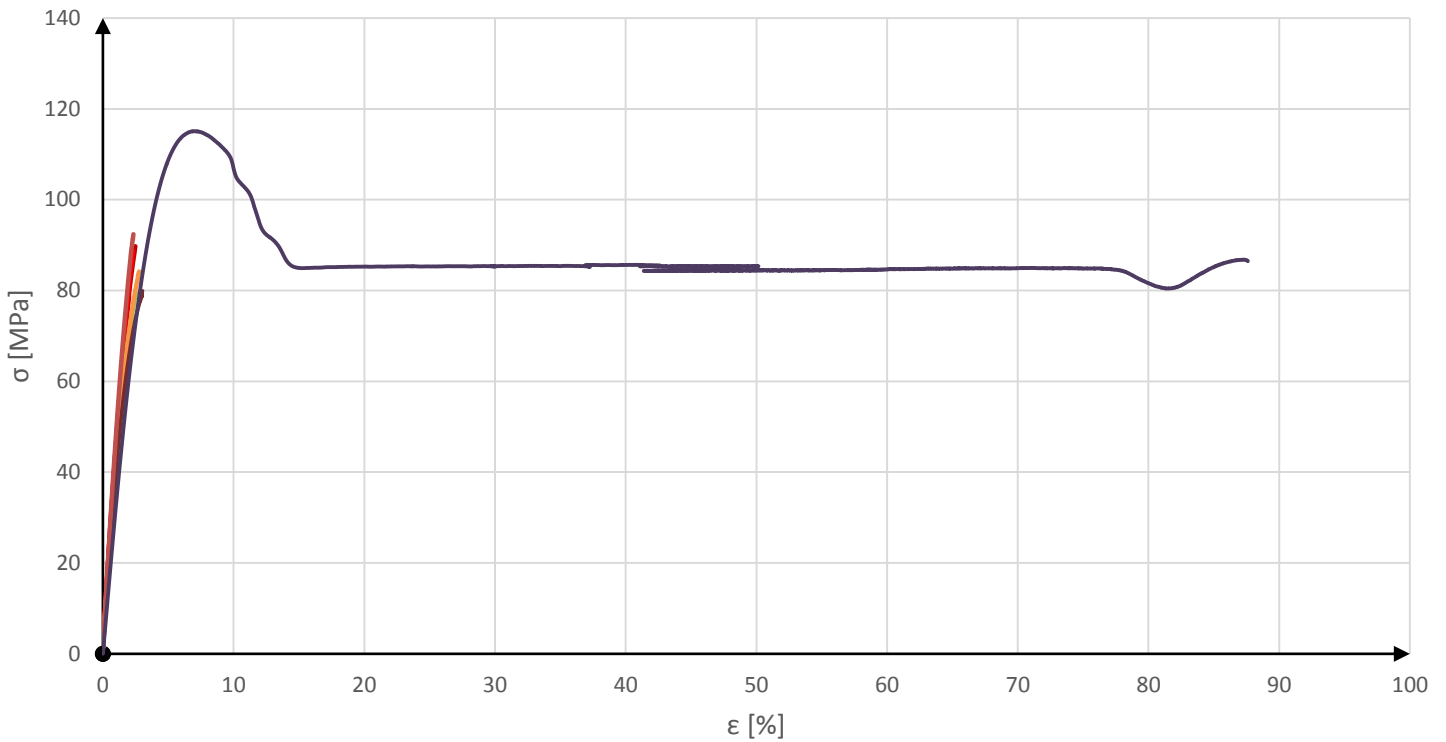


Příloha 14: Porovnání průměrných hodnot



Příloha 15: Diagram zkoušky tahem – Vstřikované vzorky

Porovnání průměrných hodnot



- PRŮMĚR - Tisk (xy 45°,xz 45°,yz 45°) - Totožná orientace vláken
- PRŮMĚR - Tisk (xy 45°,xz 45°,yz 45°)
- PRŮMĚR - Tisk (xy 0°,xz 0°,yz 90°)
- PRŮMĚR - Tisk (xy 0°,xz 0°,yz 90°) - Totožná orientace vláken
- PRŮMĚR - Tisk (xy 0°,xz 0°,yz 135°)
- PRŮMĚR - Tisk (xy 0°,xz 0°,yz 135°) - Totožná orientace vláken
- PRŮMĚR - Tisk (xy 0°,xz 90°,yz 90°) - Totožná orientace vláken
- PRŮMĚR - Tisk (xy 0°,xz 0°,yz 0°)
- PRŮMĚR - Tisk (xy 0°,xz 0°,yz 0°) - Totožná orientace vláken
- PRŮMĚR - Vstříkované vzorky

Příloha 16: Diagram zkoušky tahem – Vstříkované vzorky a vytisknuté vzorky

Orientace při tisku	Pořadové číslo	Šířka zúžené části	Doporučená tloušťka	Průměrná hodnota	
		10,0 ± 0,2	4,0 ± 0,2		
Tisk (xy 45°,xz45°,yz 45°) – totožná orientace vláken	1	10,06	4,36	10,150	4,360
	2	10,19	4,37		
	3	10,19	4,35		
	4	10,05	4,35		
	5	10,26	4,37		
Tisk (xy 0°,xz 0°,yz 90°)	1	10,24	4,06	10,244	4,048
	2	10,24	4,04		
	3	10,25	4,05		
	4	10,24	4,05		
	5				
Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 90°) – totožná orientace vláken	1	10,21	3,73	10,213	3,810
	2	10,2	3,74		
	3	10,23	3,75		
	4	10,21	4,02		
	5				
Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 135°)	1	10,37	4,15	10,374	4,148
	2	10,38	4,15		
	3	10,37	4,15		
	4	10,37	4,15		
	5	10,38	4,14		
Tisk (xy 0°, xz 90°, yz 90°) – totožná orientace vláken	1	10,23	4,24	10,246	4,26
	2	10,23	4,29		
	3	10,22	4,24		
	4	10,22	4,29		
	5	10,33	4,24		
Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 0°)	1	10,06	4,22	10,066	4,190
	2	10,07	4,18		
	3	10,08	4,17		
	4	10,06	4,19		
	5	10,06	4,19		

Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 0°) - totožná orientace vláken	1	9,77	4,12	9,754	4,118
	2	9,76	4,12		
	3	9,76	4,11		
	4	9,74	4,12		
	5	9,74	4,12		
Tisk (xy 0°, xz 0°, yz 135°) - totožná orientace vláken	1	10,17	4,14	10,18	4,144
	2	10,17	4,14		
	3	10,18	4,15		
	4	10,19	4,15		
	5	10,19	4,14		
Tisk (xy 45°, xz 45°, yz 45°)	1	10,21	4,3	10,202	4,306
	2	10,08	4,27		
	3	10,21	4,32		
	4	10,23	4,27		
	5	10,28	4,37		

Příloha 17: Tabulka s naměřenými hodnotami šířky zúžené části a doporučené tloušťky