



Porovnání materiálových vlastností plastových dílů zhotovených 3D tiskem a technologií vstřikování

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály

Autor práce: **Bc. Vít Bednář**

Vedoucí práce: Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vít Bednář**
Osobní číslo: **S16000284**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Porovnání materiálových vlastností plastových dílů zhotovených 3D tiskem a technologií vstřikování**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

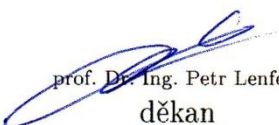
Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Rešerše na dané téma.
2. Příprava 3D modelu, zhotovení dílu 3D tiskem z materiálů ABS, PC/ABS a PEI.
3. Studium materiálových vlastností dílů zhotovených 3D tiskem.
4. Vstřikování dílů na bázi ABS, PC/ABS a PEI dle mezinárodních předpisů a specifikace materiálu.
5. Studium materiálových vlastností vstřikovaných dílů zhotovených 3D tiskem.
6. Studium reziduálního napětí plastových dílů zhotovených 3D tiskem a technologií vstřikování po kondicionaci ve standardním prostředí 23/50 dle ČSN EN ISO 291.
7. Vyhodnocení a diskuse dosažených výsledků, závěr.

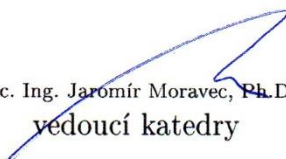
Rozsah grafických prací: **grafy, tabulky**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran textu**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] **Zeman, L.** *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 9788073002503.
[2] **Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B.** *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. ISBN: 9781493921126.
[3] **Liu, D., Valencia, V. V., Badiru, A. B.** *Additive manufacturing handbook*. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2017. ISBN: 9781482264081.
[4] **Mezinárodní normy.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Šafka, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace
Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2017**
Termín odevzdání diplomové práce: **1. února 2019**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou 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.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Název diplomové práce:

Porovnání materiálových vlastností plastových dílů zhotovených 3D tiskem a technologií vstřikování

Dissertation thesis title:

Comparison of material qualities of plastic parts made with 3D print and injection technology

Anotace

Předložená diplomová práce se zabývá studiem a vzájemným porovnáním materiálových vlastností plastových dílů vyrobených technologií vstřikování a metodou FDM v závislosti na geometrii, orientaci a tloušťce vrstev 3D tisku. Diplomová práce je rozdělena na dvě části – teoretickou a experimentální. V teoretické části je popsán princip a problematika technologie vstřikování a aditivních technologií. Experimentální část obsahuje informace o použitých materiálech na bázi ABS, PC/ABS a PEI i o vlivech použitých technologií na materiálové vlastnosti dílů. Následně je uvedeno vyhodnocení těchto vlastností při tahovém, ohybovém a rázovém namáhání.

Klíčová slova

technologie vstřikování, metoda FDM, 3D tisk, ABS, PC/ABS, PEI

Annotation

Presented thesis is dealing with mutual comparison of material characteristic of plastic parts made by injection technology and FDM method in dependence on geometry, orientation and 3D print layers thickness. This thesis is divided into two parts – theoretical and experimental. The theoretical part is describing the principle and problematic of the injection technology and additive technologies. The experimental section contains information about used materials on ABS, PC/ABS and PEI basis as well as information about the used technologies' influences onto a material quality of plastic parts. The evaluation of these qualities during tensile, bending and impact load is presented in the following part of the thesis.

Key Words

injection technology, method FDM, 3D print, ABS, PC/ABS, PEI

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady v průběhu zpracování mé diplomové práce.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže SGS 21122 ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu a projektu Ministerstva vnitra ČR (VI20172020052) "Aplikovaný výzkum v oblasti osobních ochranných prostředků nové generace pro potřeby IZS.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Seznam použitých zkratk a symbolů | 6 |
| 1 Úvod..... | 8 |
| 2 Teoretická část..... | 9 |
| 2.1 Technologie vstřikování | 9 |
| 2.2 Aditivní technologie - 3D tisk (Rapid Prototyping) | 20 |
| 3 Experimentální část | 35 |
| 3.1 Charakteristika polymerů | 35 |
| 3.2 Výroba dílů technologií FDM | 38 |
| 3.3 Výroba dílů technologií vstřikování | 44 |
| 3.4 Studium mechanických vlastností dílů | 45 |
| 4 Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze..... | 57 |
| 4.1 Vyhodnocení tahových vlastností..... | 57 |
| 4.2 Vyhodnocení ohybových vlastností | 67 |
| 4.3 Vyhodnocení rázové houževnatosti Charpy | 72 |
| 5 Závěr..... | 75 |
| Použitá literatura..... | 78 |
| Seznam příloh | 84 |

Seznam použitých zkratek a symbolů

| | |
|---------------------|--|
| E_c | – korigovaná energie spotřebovaná při přeražení vzorku [J] |
| E_f | – modul pružnosti v ohybu [MPa] |
| E_t | – modul pružnosti v tahu [MPa] |
| T | – teplota [°C] |
| T_F | – teplota formy [°C] |
| T_g | – teplota skelného přechodu [°C] |
| T_m | – teplota tání [°C] |
| T_T | – teplota taveniny [°C] |
| a_{cU} | – rázová houževnatost Charpy vzorku [kJ/m ²] |
| b | – šířka vzorku [mm] |
| h | – tloušťka vzorku [mm] |
| p | – tlak [MPa] |
| p_d | – dotlak [MPa] |
| p_{Fmax} | – maximální tlak formy [MPa] |
| p_i | – vnitřní tlak v dutině formy [MPa] |
| p_v | – vstřikovací tlak [MPa] |
| t | – čas [s] |
| t_{ch} | – čas chlazení [s] |
| v | – měrný objem [m ³ /kg] |
| v_s | – vstřikovací rychlost [cm ³ /s] |
| $\varepsilon_{1,2}$ | – poměrné prodloužení [%] |
| ε_{tb} | – jmenovité poměrné prodloužení při přetržení [%] |
| $\sigma_{1,2}$ | – napětí v tahu [MPa] |
| $\sigma_{f1,f2}$ | – napětí v ohybu [MPa] |
| σ_{fM} | – mez pevnosti v ohybu [MPa] |
| σ_m | – mez pevnosti v tahu [MPa] |
| ABS | – Akrylonitril – butadien – Styren |
| ASA | – Akrylonitril – styren – alkylakrylát |
| BR | – Butadienový kaučuk |
| EPDM | – Ethylen – propylen – dién – terpolymerový kaučuk |
| NR | – Přírodní kaučuk |

PA – Polyamid
PC – Polykarbonát
PEI – Polyeterimid
PES – Polyétersulfon
PET – Polyethylentereftalát
PJP – PolyJet Photopolymer
PLA – Polylaktid (Kyselina polymléčná)
PP – Polypropylen
SBR – Butadien – styrenový kaučuk

CAD – Computer Aided Design
DMLS – Direct Metal Laser Sintering
EM – Elektronová mikroskopie
FDM – Fused Deposition Modeling
K – Koncentrický
LOM – Laminated Object Manufacturing
SGC – Solid Ground Curing
SLA – Stereolitografie
SLS – Selective Laser Sintering
SM – Světelná mikroskopie

1 Úvod

Konečný výběr technologického způsobu zpracování plastů je podřízen jejich zpracovatelským vlastnostem, výslednému tvaru a funkci výrobku a nakonec celkové ekonomii výrobního procesu. Podle konečného výrobku lze zpracovatelské technologie rozdělit na tvářecí, tvarovací a dokončovací.

Technologie vstřikování je proces, který je s ohledem na investiční náklady (stroje, formy atd.) vhodný pro sériovou výrobu. Aditivní technologie jsou technologie, které slouží především pro kusovou, prototypovou a malosériovou výrobu, jejímž cílem je ověření funkčnosti dílu, jeho smontovatelnosti, designu apod.

Předložená diplomová práce souvisí s vědecko-výzkumnou činností na katedře strojírenské technologie v rámci projektu Studentské grantové soutěže (SGS 21122) a projektu Ministerstva vnitra ČR (VI20172020052) zabývající se aplikovaným výzkumem v oblasti osobních ochranných prostředků nové generace pro potřeby integrovaného záchranného systému. Cílem tohoto projektu je zvýšení účinnosti a spolehlivosti ochranných osobních prostředků využívaných v krizových situacích při ohrožení nebezpečnými chemickými či biologickými látkami. V rámci projektu jsou vyvíjené nové ochranné prostředky a před jejich vlastní sériovou výrobou jsou v prvotní fázi řešeny jejich materiálové, funkční, tvarové a geometrické vlastnosti. Pro tyto účely budou vyráběny modely těchto dílů a pro výrobu těchto modelů budou použity různé aditivní technologie. Jednou z metod je technologie FDM. Pro tuto technologii jsou standardně používány materiály na bázi ABS, PC/ABS ad. Touto technologií lze vyrábět modely s různou tloušťkou vrstev, různou jejich orientací a geometrií, které mohou mít vliv na vlastnosti a použití výsledného dílu z hlediska jeho funkčních vlastností.

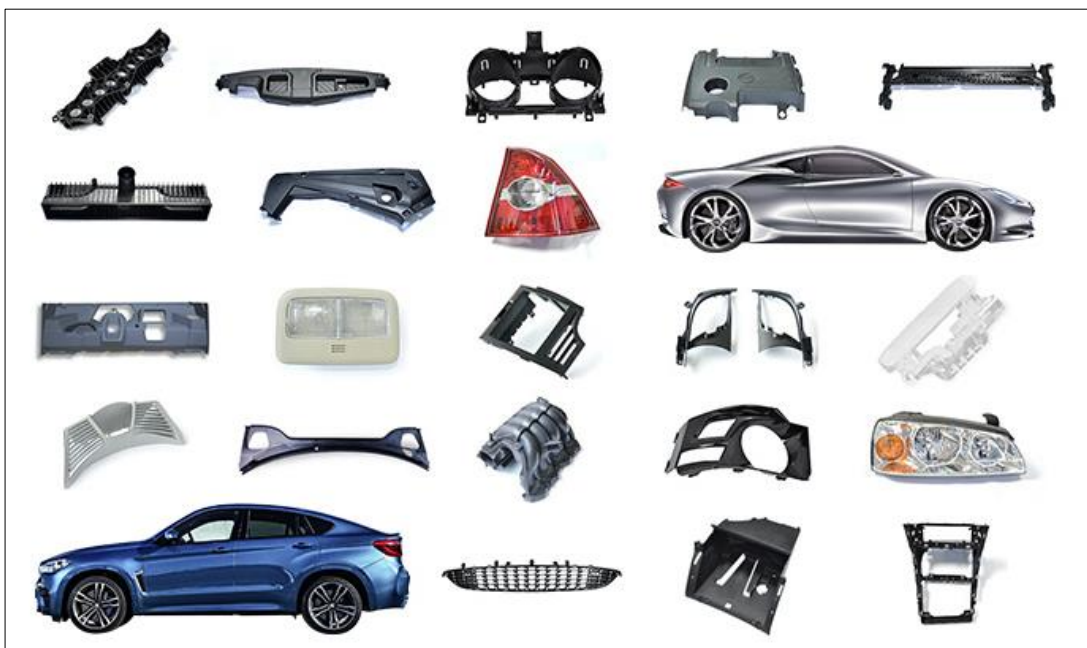
Cílem diplomové práce je proto ověřit vliv tloušťky vrstvy, její orientace a geometrie na výsledné mechanické charakteristiky dílu, případně nalézt takovou geometrii uspořádání vrstev, která by se z hlediska těchto vlastností přiblížila vstřikovaným dílům a umožnila tak využití 3D modelu i pro ověření funkčních vlastností prototypu při tahovém, ohybovém a rázovém namáhání.

2 Teoretická část

V souladu se zadáním předložené diplomové práce je její teoretická řešeršní část zaměřena na zpracování plastů technologiemi vstřikování a 3D tisku. U každé technologie je definován základní princip a postup při výrobě plastových dílů i faktory, které ovlivňují výslednou kvalitu výrobku a které napomohou objasnit závěry získané v experimentální části diplomové práce.

2.1 Technologie vstřikování

Technologie vstřikování je jednou z nejpoužívanějších technologií pro zpracování širokého výběru polymerních materiálů. Nejvíce se používá pro zpracování termoplastů. Svoje zastoupení nachází i při zpracování reaktoplastů, různých polymerních směsí, elastomerů a kompozitů. Svoji podstatou se zařazuje mezi tvářecí technologie, kde dochází ke značnému přemísťování částic a k zásadní změně tvaru výchozího materiálu. Výrobky zhotovené touto technologií mohou mít hmotnost od několika desetin gramů až po několik kilogramů a může se jednat o hotové výrobky nebo pouze polotovary pro další zpracování. Příklady vstřikovaných dílů jsou zobrazeny na obr. 1. Maximální rozměry vstřikovaného dílu jsou omezeny velikostí vstřikovacího stroje [1].



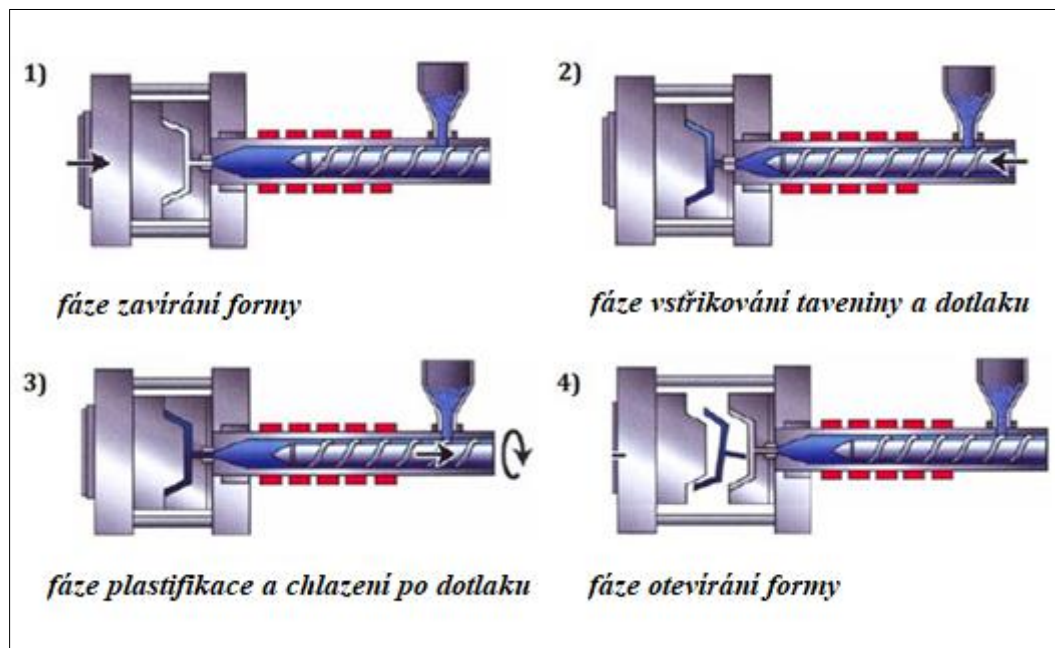
Obr. 1 - Příklady vstřikovaných dílů automobilového průmyslu [2]

Výhodou technologie vstřikování je vysoká rozměrová a tvarová přesnost výrobků (a to i tvarově složitých), vysoká kvalita jejich povrchu, krátké výrobní cykly ad. Mezi největší nevýhody patří vysoká pořizovací cena stroje i nástroje. Z toho důvodu je technologie vhodná zejména pro sériovou výrobu dílů automobilového, lékařského a spotřebního průmyslu [3].

První využití technologie vstřikování bylo zaznamenáno v roce 1870 v USA, kdy bratři Hyattové sestrojili první vstřikovací stroj. Tento stroj se skládal z vertikálního hydraulického pístu, trysky umístěné kolmo na osu válce a dvoudílné vstřikovací formy. Tímto způsobem byly vyrobeny první výstřiky z nitrátu celulózy v podobě obstříknutých kovových přezek a dřevěných jader štětek na holení [4]. Od té doby zaznamenala technologie vstřikování značný rozvoj a to zejména v druhé polovině minulého století. Dnes se jedná o velmi perspektivní proces, který se stále zlepšuje a modifikuje, reaguje na potřeby konstruktérů, technologů, výrobců polymerních materiálů a výrobců forem. Mezi nejčastější modifikace konvenčního procesu patří vícekomponentní vstřikování, vstřikování těles s uzavřenou vnitřní dutinou, vstřikování strukturních pěn, dekorativní a kaskádovité vstřikování atd. Všechny modifikace aplikované při vstřikování však vycházejí ze základních poznatků konvenčního způsobu vstřikování [5].

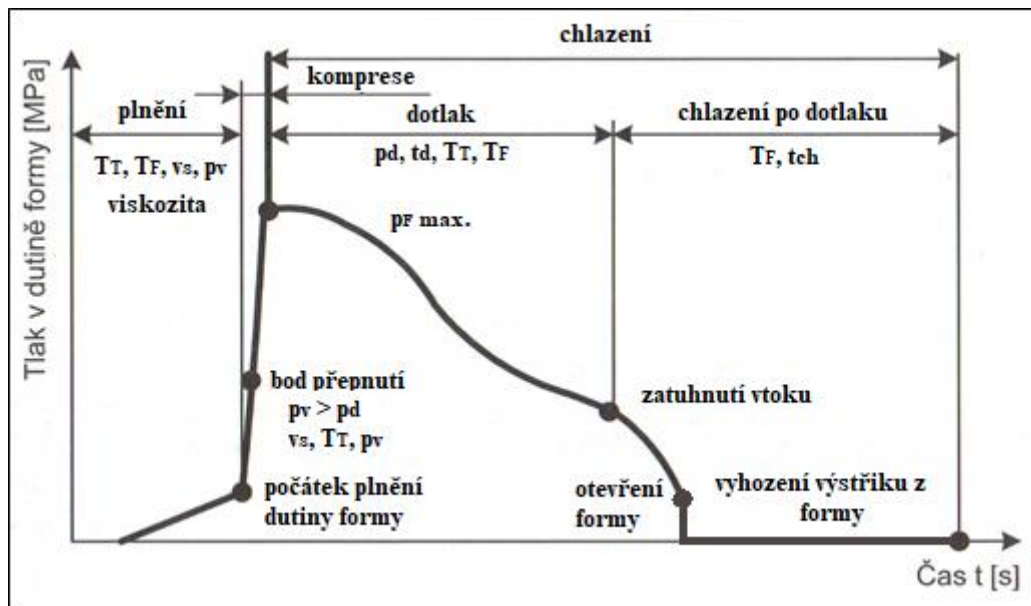
Podstatou technologie vstřikování je dopravení taveniny plastu dostatečnou rychlostí do uzavřené dutiny formy (dutina formy odpovídá tvarem konečnému výrobku), kde pomocí temperačního systému formy dochází ke ztuhnutí materiálu ve finální výrobek. Pro vstříknutí taveniny do dutiny formy se nejčastěji využívají šnekové vstřikovací stroje, ve výjimečných případech pístové. Potřebné množství taveniny materiálu pro vstřikování je získáno pomocí plastifikační komory, která je součástí stroje a neustále doplňuje zásobu materiálu během výrobního cyklu. Samotný výrobní cyklus (viz obr. 2) začíná uzavřením vstřikovací formy a vyvoláním potřebné uzavírací síly, aby nedošlo k jejímu otevření během vstřikování (fáze zavírání formy). V dalším kroku se k uzavřené vstřikovací formě přisune vstřikovací jednotka. Axiálním pohybem šneku dochází ke vstřikování taveniny do dutiny formy (fáze vstřikování) a následuje fáze dotlaku. Vlivem ochlazování taveniny ve formě dochází ke změně objemu taveniny. Tento jev se nazývá smrštění a má za následek rozměrové a povrchové vady výstřiku, eliminuje se působením dotlaku při tuhnutí taveniny ve formě. Dotlak působí maximálně do doby, dokud vstřikovaný materiál nezatuhne v ústí

vtoku, po jeho skončení nastává fáze plastifikace nové dávky materiálu potřebné pro další vstřikovací cyklus. V plastifikační jednotce dochází vlivem tepla, axiálního a rotačního pohybu šneku k tavení granulátu a tvorbě taveniny. Rotací a axiálním pohybem šneku je tavenina postupně přesouvána před jeho čelo, odkud je přes trysku vstřikována následně do dutiny formy. Během fáze plastifikace probíhá pokračující chlazení výrobku v dutině formy po dotlaku, až do okamžiku otevření formy (fáze chlazení po dotlaku). Celý výrobní cyklus končí okamžikem opětovného uzavření formy. Jednotlivé fáze výrobního cyklu jsou znázorněny na obr. 2 [3], [4].



Obr. 2 - Jednotlivé fáze výrobního procesu při vstřikování [1]

Vstřikovací cyklus, lze popsat také průběhem závislosti vnitřního tlaku v dutině formy (p_i) na čase (t), který zaujímá z pohledu výsledné kvality vstřikovaného dílu významnou roli (viz obr. 3). Případně může být vstřikovací cyklus popsán vzájemnou závislostí stavových termodynamických veličin jako je tlak (p), měrný objem (v) a teplota materiálu (T), tzv. p - v - T digram [3].



Obr. 3 - Průběh tlaku v dutině formy [5]

Vstřikování je výrobní cyklus, který je rozdělen na jednotlivé úseky a fáze. Každá z fází je ovlivněna a charakterizována svými **technologickými parametry** (viz obr. 3). Tím dochází k vzájemnému ovlivnění jednotlivých fází, které na sebe postupně navazují, v některých případech se i vzájemně překrývají. Celkový vliv jednotlivých úseků a fází na jakost výstřiku je spolu s technologickými parametry popsán v následující kapitole 2.1.2 [5].

2.1.1 Fáze a technologické parametry vstřikování a jejich vliv na vlastnosti výstřiku

Pro přehled je uvedeno základní rozdělení výrobního cyklu na jednotlivé úseky a fáze:

- | | |
|---|--|
| <p>a) Fáze zavírání formy – uzavření formy a vyvolání uzavírací síly</p> <p>b) Pohyb vstřikovací jednotky k formě – vyvolání přitlaku</p> <p>c) Fáze vstřikování – plnicí a kompresní fáze</p> <p>d) Bod přepnutí – přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak</p> <p>e) Fáze dotlaku – eliminace smršnění a výstřiku</p> | <p>f) Fáze plastifikace – dávkování taveniny před čelo šneku, Fáze chlazení – chlazení výstřiku ve formě po dotlaku</p> <p>g) Odjezd vstřikovací jednotky od formy</p> <p>h) Fáze otevírání formy – pohyb pohyblivé části formy</p> <p>i) Vyhození / vyjmutí výstřiku z formy</p> |
|---|--|

Vstřikovací cyklus je závislý na materiálu, konstrukci výstřiku, konstrukci formy a na celkovém systému vstřikovacího stroje. Jednotlivé úseky a fáze jsou z tohoto důvodu různě dlouhé, proto se i výrobní cyklus může vyskytovat v různých variantách, např. bez příjezdu a odjezdu vstřikovací jednotky apod. [5] Následující odstavce se zabývají vlivem jednotlivých fází vstřikovacího procesu, které mají významný vliv na celkovou jakost výstřiku a především na jeho **mechanické vlastnosti**.

a) Fáze zavírání formy

Fáze zavírání se z pohledu výrobního času volí co nejkratší se zřetelem na co nejplynulejší dosednutí pohyblivé části formy na její pevnou část, aby nedošlo k poškození vstřikovací formy v dělicí rovině. Po uzavření formy musí během fáze vstřikování a dotlaku působit na formu dostatečná uzavírací síla. Pokud by uzavírací síla nebyla dostačující, došlo by k úniku taveniny z dutiny formy do dělicí roviny a vznikaly by přetoky (zástříky). Tato fáze je značně závislá na použitém stroji, než na samotném vstřikovacím procesu a na **mechanické vlastnosti** výstřiku má bezvýznamný vliv [1],[5].

b) Pohyb vstřikovací jednotky k formě

Stejně jako u předešlé fáze, i zde se s ohledem na plynulost přisunutí vstřikovací jednotky k formě volí co nejkratší doba. Jak již bylo naznačeno výše, k této činnosti nemusí docházet vždy. V praxi jsou případy, kdy vstřikovací jednotka je přilehlá k formě po celou dobu výrobního cyklu. V případě, kdy je zvolen trvalý příjezd vstřikovací jednotky k formě, může docházet k ohřevu vtokové vložky od trysky a tím k tepelnému ovlivnění výrobku v oblasti vtoku (důsledkem vyšší teploty formy). V opačném případě může dojít k zamrznutí trysky kvůli odvodu tepla z trysky do formy. Před plastifikací je dobré dát si pozor na proniknutí taveniny do vtokového rozvodu formy, kde by mohla zamrznout (v případě otevřené trysky a studené vtokové soustavy). Je důležité kontrolovat také správné souosé dosednutí trysky s formou. Vlivem těchto nedopatření vznikají ve výrobku různé **nečistoty, šmouhy, bubliny, póry, neroztavené částice** a další věci, které mohou svým charakterem negativně ovlivnit **mechanické vlastnosti** výrobku (**snížení pevnosti a tuhosti, větší náchylnost k praskání apod.**) [1], [5].

c) Fáze vstřikování

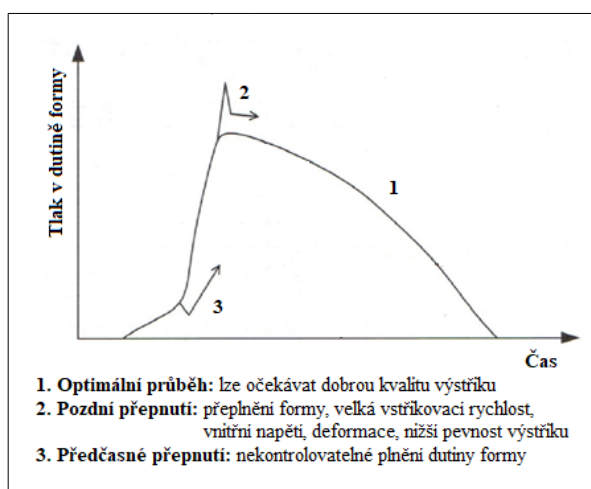
Fáze vstřikování je jedna z nejdůležitějších fází výrobního procesu, která značně ovlivňuje výsledné vlastnosti hotového výrobku. Především jeho povrchové vlastnosti (vzhled) a orientaci makromolekul. Doba vstřiku je samozřejmě závislá na hmotnosti a konstrukci výstřiku a pohybuje se zpravidla od desetin sekundy až po několik sekund. Krátká doba vstřiku se volí zejména s ohledem na rychlost chlazení taveniny, která postupně ztrácí tekutost a zároveň, aby nedošlo k zatuhnutí čela taveniny. Plnění formy musí být postupné (laminární), nesmí docházet k volnému toku taveniny do dutiny formy (tzv. jettingu). Důležitým technologickým parametrem této fáze je **rychlost vstřikování**, resp. doba plnění, která je ovlivněna teplotou taveniny a teplotou formy. Obecně je vhodnější kombinace vyšší teploty taveniny a pomalejší rychlosti vstřikování kvůli snížení smykového namáhání toku taveniny a tím i eliminaci vzniku povrchových vad, jako jsou např. tokové čáry, vrásnění atd. Dalším technologickým parametrem je **vstřikovací tlak**, který musí být takový, aby bylo možné aplikovat požadovanou rychlost vstřikování. Kompletní naplnění dutiny formy, bez přetoků, případně nedostříknutých tvarů dílu taveninou, je závislé právě na kombinaci vstřikovacího tlaku a rychlosti vstřiku (je nutné, aby dutina formy byla objemově naplněna před působením dotlaku). Teplota taveniny a její viskozita, spolu s teplotou formy a tokovými odpory, mají vliv na orientaci makromolekul (důsledek smykového namáhání), zejména v povrchové vrstvě [1], [5]. Orientace makromolekul má za následek **anizotropii vlastností** výstřiku. Ve směru orientace makromolekul je oproti příčnému směru dosahováno **vyšší pevnosti a modulu pružnosti, nižší tažnosti i rázové houževnatosti**. Orientace makromolekul má za následek také vnitřní napětí výstřiku, které může způsobovat jeho deformaci tvaru po vyjmutí z formy, případně vznik vnitřních trhlin a selhání výrobku [6], [7].

d) Bod přepnutí

Ve skutečnosti tento bod přepnutí znamená změnu regulace průtoku tlaku taveniny, existují tři základní způsoby přepnutí:

- časové přepnutí – k přepnutí dojde po dosažení zvoleného času od začátku plnění dutiny formy
- dráhové přepnutí – k přepnutí dojde po dosažení zvoleného bodu na dráze pohybu šneku vpřed
- tlakové přepnutí – k přepnutí dojde po dosažení zvolené hodnoty tlaku buď v hydraulickém systému vstřikovacího stroje, v kanálu horkého rozvodu, nebo v dutině formy (co nejbliže ústí vtoku)

Nejlepší výsledky z hlediska jakosti výstříku vykazuje tlakové přepnutí a to zejména od tlaku v dutině formy. Tento způsob však vyžaduje přítomnost tlakového čidla v dutině formy. Časové přepnutí je technicky nejjednodušší, ovšem nejméně přesné. Nejčastějším způsobem přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak je v praxi dráhové přepnutí. Pokud dojde k pozdnímu přepnutí, tak může docházet ke vzniku přetoků, nárůstu hmotnosti výstříku, většímu vnitřnímu napětí výstříku, nežádoucí orientaci v okolí ústí vtoku (kvůli zpětnému toku taveniny) atd. V opačném případě (při předčasném přepnutí) dochází k nedostříknutým výstříkům, k nižší hmotnosti výstříku, k vzniku tokových čar, k větší viditelnosti studených spojů, k většímu smrštění, ke vzniku propadlin a staženin atd. Význam bodu přepnutí na průběh procesu a kvality výstříku je znázorněn na obr. 4. Z hlediska **mechanických vlastností** hraje důležitou roli pozdní bod přepnutí, který má za následek **větší vnitřní napětí** v oblasti ústí vtoku výstříku a způsobuje tak jeho **nižší pevnost výstříku a deformace** [1], [5].



Obr. 4 - Vliv bodu přepnutí na časový průběh tlaku v dutině formy [5]

e) Fáze dotlaku

Dotlak má největší vliv na rozměrovou a tvarovou přesnost výstřiku. Jeho úkolem je eliminovat smrštění (zmenšování objemu) materiálu, které je vyvoláno důsledkem chladnutí taveniny v dutině formy. Doba působení dotlaku je od několika sekund až po desítky sekund a časově se překrývá s fází chlazení. Je závislá především na průřezu vtokového kanálu a na teplotě formy. Působit dotlakem lze do doby, dokud je tavenina stále dodávána do dutiny formy, tedy do doby, než dojde k zatuhnutí vtoku. V praxi se však s dotlakovou fází končí o něco dříve, aby nedošlo k přetlačení taveniny v blízkosti vtoku, a tím k vzniku velkého vnitřního napětí ve výstřiku. Dotlak má vliv kromě tvarových a rozměrových změn výstřiku také na jeho hmotnost, anizotropii smrštění, na eliminaci propadlin, orientaci molekul, relaxační pochody, od kterých se odvíjí anizotropie vlastností výstřiku atd. V případě **nedostatečné velikosti dotlaku** mohou vznikat v místech nadměrné tloušťky stěny výstřiku **lunkry**, tyto útvary jsou skryté a značně snižují **pevnost dílů**. **Zvyšováním velikosti a doby dotlaku** se sice eliminuje tvorba těchto útvarů, ale s rostoucí hodnotou dotlaku roste i **vnitřní napětí** výstřiku. To se na jeho **mechanických vlastnostech** projevuje tak, že dochází k porušení materiálu při mnohem menším napětí, než je napětí kritické pro daný materiál. Najít správnou hodnotu dotlaku, která zajistí co nejmenší vnitřní napětí a zároveň odstraní skryté vady výstřiku při dostatečném naplnění dutiny formy je velice složité a v praxi se tato hodnota hledá formou experimentů. V kombinaci se špatnou konstrukcí vstřikovací formy a malou uzavírací silou, mohou působením dotlaku vznikat přetoky v dělicí rovině, větší nepřesnosti rozměrů atd. [1], [5].

f) Fáze plastifikace a chlazení

Úkolem plastifikace neboli dávkování taveniny, je zajištění potřebné dávky taveniny před čelem šneku. Zplastikování potřebné dávky plastu je docíleno pomocí tepla, které vzniká třením materiálu o stěny šneku při rotačním a současně zpětném pohybu, ale také mezi granulemi plastu. Teplo vzniklé třením je zároveň podporováno teplem od topných těles umístěných na tavící komoře plastifikační jednotky vstřikovacího stroje. Během fáze plastifikace je nutné dosáhnout požadované teploty taveniny a její homogenity z hlediska teploty a tlaku a dopravit ji před čelo šneku. Nedostatečně zhomogenizovaná tavenina ovlivňuje vzhled výstřiku, jeho barevný odstín, povrchový lesk, rozměrovou a tvarovou přesnost a také **mechanické vlastnosti**. Čím vyšší je

teplota taveniny, tím menší je **orientace makromolekul** a výstřik vykazuje vyšší izotropní vlastnosti. Dále klesá viskozita taveniny, **zvyšuje se pevnost studených spojů**, **snižuje se vnitřní napětí** výstřiku a zvyšuje se jeho výrobní smrštění, naopak dodatečné smrštění se snižuje a to především u částečně krystalických plastů. Množství připravené taveniny musí zajistit naplnění samotné dutiny formy (včetně vtokového systému) a eliminovat smrštění materiálu ve formě ve fázi dotlaku [1], [5].

Během fáze plastifikace probíhá zároveň **fáze chlazení** plastu v dutině formy. Tato fáze začíná prvním stykem taveniny se stěnou formy a pokračuje i během dotlakové fáze až do úplného ztuhnutí plastu a končí vyhozením výrobku z formy. Jedná se o nejdélší fázi celého vstřikovacího cyklu. Při vyhození výrobku z formy má výrobek stále vyšší teplotu, než je teplota okolí a výrobek dále chladne mimo dutinu formy až na teplotu okolí. Tento časový úsek se nazývá chlazení následované fází chlazení po dotlaku (viz obr. 3). Celkově je doba chlazení a chlazení po dotlaku závislá na tloušťce stěny výstřiku, druhu plastu, teplotě taveniny, teplotě formy a také na výrobním procesu. Z tohoto důvodu se její délka pohybuje od několika sekund až po několik minut. Rychlost ochlazování v intervalu nad teplotou skelného přechodu T_g (amorfní plasty) a nad teplotou tání T_m (semikrystalické plasty) ovlivňuje rozložení orientace makromolekul a vnitřní napětí výstřiku. Při ochlazování pod T_g a T_m vzniká především tepelné napětí a krystalická struktura výstřiku. Pokud bude **teplota formy vyšší** a tím bude delší doba ochlazování, je docíleno většího podílu krystalické fáze a větší velikosti sférolitů u semikrystalických plastů. To má za následek větší výrobní smrštění, naopak nižší dodatečné smrštění a vnitřní napětí výstřiku. V případě **mechanických vlastností** je u výstřiků dosaženo jejich **vyšší tuhosti a pevnosti**, ale **nižší tažnosti a houževnatosti**. U amorfních plastů má teplota formy značný vliv na povrchový lesk, který se zvyšuje s teplotou formy. Naopak u semikrystalických plastů se lesk nepatrně snižuje nebo nemění vůbec [1], [5].

g) Odjezd vstřikovací jednotky od formy

Jedná se o zpětný pohyb vstřikovací jednotky od formy. Dráha odjezdu by neměla být moc dlouhá, aby nedocházelo ke zbytečnému prodlužování výrobního cyklu. Při pozdějším času odjezdu vstřikovací jednotky od formy, lze lehce korigovat nechtěné vytékání taveniny z formy, ale zvyšuje se nebezpečí zamrzání trysky vstřikovací jednotky. Tento úsek nemá žádný důležitý vliv na výslednou jakost výrobku [1], [5].

h) Fáze otevírání formy

Stejně jako u fáze zavírání formy, i zde se tato fáze volí časově co nejkratší, zvyšují se rychlosti pohybů stroje a zkracují se dojezdové dráhy formy. Při dojezdu formy na doraz stroje se rychlost sníží, aby nedošlo k jeho poškození, případně k poškození formy nebo dílu. Minimální dráha otevření formy je daná velikostí, resp. hloubkou výrobku, případně přítomností manipulátoru [1], [5].

i) Vyhození / vyjmutí výstřiku z formy

Jedná se o poslední úsek, který uzavírá výrobní cyklus. Stejně jako v předešlém případě i zde je snahou, aby tento úsek byl co nejkratší. Po dostatečném otevření formy následuje vyhození výrobku pomocí vyhazovačů, případně manipulátoru. Celý proces vyhození musí být naprogramován tak, aby nedošlo k mechanickému poškození hotového výrobku. Po úspěšném vyhození výrobku následuje opět první fáze cyklu a to fáze zavírání [1], [5].

Vliv jednotlivých fází, případně úseků na výsledné mechanické vlastnosti výstřiku jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 - Vliv jednotlivých fází/úseků na mechanické vl. a vnitřní napětí výstřiku

| Úsek/fáze výrobního cyklu | Vliv na mech. vlast. výstřiku | Parametry ovlivňující vnitřní napětí výstřiku | Vnitřní napětí |
|----------------------------------|-------------------------------|---|----------------|
| a) Fáze zavírání formy | NE | ✘ | ✘ |
| b) Příjezd vstř. jednotky | ANO | ✘ | ✘ |
| c) Fáze vstřikování | ANO | ↑ T_T ↓ v_s | ↓ |
| d) Bod přepnutí | ANO | Pozdní přepnutí | ↑ |
| e) Fáze dotlaku | ANO | ↑ t_d ↑ p_d | ↑ |
| f) Fáze plastif. a Fáze chlazení | ANO | ↑ T_T ↑ t_{chl} | ↓ |
| g) Odjezd vstř. jednotky | NE | ✘ | ✘ |
| h) Fáze otevírání formy | NE | ✘ | ✘ |
| i) Vyhození/vyjmutí výstřiku | NE | ✘ | ✘ |

2.1.2 Požadavky na materiál pro technologii vstřikování

Materiál vhodný pro vstřikování musí být dostatečně tvárný a působením tepelné energie musí přejít ze stavu pevného (ve formě granulátu) do stavu kapalného - taveniny, z které se pak dále zpracovává. V současnosti existuje značné množství druhů plastů, které se zpracovávají vstřikováním, drtivá většina z nich (cca 80 %) tvoří termoplasty. Termoplasty jsou typickým zástupcem polymerních materiálů používaných pro vstřikování a to z hlediska ekonomického i ekologického, jelikož termoplasty je možné recyklovat. Existuje ale spousta dalších materiálů, které je možno více či méně zpracovávat vstřikováním. Jejich základní rozdělení je uvedeno v tab. 2 [8].

Tab. 2 - Rozdělení plastů pro vstřikování [5]

| POLYMERY | | | |
|-----------------|--------------|---------------------------|------------|
| Termoplasty | Reaktoplasty | Termoplastické Elastomery | Elastomery |
| Semikrystalické | Fenolické | S vysokou tvrdostí | NR |
| Amorfní | Melaminové | S nízkou tvrdostí | BR |
| | Epoxidové | | SBR |
| | Polyesterové | | EPDM |
| | a další | | a další |

TERMOPLASTY – mění tvar důsledkem působení tepla a smykových sil, po ochlazení je možné opět pomocí tepla je převést do taveniny

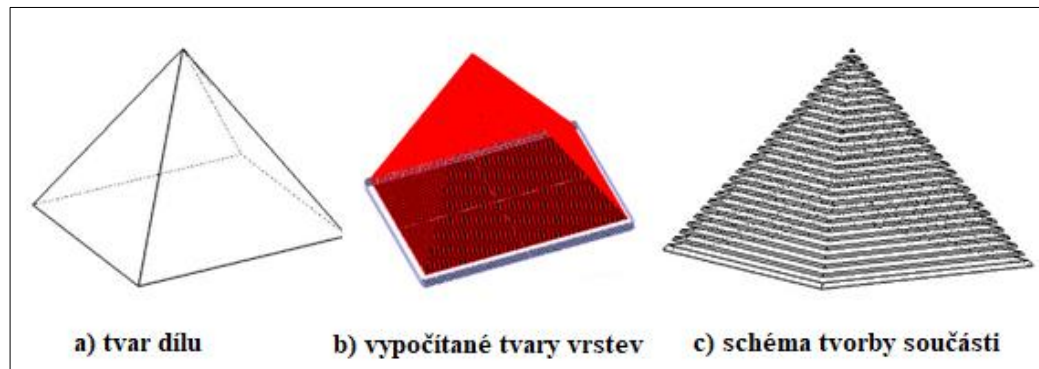
REAKTOPLASTY- mají pevně propojené řetězce vytvořené sesíťováním, tyto řetězce nelze dalším působením tepla rozpojit

TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY- obsahují elastické polymerní řetězce spojené polymerní maticí, spojení je pouze fyzikálního charakteru nikoliv chemického

ELASTOMERY- spojení řetězců je aktivováno teplem (vulkanizací), okolo spojů se řetězce mohou pohybovat a to umožňuje elastické chování těchto materiálů [5]

2.2 Aditivní technologie - 3D tisk (Rapid Prototyping)

Aditivní technologie jsou technologie, které umožňují vytvořit fyzický model (díl) na základě počítačových dat. Fyzický model vzniká postupným nanášením tenkých vrstev stavebního materiálu na sebe. Tloušťka vrstev je závislá na vybrané metodě 3D tisku a také na stavebním materiálu a použité 3D tiskárně, řádově se pohybuje od setin až po desetiny milimetrů (viz obr. 5) [9].



Obr. 5 – Tvorba fyzikálního modelu pro 3D tisk [17]

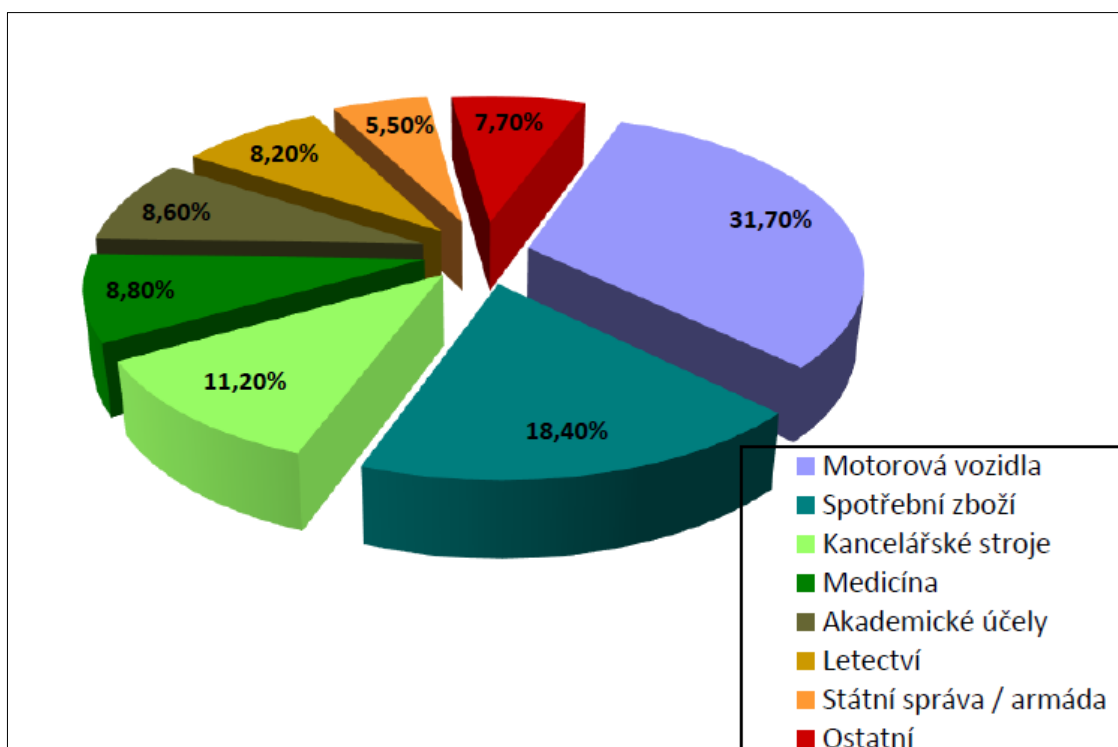
Podstatou 3D tisku je spojování vrstev materiálu např. tavením nebo lepením, čímž dojde k vytvoření konečného výrobku. Tvar výrobku je definován na základě CAD modelu, který je rozložen do tenkých vrstev a poskytuje 3D data (nejčastěji ve formátu stl) potřebná pro tisk. Tento způsob výroby je přesný opak technologie obrábění, při které je materiál postupně odebírán, což má za následek vznik odpadu a tím růst výrobních nákladů [9], [10].

Velikost dílů je ovlivněna především velikostí pracovního prostoru stroje a může se pohybovat v jednotkách metrů (domy či mosty) což je pro tuto technologii další významná výhoda [11]. Vlastnosti použitého stavebního materiálu určují výsledné použití fyzického modelu, je dobré s tím počítat už při samotném výběru metody 3D tisku [9].

Tím, že je materiál postupně přidáván na sebe, je možné rychle vyrobit náročné třírozměrné tvary a konstrukce dílů, které nelze vyrobit žádnou jinou technologií [10]. S každou složitou konstrukcí, je nutné pro její výrobu počítat s přítomností podpůrného materiálu (pouze u některých metod 3D tisku), který má několik funkcí. Podpůrný materiál funguje jako lešení, které podpírá funkční části modelu při jeho tisku. Jeho vedlejší funkce je cílený odvod tepla z izolovaných oblastí, které se ochlazují příliš pomalu. Výroba a následné odstranění podpor zpomaluje celý výrobní proces a

prodražuje výrobu. V případě metod, které neumožňují opakované použití podpůrného materiálu, vzniká i větší odpad. Z tohoto důvodu je vhodná efektivní eliminace podpor např. vhodnou orientací fyzického modelu v pracovním prostoru stroje, návrh samonosné konstrukce modelu, návrh podpory, která je součástí modelu a nenarušuje jeho funkci apod. Geometrie podpor může mít různé tvary, např. tenké sloupky, lineární, opěrné a stromové struktury ad. Vygenerování podpůrných prvků je možné pomocí CAD softwaru případně ručně [12]. 3D tisk je tak především používán v kusové, případně malosériové výrobě pro výrobu prototypů (proto se také nazývá Rapid Prototyping) [10].

Vzhledem k veliké flexibilitě této technologie se 3D tisk používá ve většině průmyslových odvětví, kde má různá využití (viz obr. 6). Největší zastoupení 3D tisku je v automobilovém průmyslu, zde se 3D tisk využívá především pro rychlou výrobu a ověření funkčnosti CAD modelu (prototypu), pro kontrolu jeho designu a případnou optimalizaci jeho návrhu [13]. Značné uplatnění 3D tisku je i ve spotřebním průmyslu v podobě různých hraček, dekorativních předmětů apod. Důležitým odvětvím pro využití 3D tisku je zdravotnictví, kde se tato technologie využívá např. pro výrobu podkladů pro tvorbu životně důležitých tkání, případně modelů orgánů, různých implantátů, kloubů atd. [14].



Obr. 6 - Procentuální využití 3D tisku v průmyslových aplikacích [15]

Další výhodou 3D tisku jsou nízké náklady na výrobu prototypu (jelikož nejsou potřeba další výrobní nástroje, jako je např. u technologie vstřikování forma), zvýšení efektivity výroby, přizpůsobení výrobků zákaznickým potřebám, velká přesnost výroby (v rozsahu 0,1 až 0,2 mm) atd. [9], [13]. Během samotné výroby 3D dílu jsou na pracovní prostor stroje kladeny minimální nároky atd. Jako každá technologie, i technologie 3D tisku, má své nevýhody např. vysokou pořizovací cenu stroje s příslušenstvím, vysoké provozní náklady spojené s dlouhým výrobním časem ad. [16]. Výhody a nevýhody jsou závislé na jednotlivých metodách 3D tisku a bude jim věnována větší pozornost v kapitole 2.2.1.

3D tisk je z historického hlediska poměrně mladá technologie. Její počátek je spojen s nástupem prvních počítačů, které umožnily vývoj stroje, který dokáže vytvořit 3D model objektu s minimálním zásahem člověka. Průkopníkem podoby dnešního 3D tisku je Charles Hull, který v roce 1984 zjistil, že pokud na tekutý polymer působí UV záření, dojde k jeho ztuhnutí a vznikne tenká pevná vrstva stavebního materiálu. Tuto technologii nechal patentovat pod názvem „Stereolitografie“ zkráceně SLA. Následně založil firmu 3D Systems, která začala vyrábět první 3D tiskárny které měly označení SLA-1 (viz obr. 7) [18].



Obr. 7 - První 3D tiskárna SLA-1 od firmy 3D Systems [19]

Tím byla odstartována éra 3D tisku, která zaujala významné místo na světovém trhu a od svého počátku až do současnosti prošla a stále prochází značným vývojem a expanduje do většiny průmyslových odvětví (viz obr. 6). Během vývoje 3D tisku vzniklo několik dalších moderních technologií, jako např. technologie FDM, SGC,

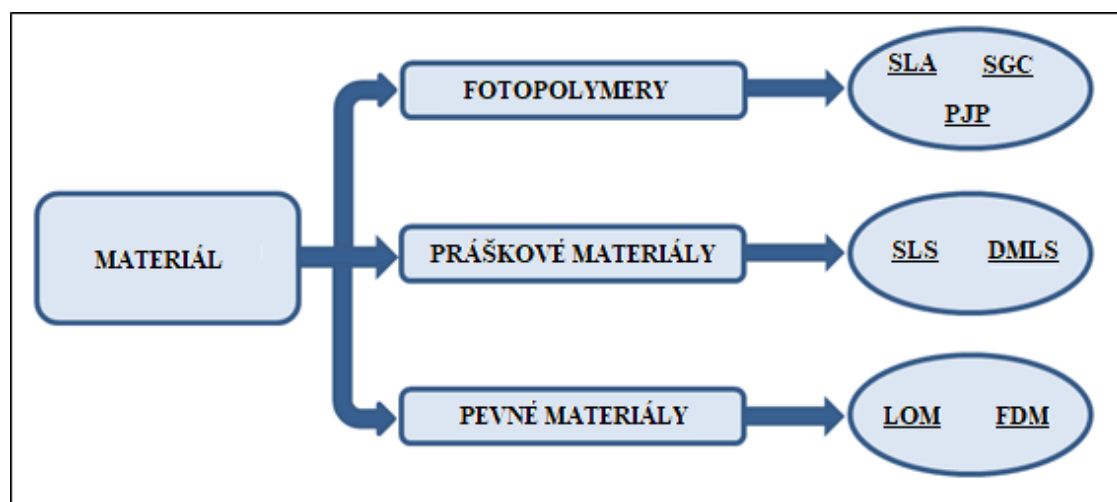
PolyJet, SLS atd. Většina technologií vychází ze zmíněné technologie SLA a každá má svoje výhody a nevýhody, které jsou podrobněji rozebrány v následujících kapitolách. Je velmi těžké předvídat další vývoj 3D tisku do budoucna, lze však očekávat, že se objeví další zařízení a technologie, které značně posílí důležitost 3D tisku na světovém trhu (viz tab. 3). V současné době je kladen důraz na snižování ceny levnějších kancelářských 3D tiskáren, které se tak pomalu, ale jistě stávají spotřebním zbožím [9], [18].

Tab. 3 – Tržní hodnota 3D výroby na světovém trhu [20]

| Rok | 2000 | 2010 | 2013 | 2018 (odhad) |
|---------|------|------|------|--------------|
| mld.eur | 0,5 | 1,0 | 2,2 | 4,5 |

2.2.1 Metody 3D tisku a jejich charakteristika

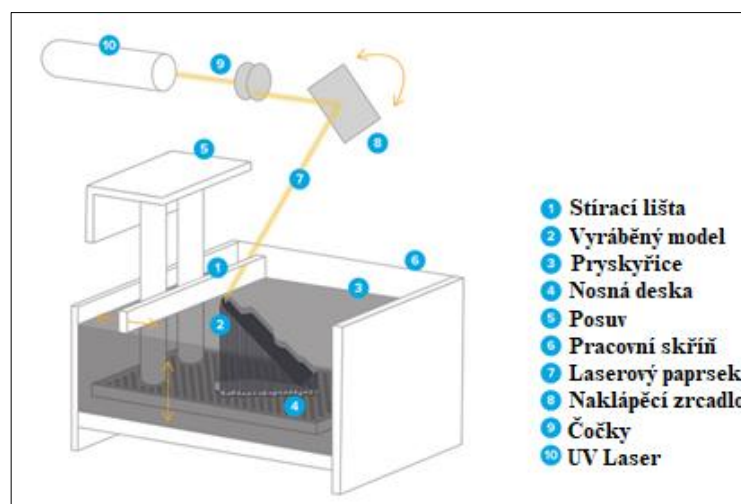
Každá metoda 3D tisku má své specifikace a požadavky. V této kapitole budou popsány základní principy a problematika nejpoužívanějších metod. Metodě FDM je s ohledem na její použití při praktické části diplomové práce věnována samostatná kapitola 2.2.2. Na úvod je uvedeno základní rozdělení vybraných metod podle charakteru používaného materiálu (viz obr. 8).



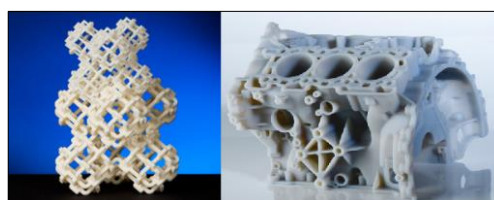
Obr. 8 - Základní rozdělení nejpoužívanějších metod 3D tisku

2.2.1.1 Metoda SLA – Stereolitografie (Stereolithography)

Stereolitografie je první a nejstarší metoda 3D tisku, jejím principem (viz obr. 9) je tvorba třírozměrného modelu pomocí UV laserového paprsku, který je přesně nasměrován pomocí optické soustavy na hladinu roztoku foto-polymerní pryskyřice. Pryskyřice je v místě ohniska laserového paprsku postupně vytvrzována do jednotlivých 2D vrstev, které jsou definované příslušným softwarem. Tloušťka těchto vrstev se pohybuje od 0,05 mm do 0,15 mm. O hodnotu tloušťky je po každém nanesení jedné vrstvy snížena nosná deska, aby se celý proces mohl opakovat. Tím dojde k ponoření už vyrobené vrstvy do pryskyřice a následuje tvorba další vrstvy. Ještě před začátkem nanesení další vrstvy zarovná stírací čepel (lišta) přebytečnou pryskyřici na požadovanou tloušťku. Při tvorbě složitějších modelů je potřeba vyráběný díl podpírat pomocí podpor. Po ukončení tisku se podpory manuálně odstraní a díl se následně povrchově upraví a opracuje v UV komoře. Do UV komory se součást dává z důvodu získání požadované kvality povrchu, případně barvy atd. **Výhodou** metody SLA je rychlost výroby, výroba přesných a složitých modelů (viz obr. 10), univerzálnost atd. Mezi **nevýhody** patří vysoká pořizovací cena, dokončovací vytvrzování modelu, malá tepelná odolnost modelu, omezený výběr materiálu atd. [9], [17], [18].



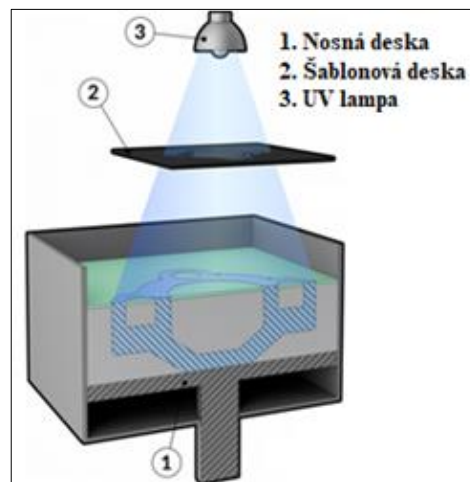
Obr. 9 - Princip Stereolitografie [20]



Obr. 10 - Ukázka výrobků zhotovených metodou SLA [21]

2.2.1.2 Metoda SGC – Solid Ground Curing

Metoda SGC je podobná metodě SLA. Rozdíl je v nasvícení celé tenké vrstvy fotopolymerní pryskyřice na nosné desce (viz obr. 11). Nad nosnou deskou je umístěná šablonová skleněná deska, na této desce je ionografickým procesem nanesen speciální toner (barva). Při samotném procesu vytvrzování je celý pracovní prostor osvětlen UV lampou. Úkolem šablonové desky je zabránit UV záření vytvrdit místa, která nepatří do výsledného modelu (z toho důvodu má šablonová deska negativní tvar aktuálně vyráběné vrstvy). Po vyjmutí šablonové desky je přebytečná nevytvrzená pryskyřice odstraněna, např. odsáváním a na její místo je nanesen roztavený výplňový vosk, který slouží jako podpora pro další vrstvu. Ještě před aplikováním další vrstvy je nutné povrch právě vytvořené vrstvy ofrémovat a zarovnat na požadovanou výšku vrstvy (0,10 až 0,50) mm. Voskové podpory se na konci procesu chemicky odstraní nejčastěji kyselinou citrónovou. Uvedená technologie s sebou přináší řadu výhod a nevýhod. **Výhoda** je možnost odfrézovat špatně vyrobené vrstvy, vytvořit celé vrstvy najednou atd. **Nevýhodou** je pak investice do výkonné UV lampy, omezený výběr materiálu, pomalá rychlost výrobního procesu ad. Ukázka dílů vyrobených metodou SGC je uvedena na obr. 12 [17], [25].



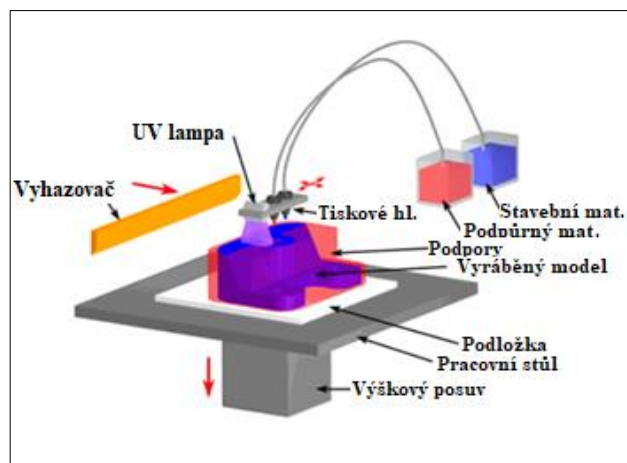
Obr. 11 - Princip metody SGC [25]



Obr. 12 - Ukázka výrobků zhotovených metodou SGC [26]

2.2.1.3 Metoda PJP – PolyJet Photopolymer

Metoda PolyJet používá pro tvorbu modelů také fotopolymery a svým principem vychází z inkoustových tiskáren (viz obr. 13). Zásadní rozdíl oproti metodám SLA a SGC je v tom, že kapky fotopolymeru jsou aplikovány přes tiskové hlavy přesně na definované místo určení ve vysokém rozlišení. Do tiskové hlavy se ze zásobníku dopravuje polymer, který se v tiskové hlavě taví a je dvojrozměrně pokládán na podložku. Podložka se pohybuje ve třetím směru a na ní dojde pomocí UV lampy k vytvrzení. Jedná se o velice přesnou metodu s vysokou kvalitou povrchu, tloušťka vrstev v tomto případě je od (0,016 do 0,030) mm. Velikou výhodou této metody je použití dvou různých materiálů a barev zároveň, většinou se používá jeden materiál stavební a druhý podpůrný. Podpůrný materiál může být rozpustný nebo se následně odstraní tlakovou vodou. V případě modifikované metody PJP Matrix je možné použít i více stavebních materiálů, různého typu nebo barev např. jeden měkký a druhý tvrdý apod. Mezi další **výhody** patří vysoká kvalita, přesnost a rychlost výroby, široký výběr materiálů, snadné odstranění podpůrného materiálu, není potřeba dodatečné vytvrzování atd. Naopak **nevýhodou** je nízká teplotní odolnost, křehkost dílů a jejich krátká životnost atd. Příklady výrobků zhotovených metodou PJP jsou uvedeny na obr. 14 [27], [28], [29].



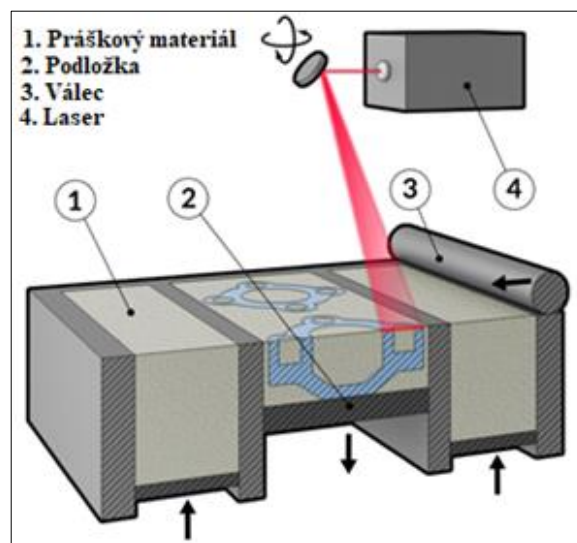
Obr. 13 - Princip metody PJP [30]



Obr. 14 - Ukázka výrobků zhotovených PJP[31,32]

2.2.1.4 Metoda SLS – Selective Laser Sintering

Princip metody SLS je podobný jako u metody SLA (viz obr. 15). Stavební materiál je však ve formě jemného prášku. Hlavní výhodou je, že není potřeba žádného dalšího podpůrného materiálu, protože tuto funkci zastává nespečený stavební materiál, který fixuje modelovaný díl v pracovním prostoru a může se opakovaně použít. Stavební materiál je dopraven ze zásobníku na podložku v tenké vrstvě a působením laseru dojde k jeho natavení a následnému spékání v požadovaném místě. Po ukončení tisku první vrstvy se podložka posune směrem dolů o hodnotu tloušťky další vrstvy (0,10 až 0,50) mm. Prášek potřebný pro tisk další vrstvy je nanesen válečkovým mechanismem a poté se celý proces opakuje. Prášek může být ve formě kovu, plastu, pryže, keramiky a speciálních písků. Po dokončení výroby modelu jsou nutné další dokončovací operace jako odstranění nespečeného materiálu, tryskání, obrábění, broušení, leštění dílu atd. **Výhodou** je možnost použití různých materiálů, absence podpor, nízké výrobní náklady, vysoká pevnost dílů ad. **Nevýhodná** je energetická náročnost procesu, vysoká cena zařízení, nemožnost tisku uzavřených dutin, nutnost dokončovacích operací, špatná kvalita povrchu dílu (viz obr. 16) atd. [9], [17], [33]



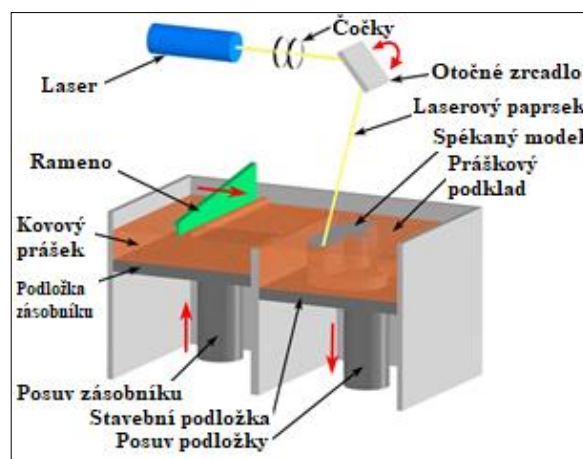
Obr. 15 - Princip metody SLS [34]



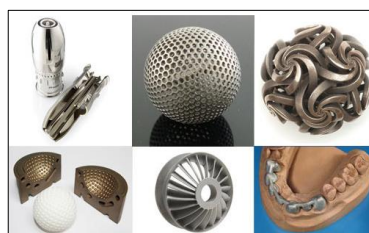
Obr. 16 - Ukázka výrobků zhotovených SLS [35], [36]

2.2.1.5 Metoda DMLS – Direct Metal Laser Sintering

Princip metody DMLS vychází z metody SLS (viz obr. 17). Metoda je především určena pro zpracovávání kovových prášků a různých slitin, např. na bázi bronz-nikl apod. Na ocelovou podložku se pomocí ramene s břítem rozmístí požadované množství kovového prášku pro tvorbu jedné vrstvy. Působením laseru do definovaného místa dojde v místě dopadu k lokálnímu protavení kovového prášku a potom následuje ztuhnutí roztaveného kovu. Z místa ohřevu se odvádí teplo přes ocelovou podložku pryč do okolí a tím kov ztuhne velmi rychle. Poté se podložka stejně jako u SLS posune dolů o požadovanou tloušťku další vrstvy (0,02 až 0,04) mm a celý proces se opakuje. Aby nedošlo k oxidaci, je celý pracovní prostor uzavřen v ochranné atmosféře dusíku. Metoda nevyžaduje při stavbě modelu podpurný materiál, jeho funkci zastává neroztavený kovový prášek. I zde jsou dokončovací operace nezbytnou součástí výrobního procesu (obrábění, broušení dílu atd.). Výrobky zhotovené pomocí metody DMLS mají složité tvary a dobrou pevnost i přesnost (viz obr. 18). Tato metoda se převážně používá pro opravu a rekonstrukci kovových forem a výrobu prototypů. Mezi **výhody** patří vysoká pevnost a přesnost dílu, rychlost výroby, nízký odpad, absence podpor atd. **Nevýhodami** jsou naopak nízká kvalita povrchu, prostorově a energeticky náročné zařízení ad. [17], [37], [38].



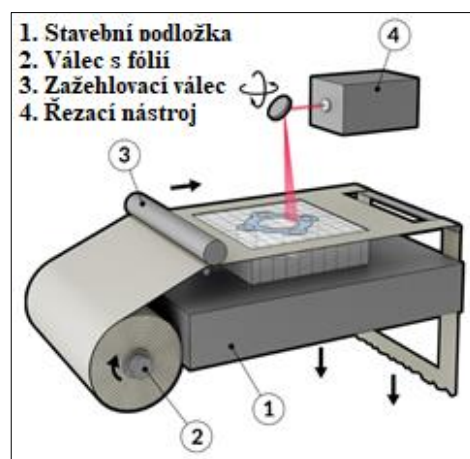
Obr. 17 - Princip metody DMLS [39]



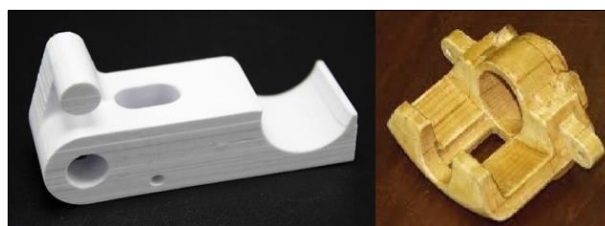
Obr. 18 - Ukázka výrobků zhotovených metodou DMLS [40]

2.2.1.6 Metoda LOM – Laminated Object Manufacturing

Technologie LOM je určena pro plošnou laminaci deskových materiálů, každá vrstva je vyřiznutá z plátu materiálu a je plošně přilepena k předchozí vrstvě (viz obr. 19). Vrstvy jsou tvořeny fólií, která má tloušťku v rozmezí od 0,01 do 0,20 mm. Každá fólie má na jedné straně příslušný nátěr pro přilepení k další vrstvě. Fólie je navinuta přes pracovní prostor a zažehlena válcem. Stavební materiál je zde zároveň i podpůrným materiálem. Samotné vyřezávání požadované kontury je pomocí řezacího nástroje, např. vyřezávacího nože nebo pomocí laserového paprsku. Po dokončení stavby modelu je nutné model oddělit z bloku materiálu, přebytečný materiál je rozřezán a skončí jako odpad bez možnosti dalšího použití. Veliká spotřeba materiálu je kompenzována jeho nízkou cenou, jelikož použitý stavební materiál může být např. PVC, papír atd. Tato metoda není vhodná pro tvorbu jemných konstrukčních modelů, jelikož by při závěrečné separaci mohlo dojít k jejich poškození. Vodorovné pokládání vrstev v pracovním prostoru způsobuje větší přesnost výroby ve vodorovném směru, než ve směru svislém. Metoda LOM s sebou přináší **výhody** jako je výběr materiálů a jeho nízká cena, rychlost výroby, výroba bez potřeby podpůrného materiálu atd. Přináší i **nevýhody** např. jednoduché modely s nízkou pevností (viz obr. 20), veliký odpad ad. [9], [17], [25].



Obr. 19 - Princip metody LOM [41]



Obr. 20 - Ukázka výrobků zhotovených metodou LOM [42]

2.2.2 Metoda FDM – Fused Deposition Modeling

Metoda FDM je v současné době jednou z nejpoužívanějších technologií 3D tisku pro tvorbu prostorových modelů [39]. Metoda je založena na velice jednoduchém principu, kdy ke spékání stavebního materiálu nedochází laserem, ale dochází k roztavení tenkého vlákna termoplastu, které je postupně nanášeno na podložku (fólii) umístěnou na vyhřívané základové desce. Tímto způsobem vznikají celkem složité a přesné modely s minimálním odpadem a tím i nízkými náklady na výrobu [9]. Zařízení vychází z tiskového plotru a také jeho cena je výrazně nižší, než je tomu u jiných metod. Díky těmto specifickým znakům se tato technologie rozšířila i mezi domácí uživatele a stala se tak nejrozšířenější metodou 3D tisku [18].

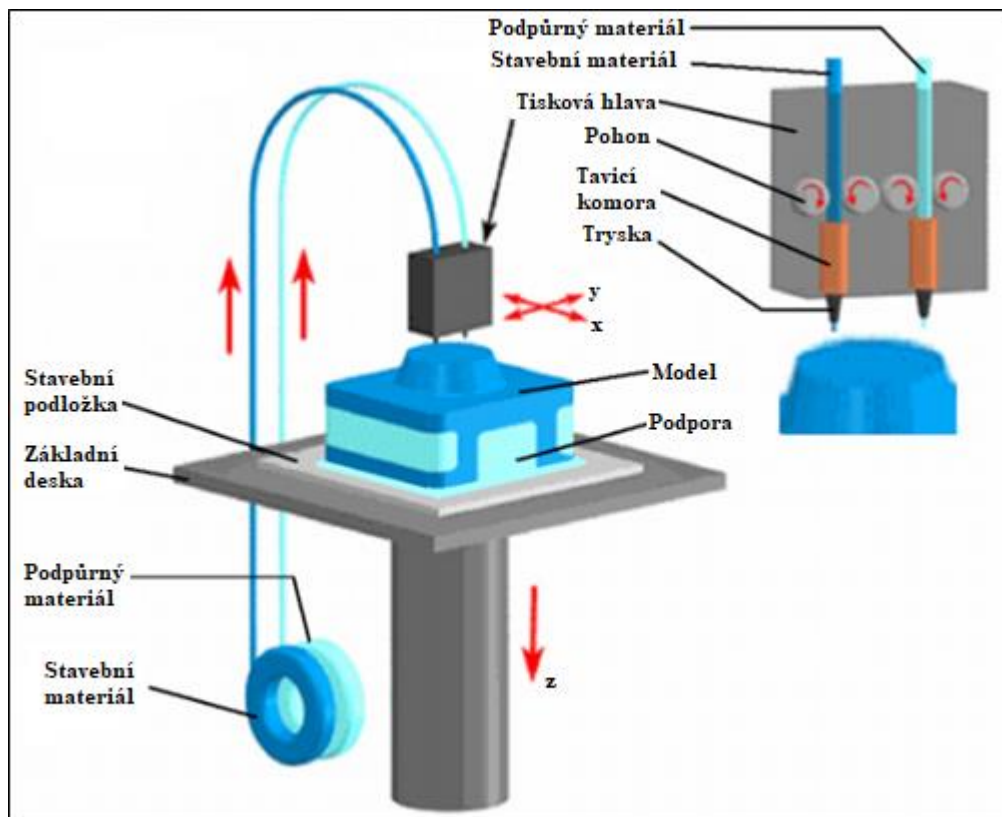
Tloušťka jednotlivých vrstev je závislá na použité 3D tiskárně a použitém stavebním materiálu, zpravidla se pohybuje od 0,05 do 0,33 mm [17]. Výsledné mechanické vlastnosti dílu jsou závislé na použité orientaci vláken, která u této metody může být různá. Jako u předcházejících metod, tak i u této metody je potřeba přítomnost podpůrného materiálu. Ten je jiný než stavební materiál, protože je zapotřebí, aby byl křehčí a bylo ho možné po dokončení tisku odstranit buď mechanicky, nebo chemicky rozpuštěním v lázni [24]. Vyrobene modely metodou FDM odolávají zpravidla teplotám až do 190 °C a svými vlastnostmi se blíží konečným produktům [9].

Počátek metody FDM je datován do roku 1988 a byla vyvinuta panem S. Scottem Crumpem, který o rok později založil firmu Stratasys, pod níž spadá ochranná známka této technologie [43]. Tuto technologii vymysleli manželé Crumpovy, aby pro svoji dceru vymodelovali hračku v podobě žáby, vytvořenou pomocí lepidla a směsi PE a vosku [44]. Od té doby společnost Stratasys tuto technologii stále vyvíjí a patří mezi přední výrobce FDM tiskáren.

Mezi důležité **výhody** této metody patří vysoká pevnost a přesnost dílů, které je možné vystavit vnějšímu zatížení. Další výhodou je minimální odpad, nižší pořizovací cena a dostupnost zařízení, levné a dostupné stavební materiály (např. PLA, ABS, PC, PC/ABS, PET, ASA atd.) a také jednoduchý princip. Proto se FDM využívá převážně pro tvorbu funkčních prototypů v oblasti designu, v sochařství, pro tvorbu přípravků atd. Do **nevýhod** je třeba zařadit závislost přesnosti výroby na použitém stavebním materiálu a průměru trysky, velmi dlouhý výrobní proces, který trvá i několik hodin a nelze ho nijak urychlit [9], [17], [45].

2.2.2.1 Podstata a princip metody FDM

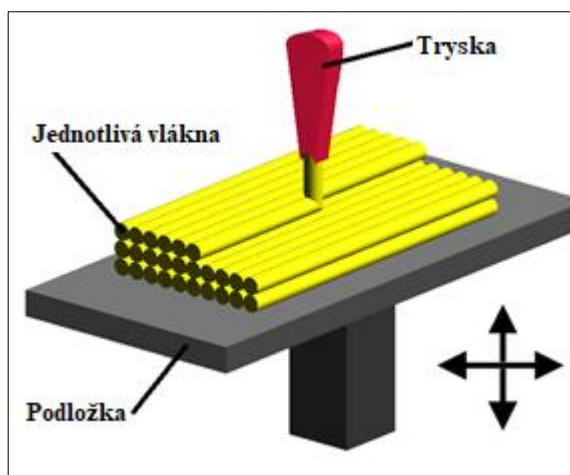
Stavební i podpůrný materiál je navinutý na cívkách ve formě drátu (nejčastěji o průměru drátu (1,75 – 3,00) mm a je postupně odvíjen pomocí kladek do tiskové hlavy [29]. V tiskové hlavě jsou oba materiály vedeny pod tlakem do vyhřívané trysky. Trysky jsou obvykle dvě, jedna pro stavební a druhá pro podpůrný materiál. Jejich ohřev na požadovanou teplotu (o 1 °C vyšší než je teplota tavení stavebního materiálu) je realizován pomocí elektrické cívky, aby se vstupující materiál přivedl do polotekutého stavu [46]. Tisková hlava se vzhledem ke své funkci také nazývá extrudér, který postupně nanáší jednotlivé vlákna materiálu na podložku ve dvou osách, Jakmile dokončí jednu vrstvu, tak se ve třetí ose posune extrudér nebo podložka o hodnotu tloušťky další vrstvy a celý proces se opakuje (viz obr. 21) [17], [18], [24].



Obr. 21 – Princip metody FDM [28]

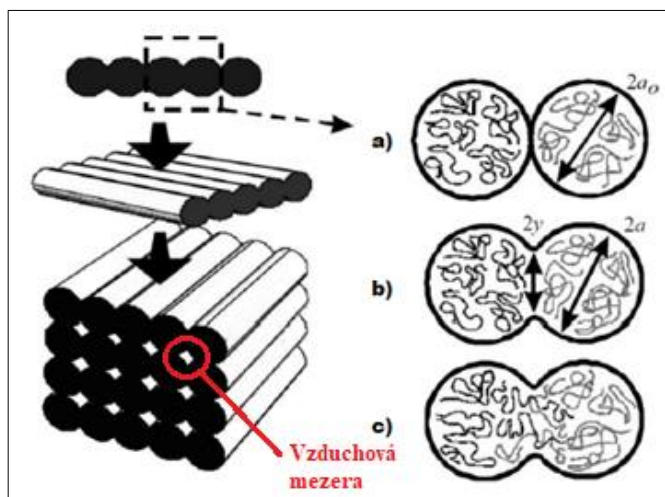
2.2.2.2 Vliv spojení jednotlivých vláken na výsledné vlastnosti modelu

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, výsledný model je tvořen spojováním jednotlivých vláken stavebního materiálu. Kvalita vytvořeného spojení vláken mezi sebou rozhoduje o mechanických vlastnostech tištěného dílu. Pro lepší pochopení nanášení a spojení vláken do jednotlivých vrstev je tento princip znázorněn na obr. 22.



Obr. 22 - Nanášení jednotlivých vláken při tisku metodou FDM [33]

Při tvorbě modelu je teplotě vystaveno pouze nanášené vlákno, tím se do celého modelu přináší méně tepla a to má pozitivní vliv na výslednou přesnost výrobku. Přivedené teplo je malé, ale dostačující pro vytvoření kvalitního spojení. Důležitou roli hraje také vzdálenost mezi nanášenými vlákny, která v kombinaci s teplem, rozhoduje o kvalitě výsledného spojení. Na základě toho jsou rozeznávány tři základní druhy spojení, které jsou znázorněny na obr. 23 [24], [47].



Obr. 23 - Základní druhy spojení vláken: a) povrchový kontakt, b) vznik krčku, c) molekulové difuzní spojení, $2a$ - $2x$ poloměr vlákna, $2y$ - šířka krčku [47]

V prvním případě (viz obr 23a) se vlákna nacházejí v těsném povrchovém kontaktu a pevnost spojení je minimální, to má za následek nízké mechanické vlastnosti výsledného modelu. Zde je velikost mezery nulová, protože při kladné hodnotě nedochází ke vzniku spojení a to má za následek úplný rozpad součásti při působení zatížení.

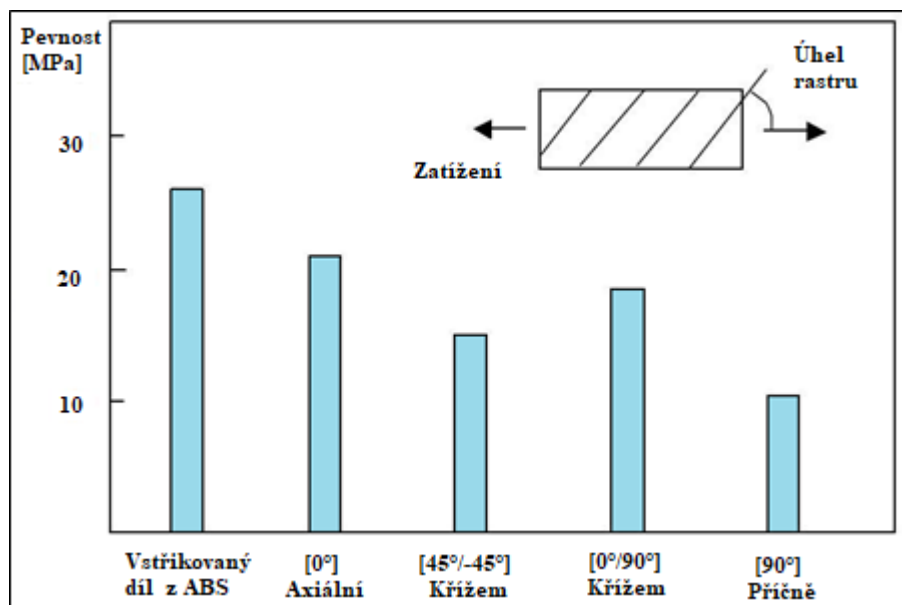
Další druh spojení vzniká při větším přiblížení vláken, kdy je velikost mezery záporná (**viz obr. 23b**). Zde dochází k vzájemnému překrytí a tvorbě krčku, tato situace může nastat buď vlivem gravitace, nebo nastavením dráhy tiskové hlavy. Důležitá je i teplota vlákna, která musí být v tomto případě menší, než teplota skelného přechodu stavebního materiálu, aby došlo k vytvoření krčku bez vzájemného promíchání molekul.

V posledním případě (**viz obr. 23c**) jsou vlákna v pevném spojení, protože jsou v dostatečném překrytí a zároveň je jejich teplota vyšší, než teplota skelného přechodu a tím dochází k molekulové difuzi, která má za následek vzájemné promíchání molekul z obou vláken a vznik kvalitního spojení, které vykazuje nejlepší mechanické vlastnosti dílu. Aby bylo možné tohoto spojení docílit, je důležitá teplota blízkého okolí a rychlost tisku, aby nedocházelo k velikému ochlazení vlákna pod teplotu skelného přechodu. Záporná mezera vláken by neměla překročit hodnotu 0,05 mm, poté by sice vzrůstala pevnost, ale zhoršovala by se přesnost a kvalita povrchu dílu.

Ze samotného principu této metody vychází i určitá míra nevyplnění v podobě **vzduchových mezer**, které negativně ovlivňují kvalitu výsledného spojení ve všech směrech. Jejich vznik je zapříčiněn i samotným oválným nebo kruhovým tvarem vlákna a také nevhodně zvolenou trajektorií tiskové hlavy.

Na mechanické vlastnosti má také vliv **orientace vláken** (rastr) vůči směru zatížení. Na obr. 24 jsou znázorněné mechanické vlastnosti dílu s různou orientací vláken, zhotoveného ze stejného materiálu v porovnání se vstříkovaným dílem.

Další možnou variantou nanášení vláken je tzv. „ofset“ při kterém kopírují nanášená vlákna vnější konturu dílu na rozdíl od rastru, kde jsou vlákna kladena v jednom směru bez ohledu na tvar modelu. Samotná šířka vlákna nemá vliv na výslednou pevnost modelu, ovlivňuje ale časovou náročnost celého procesu a výslednou kvalitu povrchu [24], [47], [48].



Obr. 24 - Porovnání mechanickým vlastností dílu z materiálu ABS s různou orientací vláken [24]

2.2.3 Požadavky na materiál pro technologii 3D tisk

Stejně jako v případě vstříkování i u technologie 3D tisku je důležité, aby použitý materiál byl schopen měnit své skupenství v závislosti na teplotě. Podle použité metody 3D tisku je možné těmito technologiemi zpracovávat značné množství materiálů: od termoplastů, přes kovové materiály, až po papírové nebo keramické materiály. V tab. 4, jsou uvedeny metody 3D tisku s běžným typem používaného stavebního materiálu [17], [18].

Tab. 4 - Tabulka používaných materiálů u jednotlivých metod 3D tisku [17], [24], [45]

| Metoda | Stavební materiál | Tloušťka [mm] |
|--------|--|---------------|
| SLA | Foto-polymerní pryskyřice | 0,05 - 0,15 |
| SGC | Foto-polymerní pryskyřice | 0,10 – 0,50 |
| PJP | Tekutý fotopolymer: VeroClear, PP atd. | 0,016 – 0,030 |
| SLS | Prášek: ABS, PET, kov, keramika atd. | 0,10 – 0,50 |
| DMLS | Kovový prášek: titan, bronz, ocel atd. | 0,02 - 0,04 |
| LOM | Fólie: papír, PA, PES, keramika atd. | 0,01 – 0,20 |
| FDM | Drát: ABS, PC, PC/ABS, PET, PLA atd. | 0,05 – 0,33 |

3 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce se zabývá porovnáním materiálových vlastností polymerních dílů zhotovených 3D tiskem a technologií vstřikování. Výsledné porovnání je rozděleno do několika dílčích kroků. Nejprve jsou hodnoceny mechanické vlastnosti u vzorků zhotovených metodou FDM v závislosti na geometrii stavby a orientace vrstev 3D dílu, následně mechanické vlastnosti výstřiku a také reziduální napjatost dílů pomocí tenzoaktivního prostředí. Experimentální část je uzavřena diskusí dosažených výsledků a závěrem.

3.1 Charakteristika polymerů

Pro experimentální studii vlastností plastových dílů zhotovených 3D tiskem a technologií vstřikování byly použity typické materiály od firmy Stratasys používané při tisku 3D dílu. Jedná se celkem o tři materiály, první materiál s obchodním označením ABS – M30 patří do skupiny amorfních polymerů na bázi terpolymeru akrylonitril – butadien - styren, druhý materiál s obchodním označením PC/ABS Stratasys je polymerní směs PC/ABS a třetím materiálem byl polymer ze skupiny vysoce výkonných (tzv. high – tech) polymerů na bázi polyeterimidu pro náročné aplikace s obchodním označením ULTEM 1010. Všechny tyto materiály je z hlediska viskozity možné použít jak pro 3D tisk metodou FDM, tak pro technologii vstřikování.

3.1.1 Materiály na bázi ABS

Materiály na bázi ABS jsou amorfní termoplastické kopolymery, které mají dobré mechanické vlastnosti, dobrou zpracovatelnost a nízkou pořizovací cenu. Z tohoto důvodu patří mezi nejpoužívanější materiály pro výrobní technologii FDM, jejichž hodnota smrštění se pohybuje v rozmezí od (0,3 do 0,7) %. Materiály ABS vykazují velmi dobrou odolnost proti korozi za napětí, dobrou tuhost, rázovou houževnatost, chemickou odolnost, nízkou navlhavost a zdravotní nezávadnost. Díly vyrobené z ABS lze snadno opracovávat dokončovacími operacemi, jako je broušení, lakování apod. Nejvíce se používají v automobilovém průmyslu, v elektrotechnice, na ochranné a bezpečnostní prostředky, plastové trubky, hračky pro děti atd. [49], [50]. Tyto materiály mají několik různých modifikací, které vykazují lepší nebo horší mechanické vlastnosti. Mezi základní polymery na bázi ABS (pro technologii FDM) od firmy

Stratasys patří materiály s obchodním označením ABS Plus, ABSi, ABS-M30, ABS-ESD7 ad.

Pro experimentální výzkum byl použit materiál **ABS-M30**, u něhož výrobce uvádí o (25 – 70) % větší pevnost v tahu a ohybu než u základního materiálu ABS (pro technologii FDM), který je vhodný pro výrobu funkčních prototypů, které se při mechanickém zatěžování více přibližují vstřikovaným dílům [40]. Použitelné barevné provedení může být bílé, černé, tmavě šedé, červené a modré. Přehled mechanických vlastností ABS-M30 je uveden v tab. 5 [51], [52].

Tab. 5 - Mechanické vlastnosti materiálu ABS - M30 [51]

| Pevnost v tahu [MPa] (ASTM D638) | Modul pružnosti v tahu [MPa] (ASTM D638) | Prodloužení při přetržení v tahu [%] (ASTM D638) | Pevnost v ohybu [MPa] (ASTM D790) | Modul pružnosti v ohybu [MPa] (ASTM D790) |
|----------------------------------|--|--|-----------------------------------|---|
| 28 - 32 | 2180 - 2230 | 2 - 7 | 48 - 60 | 1760 - 2060 |

3.1.2 Materiály na bázi PC/ABS

Polymerní směsi PC/ABS výhodně kombinují vlastnosti ABS a Polykarbonátu. Polykarbonát je termoplast, který se vyznačuje nízkou odolností proti korozi za napětí, vysokou pevností, tepelnou a rázovou odolností. Začíná měknout při teplotě kolem 140 °C (teplota skelného přechodu) a teplota viskózního toku je okolo 270 °C. Jedná se o navlhavý materiál, jehož zbytková vlhkost před zpracováním musí být zpravidla $\leq 0,04$ % (vlhkost může způsobit bubliny, degradaci taveniny a zhoršení mechanických vlastností dílů). Díly vyrobené z PC mají vysokou rozměrovou a tvarovou přesnost, lze je používat pro podobné aplikace jako díly z ABS. Jeden z rozdílů mezi ABS a PC je vyšší teplota zpracování PC a jeho nadměrné kroucení během 3D tisku, které se může eliminovat např. použitím lepidla na studené sklo. Kvůli vysoké teplotě zpracování a nadměrnému kroucení je jeho aplikace pro FDM tisk na hranici použití. Stejně jako v případě ABS, i u dílů z PC je možné aplikovat dokončovací operace v podobě broušení, lakování atd. Polymerní směs PC/ABS kombinuje tedy velmi dobrou zpracovatelnost a odolnost proti korozi za napětí materiálu ABS s vynikajícími mechanickými, tepelnými a rázovými vlastnostmi PC. Tento materiál se nejvíce používá v automobilovém, leteckém, elektrickém i lékařském průmyslu. Typické mechanické vlastnosti materiálu PC/ABS Stratasys (použitého v rámci experimentálního výzkumu) jsou uvedeny v tab. 6 [53], [54], [55].

Tab. 6 - Mechanické vlastnosti materiálu PC/ABS Stratasys [56]

| Pevnost v tahu [MPa] (ASTM D638) | Modul pružnosti v tahu [MPa] (ASTM D638) | Prodloužení při přetržení v tahu [%] (ASTM D638) | Pevnost v ohybu [MPa] (ASTM D790) | Modul pružnosti v ohybu [MPa] (ASTM D790) |
|----------------------------------|--|--|-----------------------------------|---|
| 41 | 1900 | 6 | 68 | 1900 |

3.1.3 Materiály na bázi PEI

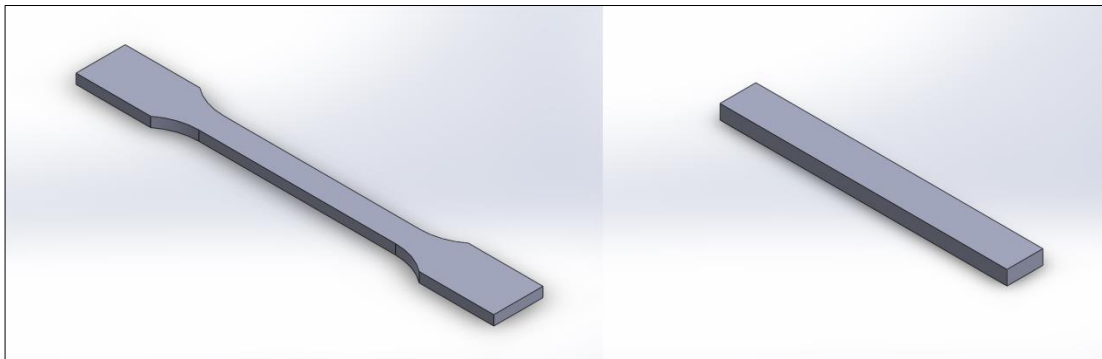
Materiály na bázi PEI jsou amorfni, vysoce výkonné polymery, které vykazují vysokou teplotní a chemickou odolnost, rozměrovou stálost při působení tepla, výjimečnou pevnost a modul pružnosti, velmi dobře odolávají krípu a hoření. Tyto vlastnosti je předurčují pro použití především v automobilovém, leteckém, lodním, kosmickém potravinářském i lékařském průmyslu. Krátkodobě vydrží tepelné namáhání až 200 °C, díky teplotě skleného přechodu, která je (190-230) °C. Při jejich zpracování 3D tiskem je nutné použít celokovový extrudér, který vydrží teplotu extruze více jak 300 °C. Vlastnosti PEI umožňují jejich použití i pro výrobu tvářecích nástrojů (forem) na výrobu kovových, plastových a kompozitních dílu. Firma Stratasys vyrábí PEI pro 3D tisk ve více variantách, v základní variantě ULTEM 1010, v biokompatibilní variantě ULTEM 1010CG, kterou lze použít v potravinářském průmyslu, a také ve variantě ULTEM 9085, která je jednou z nejlepších ve většině kategorií vysoce výkonných polymerů, vzhledem k výbornému poměru pevnost/hmotnost. Typické mechanické vlastnosti materiálu ULTEM 1010 jsou uvedeny v tab. 7 [57], [58], [59].

Tab. 7 - Mechanické vlastnosti materiálu ULTEM 1010 [59]

| Pevnost v tahu [MPa] (ASTM D638) | Modul pružnosti v tahu [MPa] (ASTM D638) | Prodloužení při přetržení v tahu [%] (ASTM D638) | Pevnost v ohybu [MPa] (ASTM D790) | Modul pružnosti v ohybu [MPa] (ASTM D790) |
|----------------------------------|--|--|-----------------------------------|---|
| 48 - 81 | 2200 - 2700 | 2 - 3,3 | 77 - 144 | 2230 - 2820 |

3.2 Výroba dílů technologií FDM

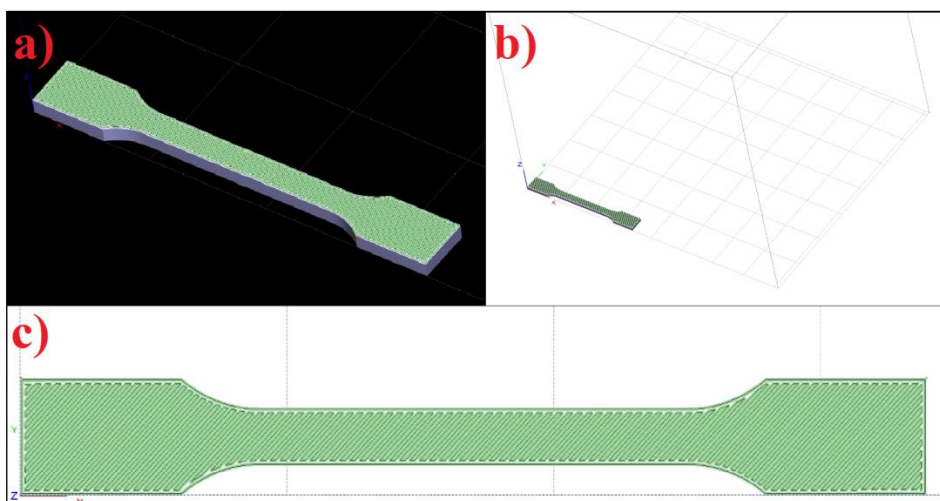
Před tiskem dílů bylo nutné provést nejprve přípravu jeho 3D modelu. Vzhledem k charakteru hodnocených vlastností dílů v rámci experimentální studie byly připraveny 3D modely ve tvaru zkušebního tělesa typu 1A dle ČSN EN ISO 527–2 a pravoúhlého hranolu obdélníkového průřezu dle ČSN EN ISO 179–1 a ČSN EN ISO 180. 3D model je numerický model vytvořený v počítačovém konstrukčním programu. Mezi konstrukční programy patří např. program NX, CATIA, SOLIDWORKS, AUTOCAD atd. Vytvořený 3D model by měl být uzavřený, nejlépe objemové těleso tzv. „Solid“. 3D model zkušebních těles (viz obr. 25) byl vytvořen pomocí CAD softwaru SOLIDWORKS 2015. Po vytvoření 3D modelu se CAD data exportovala do formátu STL pro další zpracování.



Obr. 25 – Ukázka modelů zkušebních těles v CAD softwaru Solidworks 2015

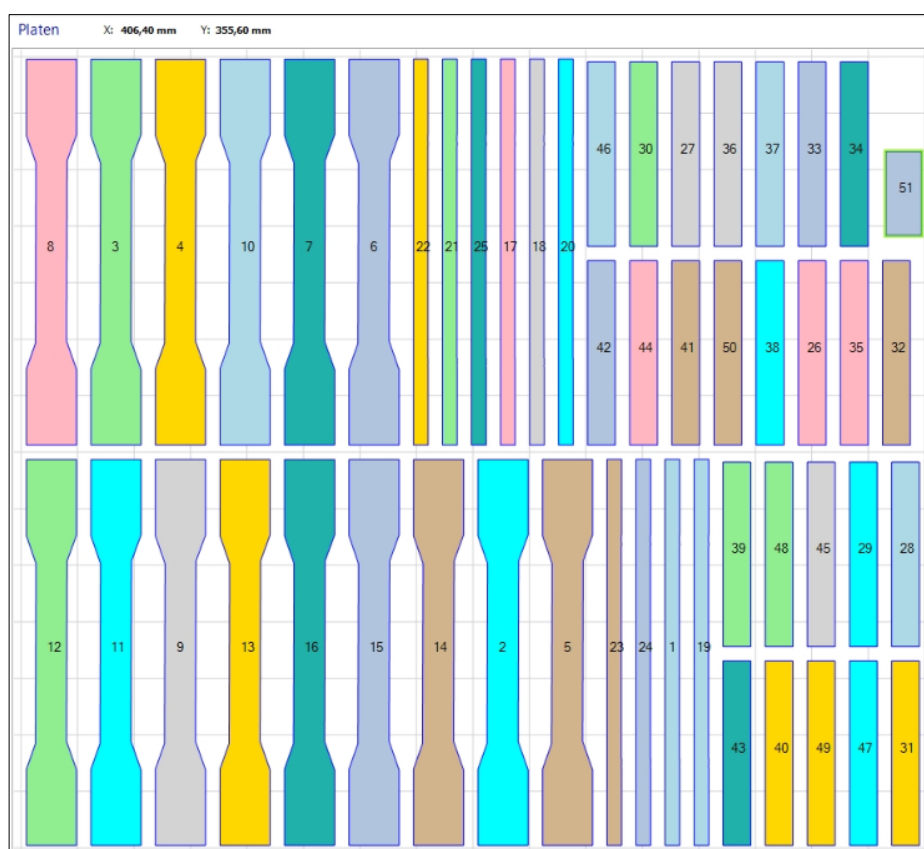
Soubor ve formátu STL je stereolitografický soubor, který je specifikován jako CAD soubor vyvinutý pro nejstarší technologii 3D tisku: stereolitografii (SLA) (viz kapitola 2.2.1.1). V tomto formátu jsou CAD data definována pomocí trojúhelníkové sítě pro jejich další úpravu apod. Data ve formátu STL jsou používána pro přímý tisk na všech 3D tiskárnách. [60]

K vytvoření vlastního programu pro tisk 3D dílu bylo nutné data nahrát do příslušného softwaru 3D tiskárny, v kterém se definovaly vstupní a výstupní parametry procesu. Definice těchto parametrů probíhala v programu INSIGHT, kde byl nastaven typ zařízení, typ stavebního a podpůrného materiálu, tloušťka vrstev, typ trysky atd. V uživatelském prostředí programu INSIGHT se také definovala orientace modelu v pracovním prostoru zařízení vůči základní desce a automaticky se generovaly jednotlivé vrstvy v definované tloušťce spolu s konstrukčními podporami pro tisk. Ukázka práce s modelem v uživatelském prostředí programu INSIGHT je na obr. 26.



Obr. 26 - Ukázka 3D modelu ve formátu STL v programu INSIGHT, a) 3D model zkušebního tělesa typu 1A, b) orientace 3D modelu v pracovním prostoru zařízení, c) detail vygenerované vrstvy 3D modelu

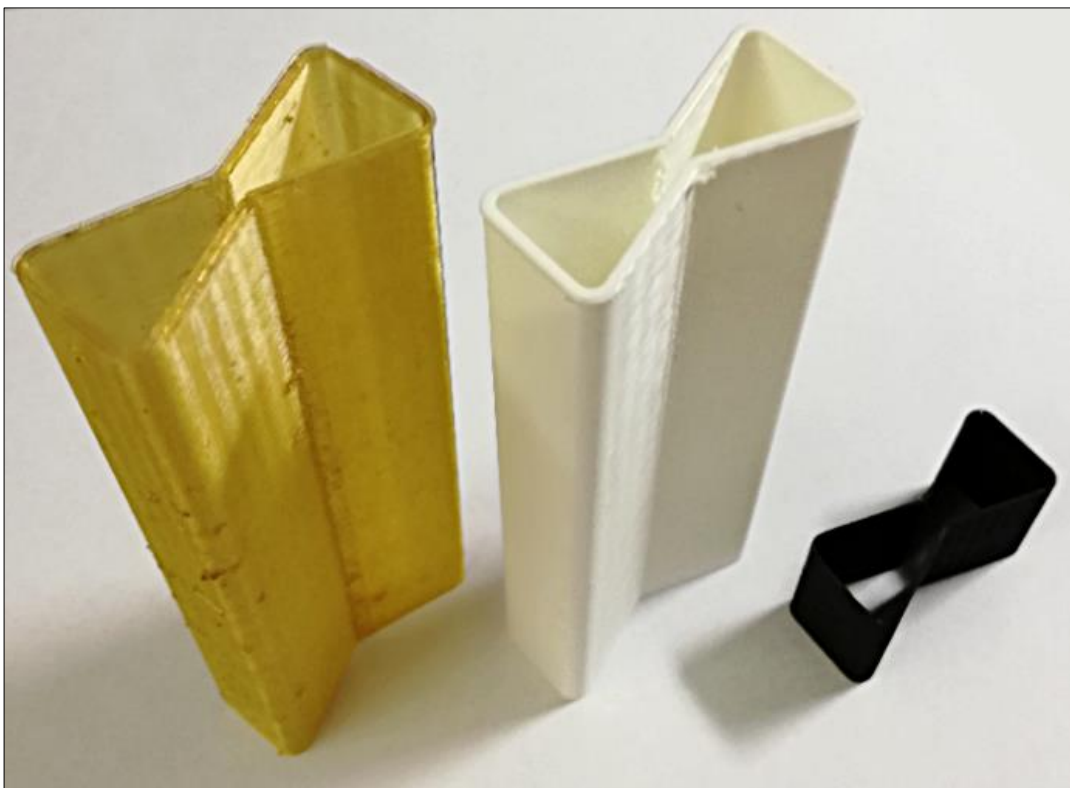
Po definici všech potřebných parametrů k výrobě požadovaného vzorku se tento vzorek zkopíroval na požadovaný počet kopií a tyto kopie se rozmístily po pracovním prostoru stroje, kde může být ten tentýž vzorek i různě orientován (viz příklad tělesa 6 a 22 na obr. 27).



Obr. 27 – Rozmístění vzorků v pracovním prostoru 3D tiskárny

Během stavění podpor při samotném tisku dílu je používána pouze tryska s podpurným materiálem. Stavební materiál je ve stavební trysce, kde je ohříván a dochází k jeho degradaci. Z tohoto důvodu je nutné jej před jeho použitím (při tvorbě modelu) odstranit, což se provádí stavbou tzv. „věže“ (viz obr. 28), která je tvořena během tisku z degradovaného stavebního materiálu (viz pozice č. 51 na obr. 27). Výstavba věže slouží pro pročištění stavební trysky zařízení, než se začne opět stavět vrstva požadovaného 3D dílu.

Po kontrole všech údajů a procesních parametrů a po rozmístění modelů na pracovní ploše byl celý program pro tisk odeslán do 3D tiskárny, ve které byla zahájena samotná výroba vzorků.



Obr. 28 - Ukázka věže z materiálu ULTEM 1010 (vlevo), ABS-M30 (uprostřed) a PC/ABS (vpravo)

3.2.1 Zařízení pro výrobu vzorků metodou FDM

Vzorky 3D dílů byly vyrobeny tiskárnou Fortus 450mc od firmy Stratasys (viz obr. 29). Tato tiskárna umožňuje tisknout funkční prototypy ve standartních tolerancích, je rychlejší než její předchůdci a je vybavena dotykovým displejem pro její lepší ovládání a údržbu. Velikost pracovního prostoru tohoto zařízení umožňuje postavit díly až do velikosti (406 x 355 x406) mm. Zařízení má k dispozici dvě tiskové

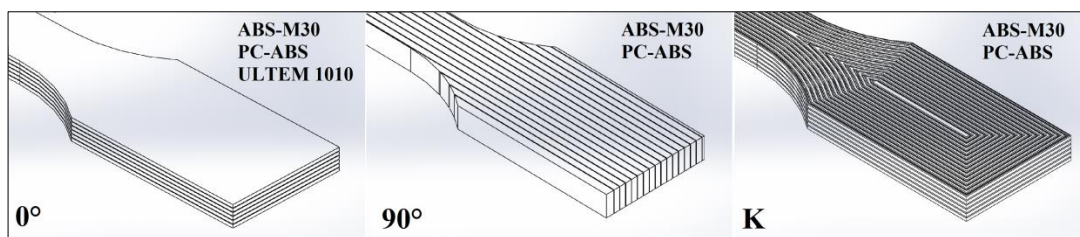
hlavy, jedna je pro stavební materiál a druhá pro podpůrný materiál. Toto zařízení umožňuje výrobu dílu z 13 různých materiálů jako je např. ABS – M30, ASA, PA 12, PC, PC/ABS, PEI s obchodním označením ULTEM 1010 atd. [61].



Obr. 29 - 3D tiskárna Fortus 450mc

3.2.2 Výrobní proces 3D dílů

Před samotným tiskem byla nutná kalibrace tiskárny, která spočívala v tisku zkušebního kalibračního čtverce na podložku neboli fólii (materiál fólie se liší podle použitého materiálu). Tento obrazec se opticky kontroluje a měří se tloušťka jeho podpor. Po změření se hodnoty zadají do zařízení a tím se provede kalibrace pro daný materiál. Tuto kalibraci je nutné udělat při každé změně materiálu nebo trysky. Pro experimentální část diplomové práce byly zhotoveny od každého materiálu dvě šarže vzorků, vždy s minimální a maximální možnou tloušťkou vrstvy pro daný materiál a s orientací vrstev vůči základové desce 0° (orientace na plocho). V případě materiálu ABS – M30 a PC/ABS byly zhotoveny ke každé tloušťce vrstvy ještě dvě šarže navíc s orientací vrstev 90° (orientace na výšku) a koncentrickým uspořádáním vrstev (K). Použitá geometrie a orientace vrstev vzorků jsou znázorněny na obr. 30.



Obr. 30 – Orientace/geometrie vláken na plocho (0°), na výšku (90°), koncentricky (K)

V případě materiálu ULTEM 1010 se šarže s různou orientací vrstev nevyráběly kvůli značné finanční náročnosti. U materiálu ULTEM 1010 bylo cílem zhodnotit pouze mechanické vlastnosti dílu v závislosti na tloušťce vrstev a jejich porovnání se vstříkovanými díly, zatímco u materiálu ABS – M30 a PC/ABS byl hodnocen také vliv geometrie a orientace vrstev dílu vůči základní desce zařízení Pro přehlednost jsou jednotlivé šarže od každého materiálu uvedeny v tab. 8. V této tabulce jsou uvedeny také použité technologické parametry spolu s maximálními hodnotami teplot trysky a komory (základové desky) doporučené výrobcem. Uveden je zde i výrobní čas jedné dávky, který je závislý na geometrii, tloušťce vrstvy, počtu tisknutých těles a jejich orientaci vůči základové desce.

Tab. 8 - Přehled technologických parametrů jednotlivých šarží materiálů

| Materiál | ABS-M30 | | PC/ABS | | ULTEM 1010 | |
|--|-----------|----------|-----------|----------|------------|-------|
| Teplota komory [°C] (při tisku / max.) | 90 / 95 | | 95 / 110 | | 195 / 225 | |
| Teplota trysky [°C] (při tisku / max.) | 315 / 320 | | 325 / 330 | | 405 / 410 | |
| Tloušťka vrstvy [mm] | 0,127 | 0,330 | 0,127 | 0,330 | 0,254 | 0,330 |
| Výrobní čas dávky [min] | 2236 | 426 | 2201 | 385 | 612 | 445 |
| Objem materiálu na jednu dávku [cm ³] | 331 | 345 | 332 | 345 | 330 | 346 |
| Orientace [°] / Geometrie [-] | 0, 90, K | 0, 90, K | 0, 90, K | 0, 90, K | 0 | 0 |

Jedna dávka se obvykle skládala z 25 těles typu 1A a 25 těles (ve tvaru pravoúhlého hranolu) dle ISO 527, ISO 179 – 1, ISO 180. Tělesa se po ukončení tisku vyjmula z pracovního prostoru tiskárny na podložce (viz obr. 31), každé těleso se následně jednoduchým odloupením odstranilo z podložky. Stejně tak se mechanicky odstranil i podpůrný materiál, který na vyrobeném tělese zůstal. Ukázka zkušební tělesa s podpůrným materiálem je na obr. 32. Celkově bylo pomocí FDM tiskárny vytisknuto 350 vzorků, z toho bylo 210 vzorků typu 1 a 140 vzorků typu 1A (viz tab. 9).



Obr. 31 – Vytisknutá tělesa z materiálu ABS - M30 před vyjmutím z pracovního prostoru tiskárny



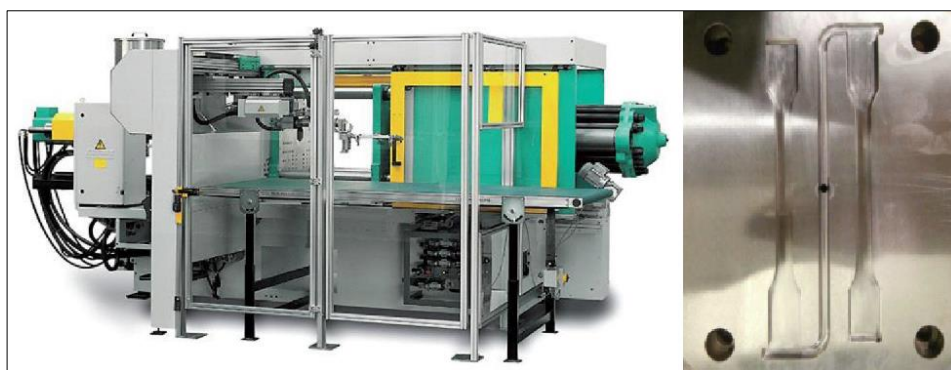
Obr. 32 - Zkušební těleso z materiálu PC/ABS s podpůrným materiálem

Tab. 9 - Celkový počet vyrobených vzorků metodou FDM

| Materiál | Těleso typu 1 | Těleso typu 1A |
|-----------------|----------------------|-----------------------|
| ABS-M30 | 90 | 60 |
| PC/ABS | 90 | 60 |
| ULTEM 1010 | 30 | 20 |
| Celkem | 210 | 140 |

3.3 Výroba dílů technologií vstřikování

Pro výrobu vzorků vstřikováním, bylo nutné nejprve připravit dostatečné množství granulátu z filamentů materiálů ABS-M30, PC/ABS a ULTEM 1010, které byly použity pro 3D tisk. Z připraveného granulátu byly následně vstřikovány víceúčelová zkušební tělesa typu 1A dle ČSN EN ISO 527-2, z nichž byly mechanickým obráběním zhotoveny také tělesa typu 1 dle ČSN EN ISO 179 – 1 a ČSN EN ISO 180. Zkušební tělesa byla vstřikována způsobem odpovídající předpisu ČSN EN ISO 294-1 za podmínek specifikovaných v předmětové normě ČSN EN ISO 2580-2 (v případě ABS) a standardních materiálových listech PC/ABS a PEI (viz tab. 11.) Pro vstřikování vzorků byl použit hydraulický vstřikovací stroj sloupové konstrukce Arburg 270S 400-100 (viz obr. 33), který disponuje maximální uzavírací silou 400kN, průměrem šneku 25 mm a univerzální dvoudeskovou vstřikovací formou pro výrobu víceúčelových zkušebních těles, která je zobrazena na obr. 33. Před hodnocením mechanických vlastností materiálů byly všechny vzorky kondicionovány při standardních podmínkách 23/50, minimálně po dobu 24 hodin dle ČSN EN ISO 291. Celkem bylo pro experiment vyrobeno 105 vstřikovaných zkušebních těles typu 1A (viz tab. 10).



Obr. 33 - Vstřikovací stroj Arburg 270S 400-100 (vlevo), Univerzální dvoudesková vstřikovací forma (vpravo) [62]

Tab. 10 - Celkový počet vyrobených vzorků technologií vstřikování

| Materiál | Těleso typu 1A |
|---------------|----------------|
| ABS-M30 | 35 |
| PC/ABS | 35 |
| ULTEM 1010 | 35 |
| Celkem | 105 |

Tab. 11 - Technologické parametry vstřikování

| Materiál | ABS-M30 | PC/ABS | ULTEM 1010 (PEI) |
|--|---------|--------|---------------------|
| Teplota taveniny [°C] | 250 | 270 | 350 |
| Teplota formy [°C] | 60 | 60 | 95 |
| Vstřikovací rychlost [cm ³ /s] | 35 | 35 | 35 |
| Velikost dotlaku [bar] | 450 | 520 | 420 |
| Doba dotlaku [s] | 40 | 40 | 40 |
| Zpětný tlak [bar] | 20 | 20 | 30 |
| Čas cyklu [s] | 60 | 60 | 60 |

3.4 Studium mechanických vlastností dílů

Výsledné mechanické vlastnosti dílů jsou ovlivněny několika faktory. V případě vstřikovaných vzorků jsou jejich užité vlastnosti závislé nejen na materiálu, ale také na technologických parametrech výrobního procesu, které mohou negativně či pozitivně ovlivnit jakost budoucího výstřiku. U metody FDM jsou vlastnosti vzorků (kromě materiálu a procesních parametrů) ovlivněny navíc geometrií, orientací a tloušťkou vrstvy. Předmětem experimentální části diplomové práce bylo najít takový způsob výroby vzorků metodou FDM, který se svými mechanickými vlastnostmi nejvíce přiblíží vstřikovaným dílům, nebo je dokonce překoná. Studium mechanických vlastností dílů bylo provedeno v souladu s mezinárodními předpisy ČSN EN ISO.

3.4.1 Stanovení tahových vlastností

Pro stanovení tahových vlastností zkušebních těles byla tělesa namáhána tahovou silou. Při namáhání se stanovila mez pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu a jmenovité poměrné prodloužení při přetržení. Zkouška probíhala při standardním prostředí 23/50 dle ČSN EN ISO 291 na zkušebních tělesech typu 1A definovaných normou ČSN EN ISO 527 – 2. Zkušební tělesa z použitých materiálů byla při hodnocení meze pevnosti a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení zatěžována konstantní rychlostí 50 mm/min ve směru své hlavní osy až do okamžiku porušení. Při průběhu zkoušky se zaznamenávaly hodnoty zatěžující síly (resp. napětí) a velikost protažení (resp. jmenovitého poměrného prodloužení). Pro každou šarži materiálu bylo hodnoceno min. deset vzorků. Zkušební vzorek byl upevněn v čelistech trhacího zařízení TiraTest 2300 (viz obr. 34) tak, aby jeho podélná osa byla v sousostí s osou trhacího zařízení a nedošlo k jeho uvolnění v průběhu testu.

Modul pružnosti v tahu se stanovil dle rovnice (1.1) při konstantní rychlosti zatěžování 1 mm/min pomocí průtahoměru Epsilon (model 3542 – 010 M – 025 – ST) viz obr. 34. Průměrné hodnoty tahových vlastností hodnocených vzorků včetně směrodatných odchylek jsou uvedeny v tab. 12 a v tab. 13.

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \cdot 100 \quad (1.1)$$

Kde je:

E_t modul pružnosti v tahu [MPa]

σ_1 napětí v tahu při poměrném prodloužení $\varepsilon_1 = 0,05$ % [MPa]

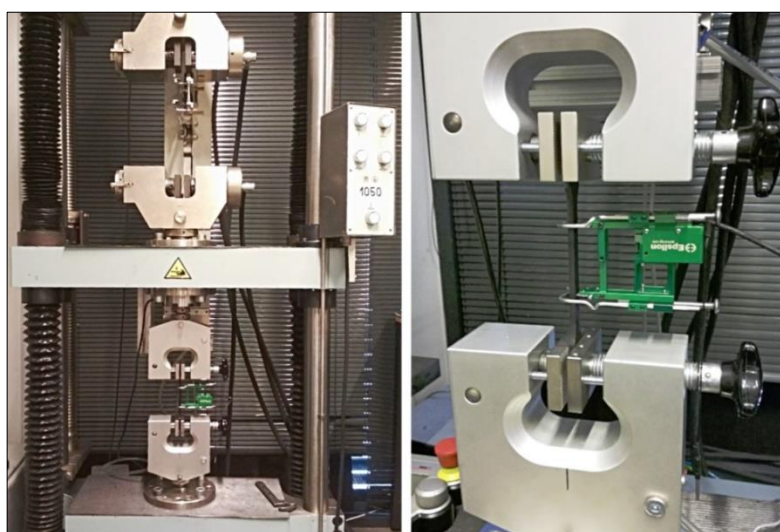
σ_2 napětí v tahu při poměrném prodloužení $\varepsilon_2 = 0,25$ % [MPa]

Tab. 12 - Tahové vlastnosti dílů (z ABS – M30 a PC/ABS)

| Materiál | | ABS-M30 | | | PC/ABS | | |
|-------------|----------------|------------------|-------------|---------------------|------------------|-------------|---------------------|
| Šarže | | σ_m [MPa] | E_t [MPa] | ϵ_{tb} [%] | σ_m [MPa] | E_t [MPa] | ϵ_{tb} [%] |
| FDM | 0,127 (0°) | 31,9 ± 0,2 | 2142 ± 26 | 6,0 ± 0,9 | 32,1 ± 0,4 | 1668 ± 13 | 4,1 ± 0,3 |
| | 0,127 (90°) | 34,4 ± 0,4 | 2174 ± 47 | 8,4 ± 0,5 | 38,0 ± 0,2 | 1880 ± 14 | 17,6 ± 4,9 |
| | 0,127 (K) | 58,2 ± 0,1 | 2252 ± 61 | 4,6 ± 1,1 | 24,9 ± 1,3 | 1934 ± 120 | 9,3 ± 3,5 |
| | 0,330 (0°) | 31,5 ± 1,0 | 2160 ± 52 | 8,8 ± 0,9 | 35,6 ± 0,3 | 1824 ± 23 | 5,7 ± 0,3 |
| | 0,330 (90°) | 30,4 ± 0,2 | 2126 ± 30 | 9,9 ± 0,5 | 34,1 ± 0,1 | 1683 ± 19 | 9,5 ± 1,6 |
| | 0,330 (K) | 34,7 ± 0,3 | 2232 ± 44 | 2,6 ± 0,9 | 42,6 ± 0,1 | 1844 ± 22 | 4,3 ± 0,5 |
| Vstřikování | | 42,1 ± 0,2 | 2482 ± 51 | 29,7 ± 3,3 | 46,4 ± 0,2 | 2118 ± 47 | 13,4 ± 3,6 |

Tab. 13 - Tahové vlastnosti dílů z materiálu ULTEM 1010

| Materiál | | ULTEM 1010 | | |
|-------------|---------------|------------------|-------------|---------------------|
| Šarže | | σ_m [MPa] | E_t [MPa] | ϵ_{tb} [%] |
| FDM | 0,254 (0°) | 82,0 ± 0,6 | 2732 ± 58 | 4,2 ± 0,1 |
| | 0,330 (0°) | 78,2 ± 1,4 | 2604 ± 60 | 5,6 ± 0,4 |
| Vstřikování | | 114,7 ± 0,4 | 3403 ± 100 | 35,6 ± 18,3 |



Obr. 34 - Trhací zařízení TiraTest 2300, vpravo zařízení TiraTest 2300 s použitím průtahoměru Epsilon

3.4.2 Stanovení ohybových vlastností

Stanovení ohybových vlastností bylo provedeno za podmínek a zásad, které jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 178 (metoda tříbodového ohybu). Při této zkoušce bylo zkušební těleso obdélníkového průřezu o rozměrech (80 x 10 x 4) mm vloženo na podpěry zkušebního zařízení HOUNSFIELD H10KT (viz obr. 35) a uprostřed rozpětí podpěr zatěžováno trnem s konstantní rychlostí 2 mm/min do předepsaného průhybu za mezí pevnosti v ohybu. V průběhu zkoušky byla měřena síla působící na zkušební těleso a výsledný průhyb zkušebního tělesa uprostřed mezi podpěrami. Z naměřených dat byla stanovena pevnost v ohybu a dle rovnice (1.2) vypočítán modul pružnosti v ohybu. Pro každou šarži materiálu bylo hodnoceno min. pět vzorků. Zkušební tělesa z výstřiků byla obrobena mechanicky ze střední části standardního víceúčelového zkušebního tělesa. Průměrné hodnoty ohybových vlastností hodnocených vzorků včetně směrodatných odchylek jsou uvedeny v tab. 14 a v tab.15.

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \cdot 100 \quad (1.2)$$

Kde je:

E_f modul pružnosti v ohybu [MPa]

σ_{f1} napětí v ohybu při deformaci $\varepsilon_{f1} = 0,05$ % [MPa]

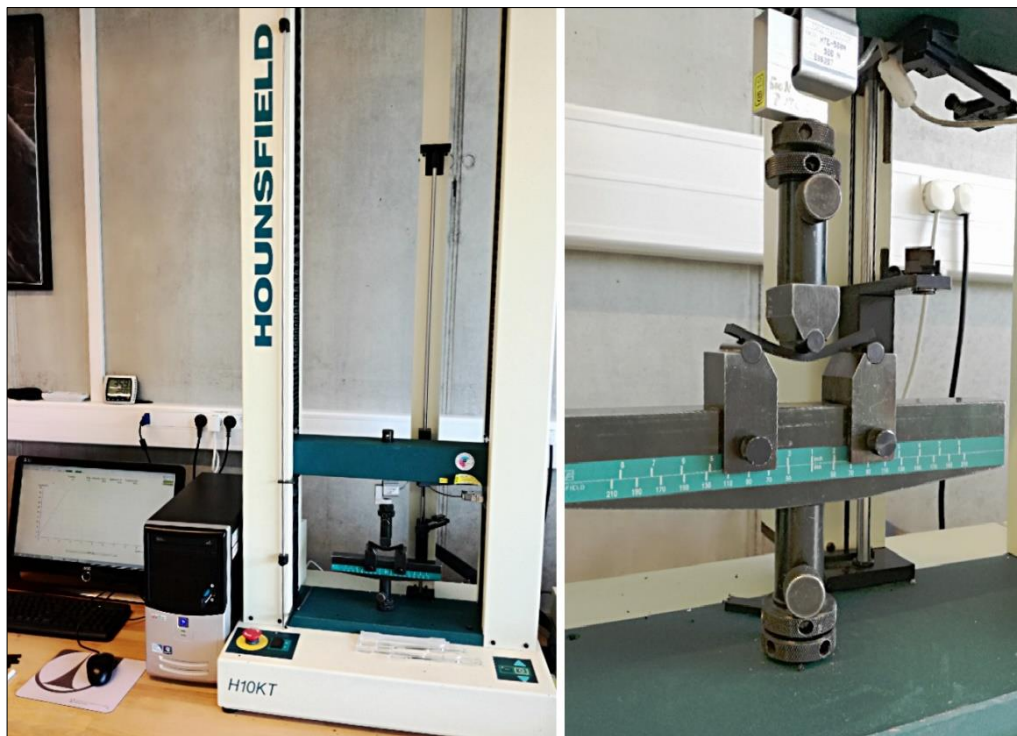
σ_{f2} napětí v ohybu při deformaci $\varepsilon_{f2} = 0,25$ % [MPa]

Tab. 14 - Ohybové vlastnosti dílů (z ABS – M30 a PC/ABS)

| Materiál | | ABS-M30 | | PC/ABS | |
|-------------|-------------|----------------------------|-------------|----------------------------|-------------|
| Šarže | | σ_{TM} [MPa] | E_f [MPa] | σ_{TM} [MPa] | E_f [MPa] |
| FDM | 0,127 (0°) | 57,6 ± 0,7 | 1923 ± 80 | 52,3 ± 0,5 | 1412 ± 44 |
| | 0,127 (90°) | 57,9 ± 0,6 | 1868 ± 47 | 65,3 ± 0,7 | 1687 ± 77 |
| | 0,127 (K) | 59,9 ± 0,2 | 1959 ± 16 | 63,9 ± 1,0 | 1542 ± 54 |
| | 0,330 (0°) | 50,9 ± 0,4 | 1714 ± 16 | 57,8 ± 0,8 | 1558 ± 62 |
| | 0,330 (90°) | 53,3 ± 0,2 | 1926 ± 31 | 59,8 ± 0,5 | 1483 ± 118 |
| | 0,330 (K) | 57,2 ± 0,3 | 1952 ± 64 | 69,1 ± 0,2 | 1748 ± 27 |
| Vstřikování | | 66,4 ± 0,7 | 2196 ± 19 | 70,6 ± 1,2 | 1880 ± 36 |

Tab. 15 - Ohybové vlastnosti dílů z materiálu ULTEM 1010

| Materiál | | ULTEM 1010 | |
|-------------|------------|----------------------------|-------------|
| Šarže | | σ_{TM} [MPa] | E_f [MPa] |
| FDM | 0,254 (0°) | 120,1 ± 3,5 | 2387 ± 40 |
| | 0,330 (0°) | 104,3 ± 2,9 | 2144 ± 71 |
| Vstřikování | | 158,7 ± 0,8 | 3044 ± 63 |



Obr. 35 - Zkušební zařízení HOUNSFIELD H10KT, vpravo detail na pracovní prostor

3.4.3 Stanovení rázové houževnatosti

Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy bylo provedeno za definovaných podmínek normou ČSN EN ISO 179 – 1. Zkušební těleso obdélníkového průřezu o rozměrech (80 x 10 x 4) mm bylo umístěno ve vodorovné poloze na podpěry zkušebního zařízení Ceast Resil 5.5 (viz obr. 36), případně Zwick/Roell HIT50P. Následně bylo přeraženo pomocí rázového kladiva za předem stanovených podmínek metodou ČSN EN ISO 179 – 1/1eU. Ráz kladiva byl veden na užší stranu zkušebního tělesa a zaznamenávala se spotřebovaná energie potřebná k jeho přeražení, z níž se následně pomocí vztahu (1.3) stanovila rázová houževnatost.

Před samotným začátkem zkoušení rázové houževnatosti bylo nutné nastavit rozpětí podpěr (64 mm) a kalibrovat přístroj. Kalibrace spočívala ve spuštění rázového kladiva na prázdno, aby bylo možné stanovit ztráty způsobené třením mechanismu. Během experimentu byly použity kladiva s nominální energií 2 J a 5 J (u zařízení Ceast Resil 5.5), resp 50 J (u zařízení Zwick/Roell HIT50P), dle zkoušené šarže. Pro každou šarži materiálu bylo použito 10 vzorků. Zaznamenány byly různé typy přeražení dle zkoušené šarže. Výsledné průměrné hodnoty rázové houževnatosti včetně směrodatných odchylek jsou uvedeny v tab. 16 a tab. 17.

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 1000 \quad (1.3)$$

Kde je:

- a_{cU} rázová houževnatost Charpy vzorku [kJ/m²]
- E_c korigované energie spotřebovaná při přeražení vzorku [J]
- h tloušťka vzorku [mm]
- b šířka vzorku [mm]

Tab. 16 - Rázová houževnatost dílů z ABS – M30 a PC/ABS

| Materiál | | ABS-M30 | PC/ABS |
|-------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Šarže | | a_{cU} [kJ/m ²] | a_{cU} [kJ/m ²] |
| FDM | 0,127 (0°) | 22,4 ± 2,2 | 38,6 ± 3,6 |
| | 0,127 (90°) | 20,6 ± 2,0 | 44,6 ± 2,5 |
| | 0,127 (K) | 51,0 ± 6,9 | 104,0 ± 12,4 |
| | 0,330 (0°) | 17,4 ± 1,3 | 30,2 ± 2,2 |
| | 0,330 (90°) | 28,6 ± 3,9 | 57,9 ± 3,7 |
| | 0,330 (K) | 42,8 ± 8,7 | 197,4 ± 40,6 (50J) |
| Vstřikování | | 90,4 ± 20,7 | 196,6 ± 25,1 (50J) |

Tab. 17 - Rázová houževnatost dílů z ULTEM 1010

| Materiál | | ULTEM 1010 |
|-------------|------------|-------------------------------|
| Šarže | | a_{cU} [kJ/m ²] |
| FDM | 0,254 (0°) | 28,2 ± 6,9 |
| | 0,330 (0°) | 21,8 ± 1,7 |
| Vstřikování | | 158,0 ± 29,2 (50J) |



Obr. 36 - Zkušební zařízení Ceast Resil 5.5 [62]

3.4.4 Studium reziduálního napětí

Vstřikování polymerních materiálů je vždy doprovázeno vznikem reziduálního (zbytkového) vnitřního napětí, které má několik forem. Jeho vzniku nelze zabránit, ale výrobní proces je možné řídit tak, aby nepříznivý vliv vnitřního napětí na vlastnosti výstřiku byl co nejmenší. Pokud je výstřik namáhán vnějším zatížením, sčítá se toto zatížení s vnitřním napětím. Následkem toho může dojít k selhání výrobku při podstatně menším vnějším namáhání, než by se očekávalo.

Vnitřní napětí se vyskytuje v několika formách, z nichž každá vzniká z různých důvodů. První formou vnitřního napětí je tzv. **orientační napětí**, které je důsledkem orientace makromolekul polymeru. Orientací se do molekul vnáší napětí, která mají snahu vrátit napřímené a natažené molekuly do původního tvaru (odpovídajícímu maximální entropii systému). Příčinou tohoto napětí je zejména samovolná deformace výstřiku při zvýšené teplotě. Další formou vnitřního napětí výstřiku je tzv. **tepelné napětí**. Je způsobeno teplotním gradientem, který je součástí každého ochlazování (termoplasty) nebo ohřívání (reaktoplasty) materiálu. Průběh teplotního gradientu závisí na rozdílu teplot taveniny a formy a také na tloušťce stěny výstřiku. S rostoucím rozdílem těchto teplot roste i teplotní gradient a důsledkem toho je nerovnoměrné ochlazování a nerovnoměrné smršťování jednotlivých vrstev výstřiku. Čím více je chladnutí výstřiku nerovnoměrné, tím větší jsou tepelná napětí. Mezi další formy vnitřního napětí patří tzv. **expanzní napětí**. Jedná se o specifický jev při zpracování termoplastů, jehož příčinou je stlačitelnost tavenin polymeru. Expanzní napětí vzniká tehdy, pokud dojde vlivem příliš vysokého vstřikovacího tlaku k přehuštění dutiny formy taveninou plastu, a když se výstřik v okamžiku otevírání formy nachází ještě pod tlakem. Vnitřní vrstvy výstřiku nejsou ještě zcela tuhé a mají snahu se rozpínat, čemuž brání už ztuhlé vrstvy na povrchu. Výsledkem jsou tahová napětí na povrchu a tlaková napětí v jádru stěny výstřiku. Jinou formou vnitřního napětí je tzv. **krystalizační napětí**, které se vyskytuje u krystalických termoplastů. Jeho příčinou je krystalizace v jednotlivých vrstvách výstřiku při rozdílných podmínkách, které souvisí s rozdílnou rychlostí ochlazování. Vzniklé sférolity jsou největší ve středních vrstvách a směrem k povrchu se jejich velikost zmenšuje (stejně tak i smrštění), což způsobuje nehomogenitu nadmolekulární struktury, která je příčinou vnitřního napětí. Vnitřní napětí může být i ve formě tzv. **deformačního napětí**, které je do výstřiku vneseno při vyhazování výstřiku z formy. V době, kdy je výstřik z formy vyhazován, nemusí být

ještě dostatečně tuhý a navíc výstřík lne více či méně k povrchu líce formy, takže vyhazovací kolíky výstřík deformují (obvykle ohybem). Pokud je deformace elastická, tak vymizí, pokud však vznikne deformace plastická, zůstane výstřík trvale deformován. Velikost deformačního napětí závisí na tuhosti výstříku v okamžiku jeho vyhazování z formy, tj. na teplotě, na jeho přilnavosti k formě a na konstrukci vyhazovacího systému. Na výsledný napěťový stav výstříku má nejdůležitější vliv **orientační a tepelné napětí**.

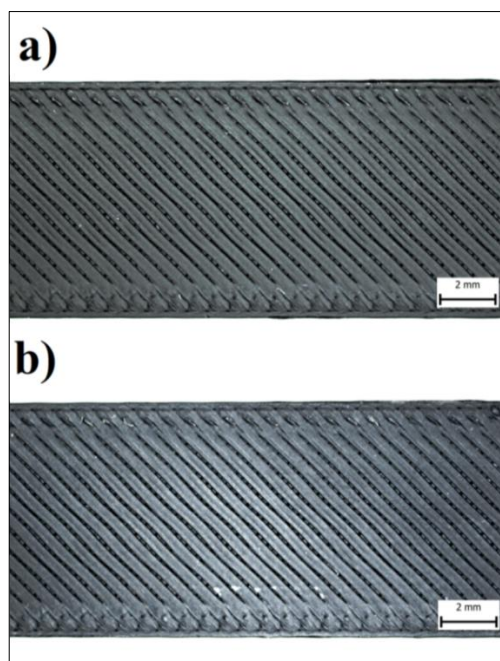
Objektivní stanovení velikosti vnitřních napětí ve výstříku jsou značně problematická, stejně tak i metody jejich **hodnocení**. Metoda by měla být dostatečně přesná, reprodukovatelná, rychlá a technicky dostupná. Tyto požadavky však žádná nespĺňuje. Proto se v praxi používají **nepřímé metody**, které hodnotí chování výstříku za podmínek zkoušky v závislosti na jejich vnitřním stavu. Pro analýzu vnitřního napětí výstříku existuje několik nepřímých metod, např. metody, které jsou založeny na **samovolné deformaci** výstříku při jeho zahřívání. Měří se buď velikost deformace, nebo síla, která se ve zkušebním tělese uvolní. Tyto metody hodnotí především orientační napětí. Podobně je tomu u metody, která využívá **změny indexu lomu světla**, které prochází zkušebním tělesem. Pozorování se provádí v polarizovaném světle. Tato metoda je použitelná pouze u průhledných polymerů a poskytuje pouze kvalitativní výsledky. U krystalických polymerů byla navržena a vyzkoušena také **rentgenografická metoda**, která se osvědčila spíše u kovových materiálů, jelikož u polymerů nejsou výsledky přesvědčivé v důsledku nedokonalosti jejich krystalické mřížky. Nejvíce rozšířenou metodou je tzv. **zkouška v tenzoaktivním prostředí** (obvykle v chemické kapalině), které je schopné urychlit vznik napěťových trhlin na povrchu výrobku. Čím větší vnitřní napětí výstřík obsahuje, tím dříve a výrazně se trhliny objeví. Účinek tenzoaktivní látky je pro určitý druh plastu zcela specifický. [63], [64], [65]. Vzhledem k rozšířenosti této metody byla tato metoda použita pro hodnocení vnitřního napětí v experimentální studii diplomové práce. Od každého materiálu byly pro zkoušku použity tři vzorky vyrobené technologií vstřikování i metodou FDM. Pro materiály ABS – M30 a PC/ABS byl výběr tenzoaktivní látky (kyseliny octové 99 %), času expozice a teploty prostředí (viz tab. 18) proveden na základě konzultace s pracovníky společnosti Funchem s.r.o. Uvedené tenzoaktivní prostředí je v souladu s koncernovými předpisy VW. V případě materiálu ULTEM 1010 nebyla bohužel nalezena vhodná tenzoaktivní látka, která by urychlila vznik

napětových trhlin (materiály na bázi PEI odolávají chemikáliím a korozi za napětí). Z tohoto důvodu se u tohoto materiálu nepodařilo analyzovat míru velikosti vnitřního napětí.

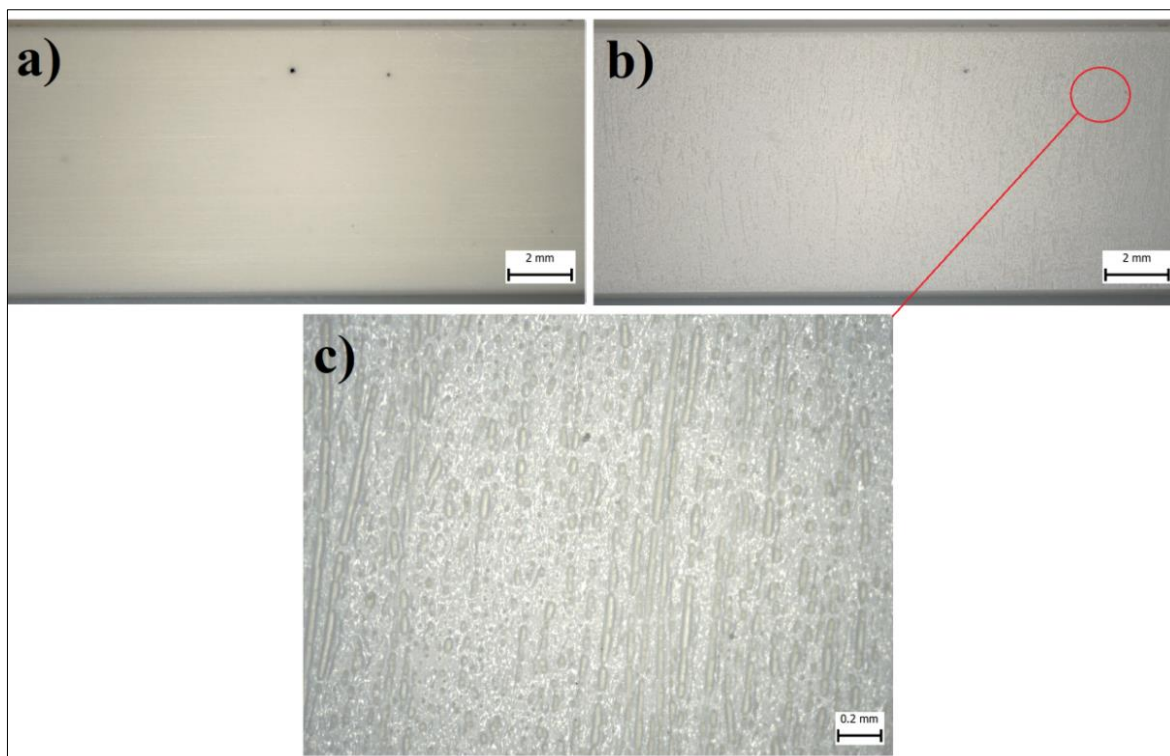
Tab. 18 - Zvolené parametry pro expozici v tenzoaktivním prostředí

| Materiál | Tenzoaktivní látka | Teplota prostředí | Čas působení | Uvolnění napětí |
|-----------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|------------------------|
| ABS | CH ₃ COOH | 35 °C | 60 s | ANO |
| PC/ABS | CH ₃ COOH | 35 °C | 120 s | ANO |

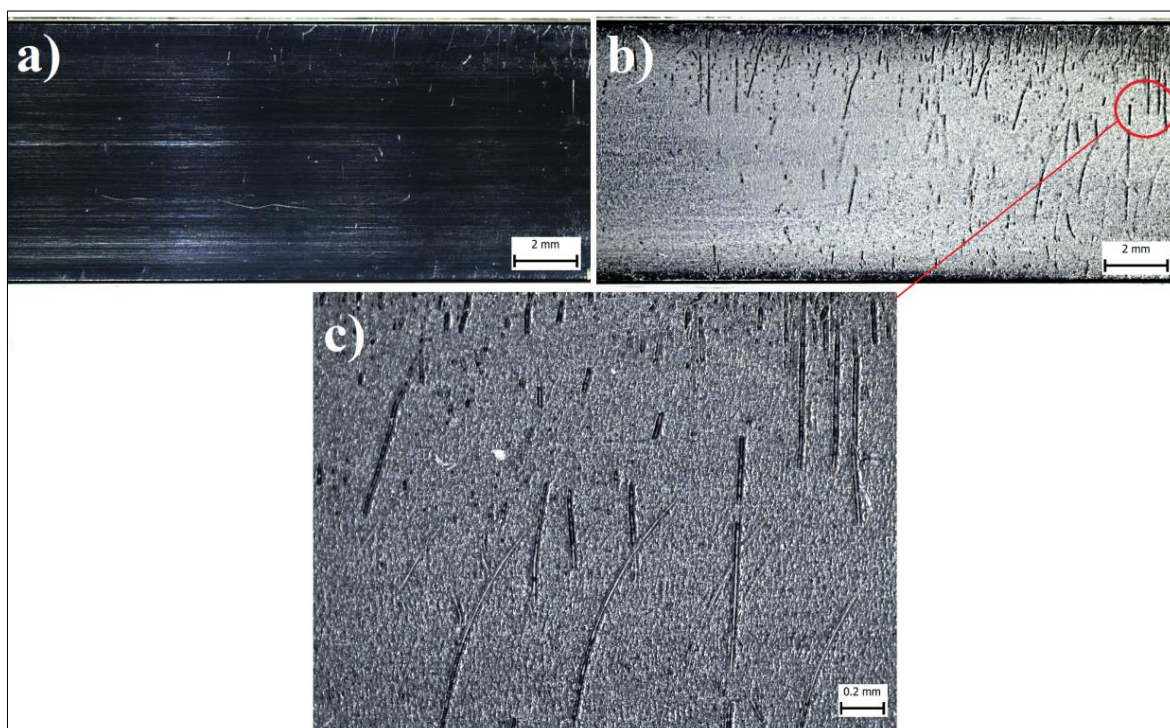
Výsledkem zkoušky byl vznik napětových trhlin na povrchu zkušebních těles z materiálu ABS a PC/ABS vyrobených technologií vstřikování, zatímco u těles zhotovených technologií FDM se vnitřní napjatosti nezaznamenala. Na obr. 37 je ukázka mikrosnímku povrchu 3D dílu z materiálu PC/ABS před a po expozici. Zobrazení napětových trhlin u vstřikovaných vzorků z materiálů ABS a PC/ABS je uvedeno na obr. 38 a obr. 39. Povrch vzorků, resp. napětové trhliny na jejich povrchu byly sledovány pomocí optického stereomikroskopu OLYMPUS SZ61 viz obr. 40. Detailní zobrazení napětových trhlin (viz obr. 41) bylo provedeno ve spolupráci s laboratoří analytických metod ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace na sledovacím elektronovém mikroskopu Carl Zeiss Ultra Plus



*Obr. 37 – Povrch z PC/ABS vyrobený metodou FDM (SM)
a) před expozicí, b) po expozici*



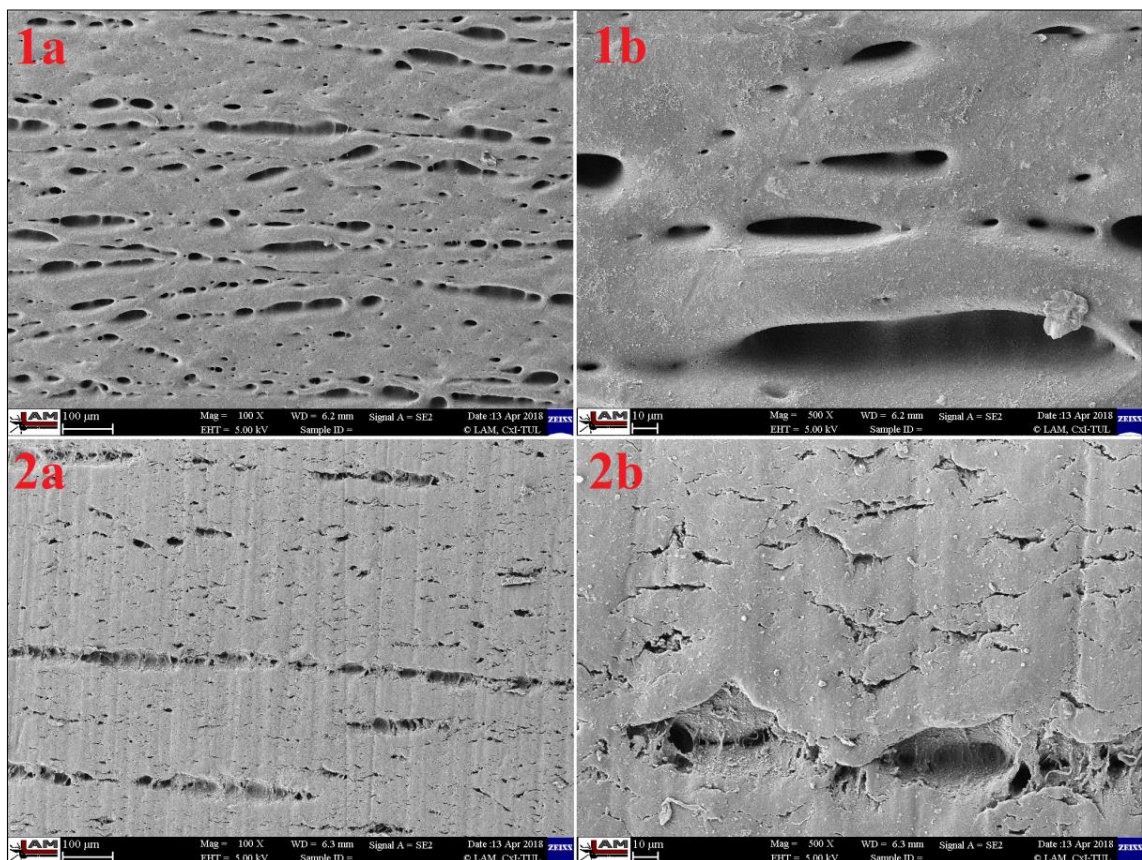
*Obr. 38 – Povrch výstřiku z ABS (SM)
a) před expozicí, b) po expozici, c) detail*



*Obr. 39 – Povrch výstřiku z PC/ABS (SM)
a) před expozicí, b) po expozici, c) detail*



Obr. 40 - Optický mikroskop OLYMPUS SZ61 [62]



Obr. 41 – Mikroskopické snímky napěťových trhlin na povrchu dílu (EM)
1a,1b – materiál ABS, 2a,2b – materiál PC/ABS

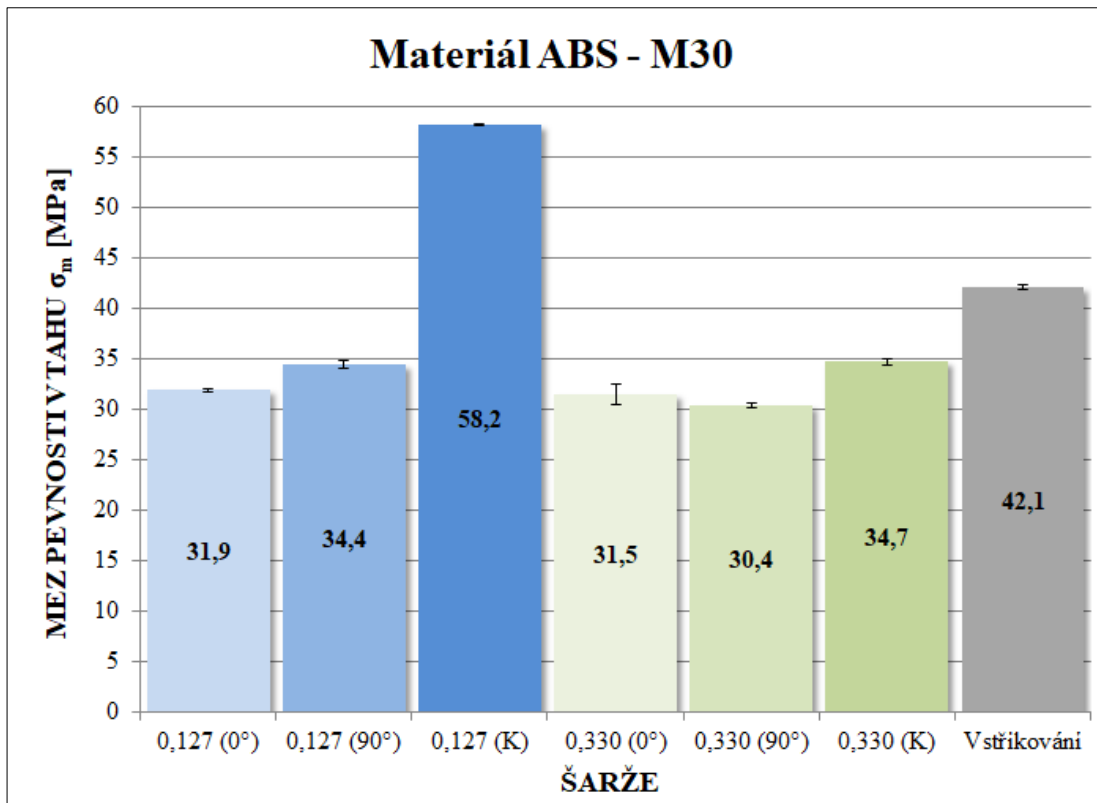
4 Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze

Vyhodnocení mechanických vlastností dílů je provedeno na základě experimentálních výsledků získaných tahovou, ohybovou a rázovou zkouškou v souladu s mezinárodními předpisy. Hodnocen je vliv minimální a maximální tloušťky vrstvy (pro každý materiál) při její konstantní orientaci. Následně je hodnocen vliv geometrie a orientace vrstvy (0° , 90° , K) při konstantní tloušťce. Veškeré tyto vlivy jsou porovnány se standardními vstřikovanými díly, shodných tvarů a rozměrů, u nichž je diskutována rovněž vnitřní zbytková napjatost.

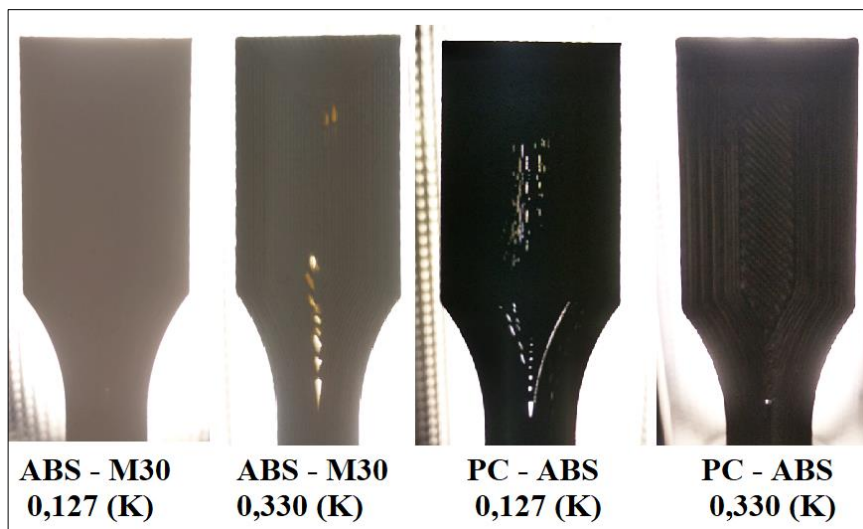
4.1 Vyhodnocení tahových vlastností

Tahové vlastnosti zkušebních těles byly stanoveny podle podmínek definovaných normou ČSN EN ISO 527–1/2. Z naměřených hodnot uvedených v tab. 12 a tab. 13, byly vytvořeny grafické závislosti pevnosti v tahu, modulu pružnosti v tahu a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení v závislosti na jednotlivých šaržích vzorků, tj. způsobu výroby, jejich tloušťce, geometrii a orientaci vrstev (v případě 3D dílů).

Při hodnocení **meze pevnosti** u vzorků z materiálu **ABS – M30, s konstantní orientací vrstev (0°) a různou jejich tloušťkou** [šarže 0,127 (0°) a 0,330 (0°)], je z obr. 42 patrné, že 3D díly (vzhledem k velikosti směrodatné odchylky) nevykazují změnu meze pevnosti v závislosti na tloušťce vrstev. Naopak u vzorků 0,127 (90°) a 0,330 (90°) došlo k poklesu meze pevnosti o 12 % (s rostoucí tloušťkou vrstvy), příčinou může být hrubší struktura vzorků 0,330 (90°). Vzorky 0,127 (K) vyráběné koncentricky vykazovaly o 40 % vyšší mez pevnosti, než vzorky 0,330 (K). Tento rozdíl je způsoben tím, že u vzorků 0,330 (K) došlo při jejich výrobě k tvorbě nevyplněných prostorů (viz obr. 43). Tato vada pak měla za následek předčasné porušení zkušebního tělesa během zkoušky (viz obr. 44). Tyto vady byly přítomné i u vzorků 0,127 (K), ovšem vzhledem k jejich jemnější struktuře nebyly tak veliké a ovlivnění výsledné meze pevnosti tak výrazné. Přítomnost vad vyplývá ze samotného způsobu uspořádání vrstev koncentrickým způsobem a nelze je u této geometrie zkušebního tělesa eliminovat (koncentrický způsob tisku vrstev je vhodnější pro pravoúhlé díly).



Obr. 42 - Porovnání meze pevnosti u vzorků z materiálu ABS - M30



Obr. 43 - Porovnání dutin z koncentricky orientovaných vzorků

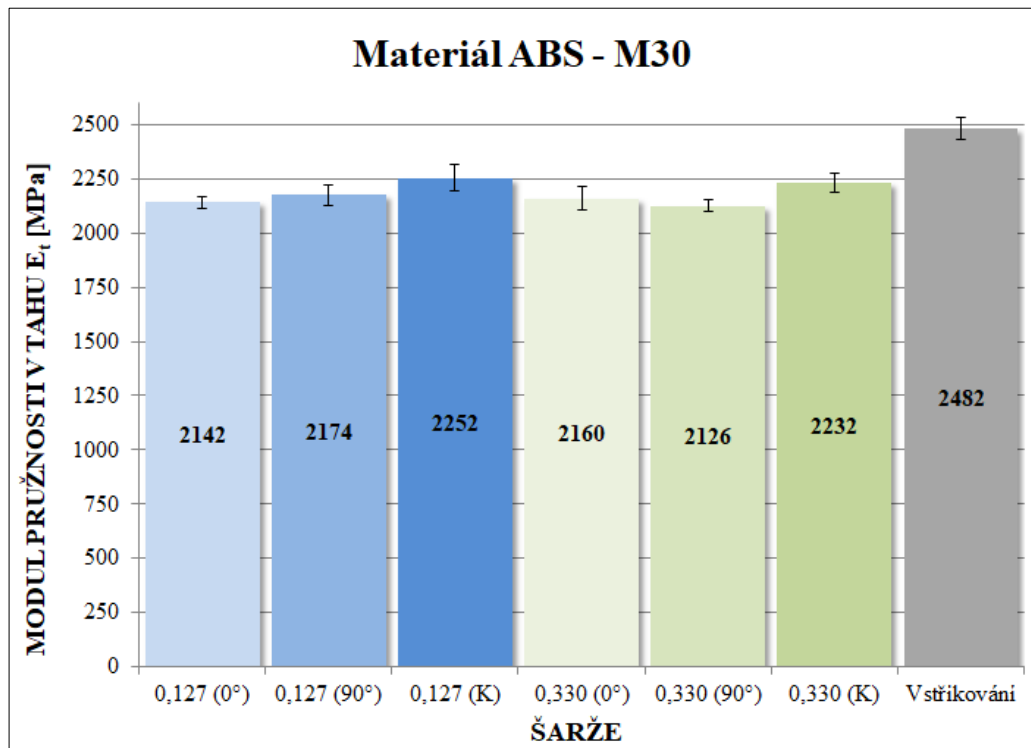


Obr. 44 - Ukázka předčasně porušeného tělesa šarže 0,330 (K) z materiálu ABS - M30

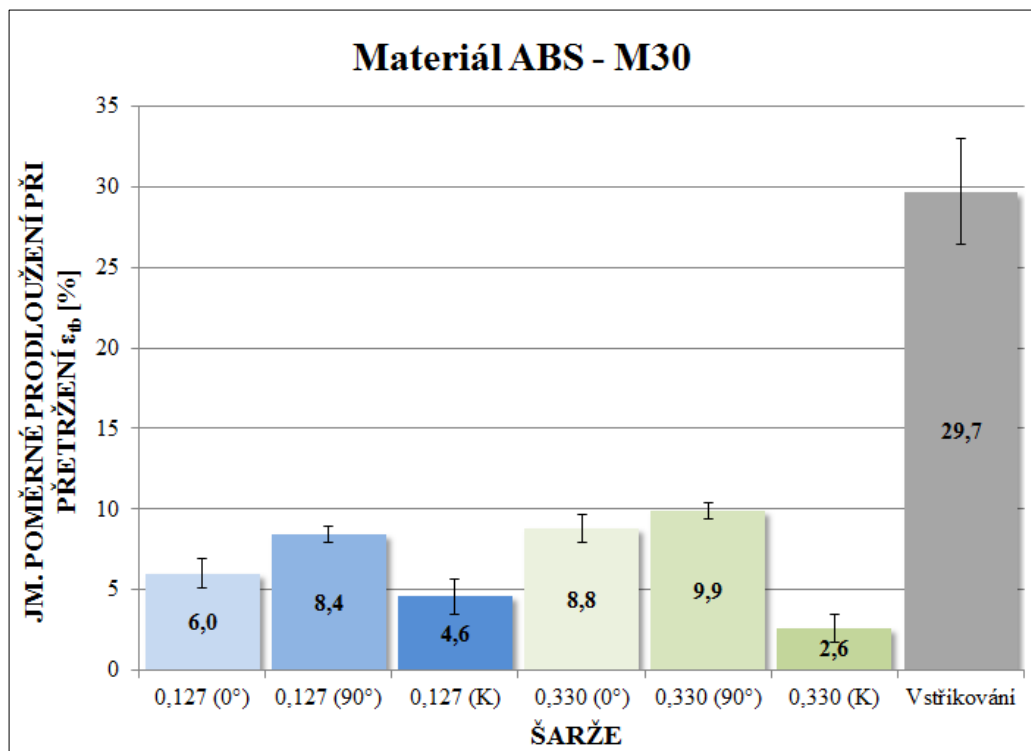
U porovnání vzorků z hlediska **různé orientace vrstev při jejich konstantní tloušťce**, je z obr. 42 zřejmé, že vyšší meze pevnosti je dosaženo u orientace 90° a nejvyšší při koncentrické geometrii, zejména při nižší tloušťce vrstev. U vzorků 0,127 (90°) byl tento nárůst oproti vzorkům 0,127 (0°) pouze o 8 % zatímco z vzorků 0,127 (K) se jednalo o 82 %. U vzorků 0,330 (0°) a 0,330 (90°), je mez pevnosti vzhledem k směrodatným odchylkám shodná. Naopak u vzorků 0,127 (K) byl nárůst meze pevnosti skokový a dosahoval nejvyšší hodnoty meze pevnosti v tahu ze všech vzorků. Tato hodnota meze pevnosti byla o 28 % vyšší, než u vzorků vstříkovaných. Podobný nárůst meze pevnosti mohl nastat i u vzorků 0,330 (K), ovšem vzhledem k jejich výrobní vadě (viz obr. 43) došlo k poklesu meze pevnosti o 18 % vůči vzorkům vyrobených vstříkováním. Další hodnocenou vlastností při tahovém zatížení byl **modul pružnosti v tahu** (viz obr. 45). Z grafické závislosti (s ohledem na rozptyl měřených hodnot) nejsou u jednotlivých šarží viditelné žádné skokové změny modulu pružnosti v tahu. Z naměřených hodnot lze konstatovat, že s rostoucí tloušťkou vrstvy při její konstantní orientaci nedochází ke změně modulu pružnosti v tahu. Podobné to bylo i při hodnocení modulu pružnosti v tahu u vzorků s konstantní tloušťkou vrstvy a její různé orientaci. Kdy v případě vzorků 0,127 (0° , 90° , K), vzhledem k velikosti směrodatných odchylek, zůstává modul pružnosti neměnný (obdobně je tomu u tloušťky 0,330 mm). Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti dosáhly vstříkované vzorky, a to cca o (9-14) % vyšší, než díly zhotovené metodou FDM.

Při hodnocení **jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení** (viz obr. 46) se u stejně orientovaných vrstev vzorků s různou jejich tloušťkou projevil nárůst poměrného prodloužení o 32 % mezi vzorky 0,127 (0°) a 0,330 (0°). Podobný nárůst je viditelný i mezi vzorky 0,127 (90°) a 0,330 (90°) a to o 15 %. U obou případů může být nárůst důsledkem silnějších vrstev 0,330 mm, které více odolávaly přetržení. V případě vzorků s koncentrickým uspořádáním vrstev se v obou případech jejich tloušťky projevila výrobní vada ve formě nevyplněných prostor (viz obr. 43). Tato vada se nejvíce projevila u vzorků 0,330 (K) a zapříčinila rychlé šíření trhlin a předčasné poškození zkušebního tělesa. Při hodnocení vzorků s konstantní tloušťkou vrstvy a různou orientací vláken dopadly nejlépe šarže 0,127 (90°) a 0,330 (90°), které dosáhly nejvyšší hodnoty poměrného prodloužení při přetržení u 3D dílů. Nejlépe dopadla šarže 0,330 (90°), ale i ta se zdaleka nepřiblížila hodnotě jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení vstříkovaných dílů. Jejich hodnota poměrného

prodloužení byla vyšší o 67 % (z důvodu výrazně vyšší homogenity zaplnění materiálu v celém objemu dílu).

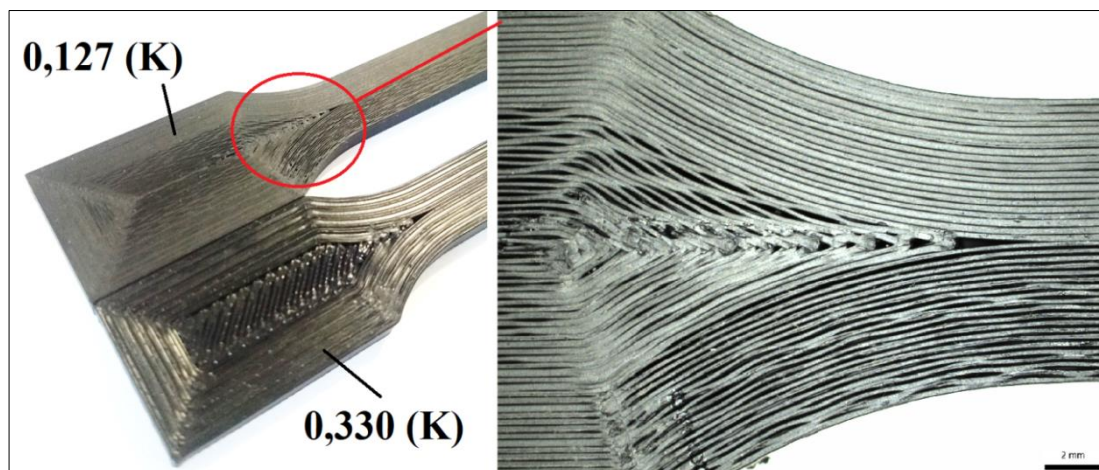


Obr. 45 - Porovnání meze pružnosti u vzorků z materiálu ABS - M30



Obr. 46 - Porovnání poměrného prodloužení u vzorků z materiálu ABS - M30

U vzorků z materiálu **PC/ABS** (viz obr. 49) došlo u vzorků s orientací na plocho (0°), s větší tloušťkou vrstvy k nárůstu **meze pevnosti** o 11 % (zatímco u materiálu ABS – M30 tato změna byla statisticky nevýznamná). Naopak u vzorků orientovaných na výšku (90°) došlo obdobně jako u materiálu ABS- M30 s větší tloušťkou vrstvy k poklesu meze pevnosti o 10 %. U koncentricky orientovaných vzorků (K) došlo s rostoucí tloušťkou vrstvy ke skokovým změnám meze pevnosti, podobně jako u vzorků z materiálu ABS – M30 (viz obr. 42). Zatímco vzorky 0,127 (K) z materiálu ABS – M30 vykazovaly větší mez pevnosti v tahu, než vzorky 0,127 (0°), 0,127 (90°) a 0,330 (K), je tento efekt u vzorků z materiálu PC/ABS opačný. Z obr. 49 vyplývá, že mez pevnosti vzorků 0,127 (K) je o 42 % nižší, než u vzorků 0,330 (K). Důvodem je stejná výrobní vada, jako u vzorků z materiálu ABS – M30 s tím rozdílem, že zde se výrobní vady negativně projevily u vzorků 0,127 (K), kde byly přítomné skoro po celém zkušebním tělese na hranicích jednotlivých vrstev materiálu (viz obr. 47).



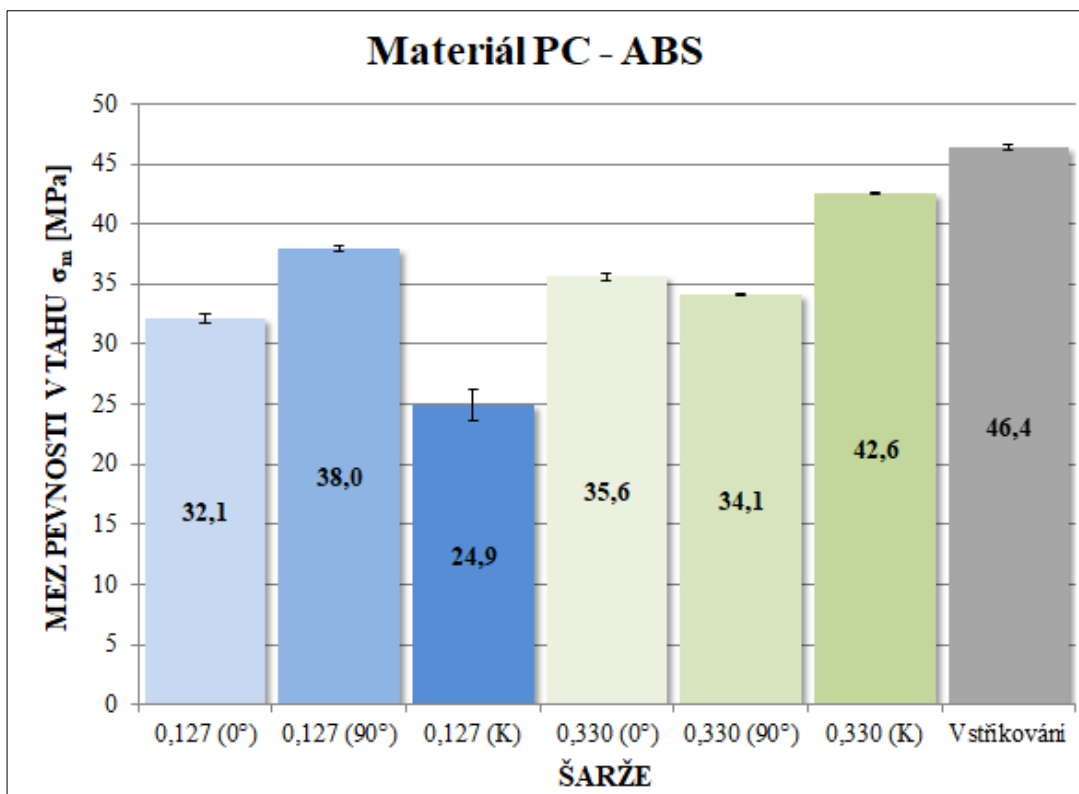
Obr. 47 - Dutiny u vzorku 0,127 (K) z PC/ABS v porovnání se vzorkem 0,330 (K)

Tato skutečnost měla za následek úplné rozpadnutí tělesa při tahové zkoušce (viz obr. 48). Naopak vrstvy vzorků 0,330 (K) k sobě více přiléhaly a nezaplňené prostory zde byly v malé míře pouze uprostřed tělesa.



Obr. 48 - Předčasně porušené těleso 0,127 (K) z materiálu PC/ABS

Z tohoto důvodu byla u těchto vzorků naměřena vyšší mez pevnosti v tahu. Na obr. 43 je porovnání těchto vzorků se vzorky z materiálu ABS – M30 vystavených proti světlu. Je vidět znatelný rozdíl ve větším množství dutin u vzorku 0,127 (K) z materiálu PC/ABS. U porovnání vzorků s různou orientací vrstev při konstantní tloušťce je z obr. 49 viditelný nárůst meze pevnosti o 18 % mezi vzorky 0,127 (0°) a 0,127 (90°). Hodnota meze pevnosti vzorků 0,127 (K) je o 34 % nižší, než u vzorků 0,127 (90°) a je ovlivněna výrobní vadou. Vzorky s konstantní tloušťkou vrstvy 0,330 mm a orientací 0° a 90° vykazují 4 % rozdíl meze pevnosti v prospěch vzorků 0,330 (0°) obdobně jako u materiálu ABS- M30. Jedná se o nepatrný rozdíl, který je zanedbatelný (vzhledem k rozptylu měřených hodnot). Vzorky z šarže 0,330 (K) vykazují nejvyšší hodnotu meze pevnosti ze všech vzorků vyrobených metodou FDM. Nejvíce se přiblížily vstřikovaným vzorkům, které mají mez pevnosti pouze o 9 % vyšší. Je zde opět patrné, že koncentricky připravené vzorky, za předpokladu eliminace výrobních vad, dosahují téměř obdobných hodnot meze pevnosti jako vstřikované díly.



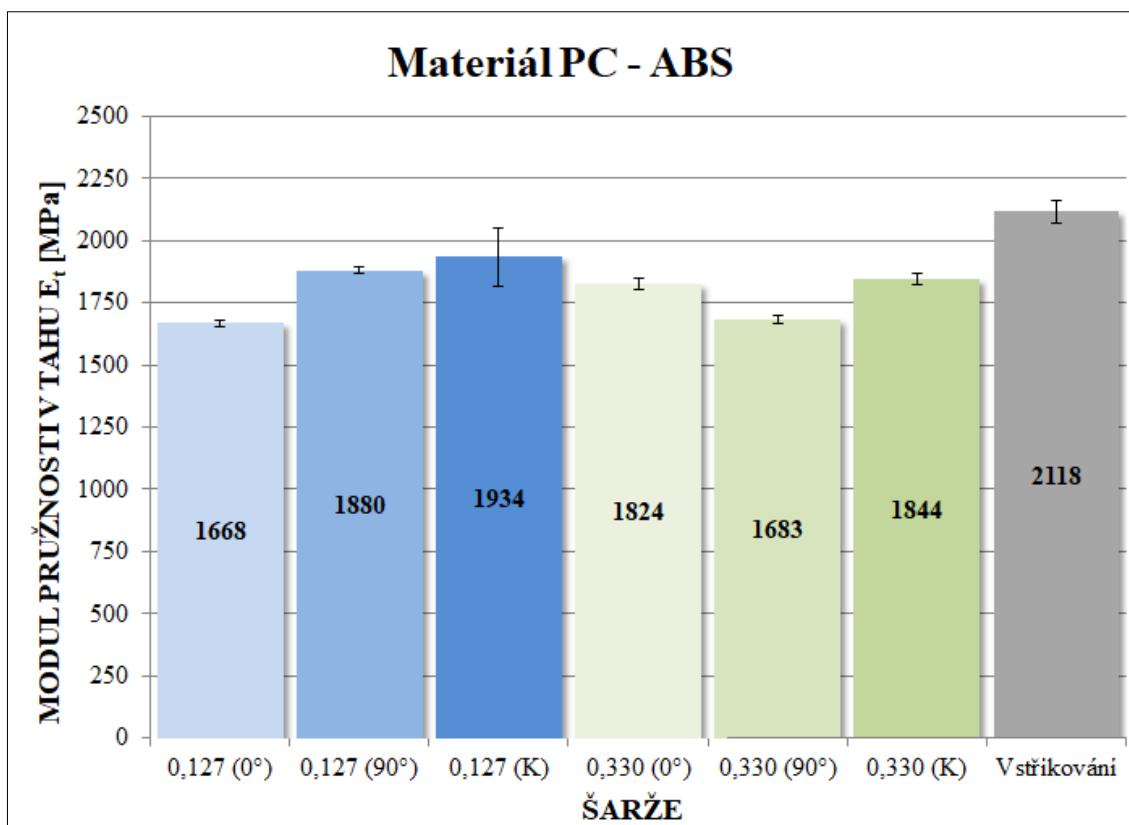
Obr. 49 - Porovnání meze pevnosti u vzorků z materiálu PC/ABS

Při porovnání **modulu pružnosti v tahu** byly oproti materiálu ABS – M30 zaznamenány průkaznější změny, které jsou znázorněny na obr. 50. Z grafické

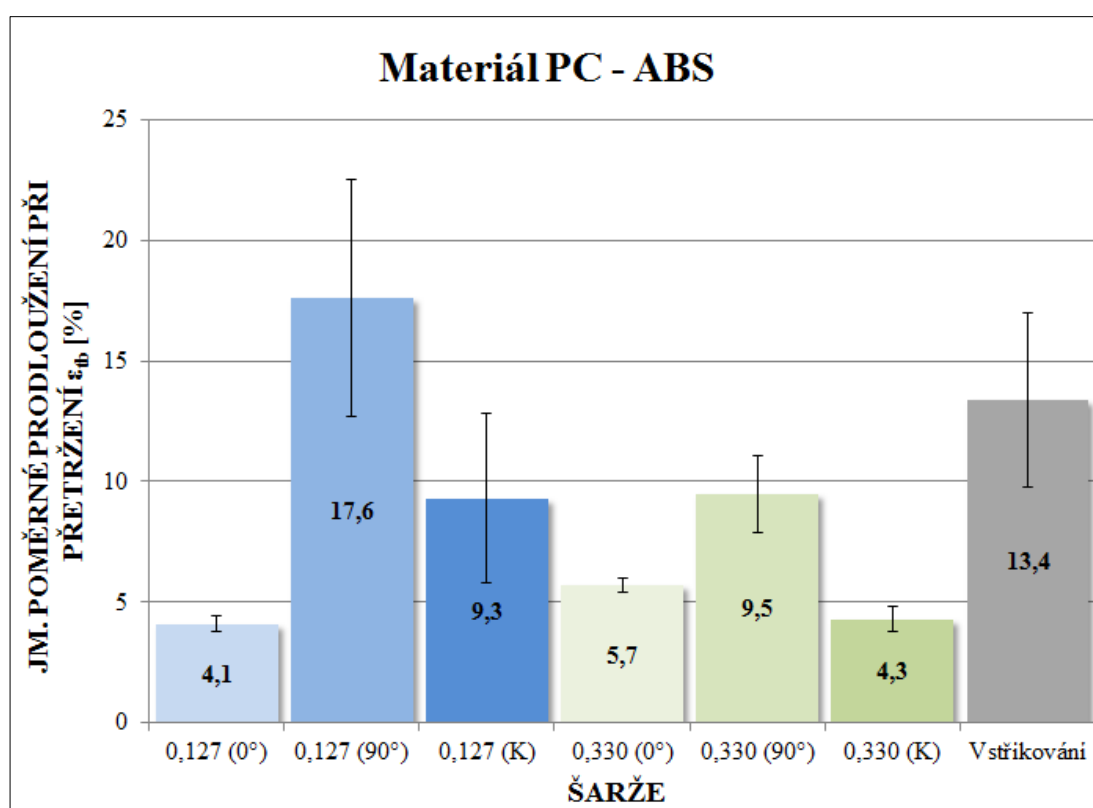
závislosti je patrné, že mezi vzorky 0,127 (0°) a 0,330 (0°) došlo s rostoucí tloušťkou vrstvy také k nárůstu modulu pružnosti o 9 %. Tento efekt je však opačný u vzorků 0,127 (90°) a 0,330 (90°), kde došlo naopak k poklesu modulu pružnosti o 10 %. Tento opačný efekt je nejspíše způsobem nedokonalým vyplněním objemu zkušebního tělesa, resp. většímu zastoupení nevyplněných prostorů. U koncentricky orientovaných vzorků 0,127 (K) a 0,330 (K) je (s ohledem na statistickou chybu měření) hodnota modulu pružnosti totožná.

Při hodnocení vlivů **různé orientace vrstev při konstantní tloušťce** je na obr. 50 vidět mezi vzorky 0,127 (0°) a 0,127 (90°) nárůst modulu pružnosti v tahu o 13 %. Mezi vzorky 0,127 (90°) a 0,127 (K) je tento nárůst vzhledem ke směrodatné odchylce zanedbatelný. Odlišné chování vykazují vzorky s konstantní tloušťkou vrstvy 0,330 mm, kdy dochází mezi vzorky 0,330 (0°) a 0,330 (90°) k poklesu modulu pružnosti o 8 % (z důvodu vnitřních vad v zaplnění objemu tělesa materiálem). Koncentricky orientované vzorky označené 0,330 (K) mají s ohledem na statistickou chybu měření modul pružnosti stejný jako vzorky 0,330 (0°). Nejvyšší hodnota modulu pružnosti byla naměřena u vzorků vyrobených vstříkovaním. K této hodnotě se nejvíce přiblížili opět vzorky s koncentrickým uspořádáním vrstev. Konkrétně u vzorků šarže 0,127 (K) byla hodnota meze pružnosti o 9 % menší, než u vzorků vstříkovaných (viz obr. 50).

U vyhodnocení hodnot **jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení**, byly zaznamenány skokové změny, které jsou do určité míry eliminovány značným rozptylem měřených hodnot vyjádřeným směrodatnou odchylkou (viz obr. 51). Při porovnání vzorků z šarží 0,127 (0°) a 0,330 (0°) byl zaznamenán nárůst poměrného prodloužení o 40 %. Naopak u vzorků 0,127 (90°) a 0,330 (90°) byl viditelný pokles poměrného prodloužení o 46 %, který je způsoben přítomností nevyplněných prostorů materiálem v objemu dílu. Podobně je to i u koncentricky orientovaných vzorků, kde s rostoucí tloušťkou vrstvy, klesá jmenovité poměrné prodloužení při přetržení o 54 %. Tento rozdíl byl nejspíše ovlivněn výrobní vadou těchto šarží. U hodnocení **různé orientace vrstev při jejich konstantní tloušťce** vykazují největší poměrné prodloužení vzorky s orientací 90°. Vstříkovaným vzorkům se při respektování rozptylu měřených hodnot vyrovnaly šarže s orientací vrstev 90° a koncentrickou geometrií vrstev.

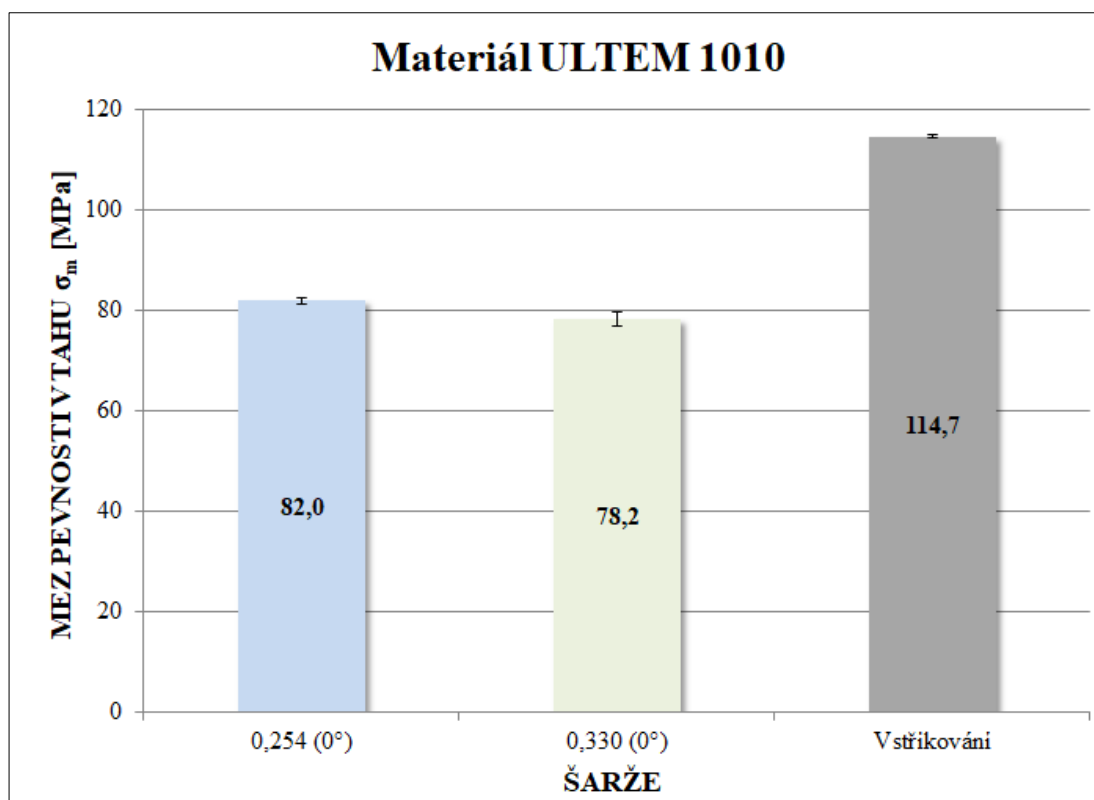


Obr. 50 - Porovnání meze pružnosti u vzorků z materiálu PC/ABS

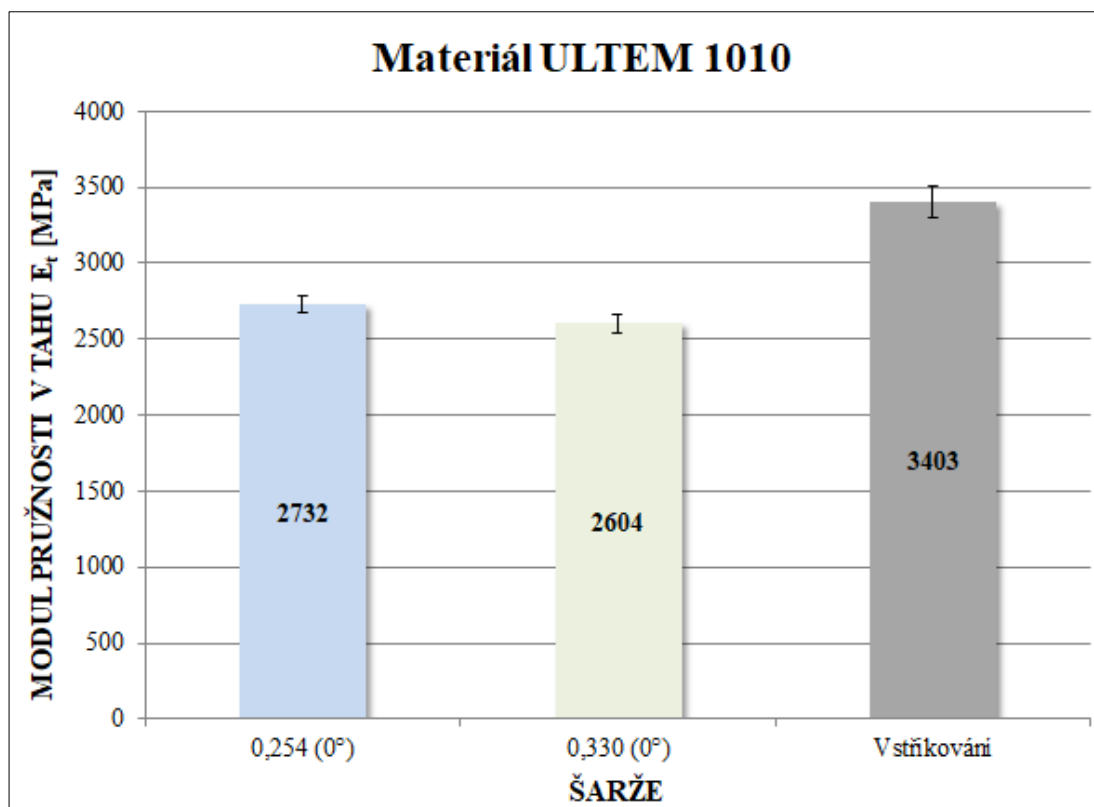


Obr. 51 - Porovnání poměrného prodloužení u vzorků z materiálu PC/ABS

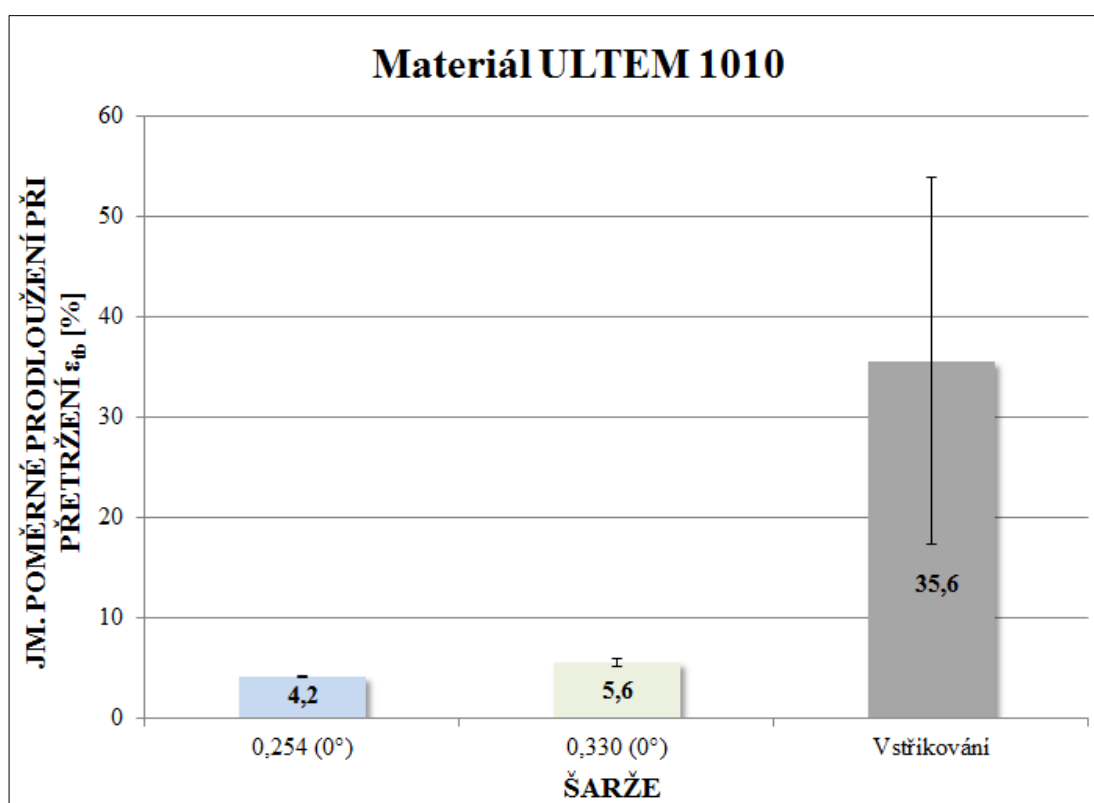
U materiálu **ULTEM 1010** byl hodnocen pouze vliv tloušťky vrstev při jejich orientaci 0° z důvodů uvedených v kap. 3.2.2. Vzájemné porovnání jejich tahových vlastností se vstříkovanými vzorky je uvedeno na obr. 52 až obr. 54. Nejmenší výrobitelná tloušťka u tohoto materiálu je 0,254 mm, nikoliv 0,127 mm, jak tomu bylo u materiálu ABS – M30 a PC/ABS. Naopak maximální výrobitelná tloušťka je totožná, tedy 0,330 mm. Z obr. 52 a 53 vyplývá, že šarže 0,254 (0°) vykazuje o 5 % vyšší mez pevnosti v tahu, než šarže 0,330 (0°). Tato změna je však vzhledem k rozptylu měřených hodnot na hranici statistické významnosti. Stejně je to i při hodnocení modulu pružnosti a celkové tažnosti. Je to nejspíš z toho důvodu, že rozdíl v tloušťkách vrstev není takový, jak u předchozích materiálů. Z tohoto důvodu lze konstatovat, že v případě materiálu ULTEM 1010 má minimální a maximální tloušťka vrstvy bezvýznamný vliv na tahové vlastnosti dílu. V případě vstříkovaných vzorků, bylo naměřeno nejvyšších hodnot tahových vlastností. Vzorky měly o 40 % vyšší mez pevnosti, o 20 % vyšší modul pružnosti a 85 % vyšší poměrné prodloužení, než vzorky vyrobené metodou FDM.



Obr. 52 - Porovnání meze pevnosti u vzorků z materiálu ULTEM 1010



Obr. 53 - porovnání meze pružnosti u vzorků z materiálu ULTEM 1010



Obr. 54 - Porovnání poměrného prodloužení u vzorků z materiálu ULTEM 1010

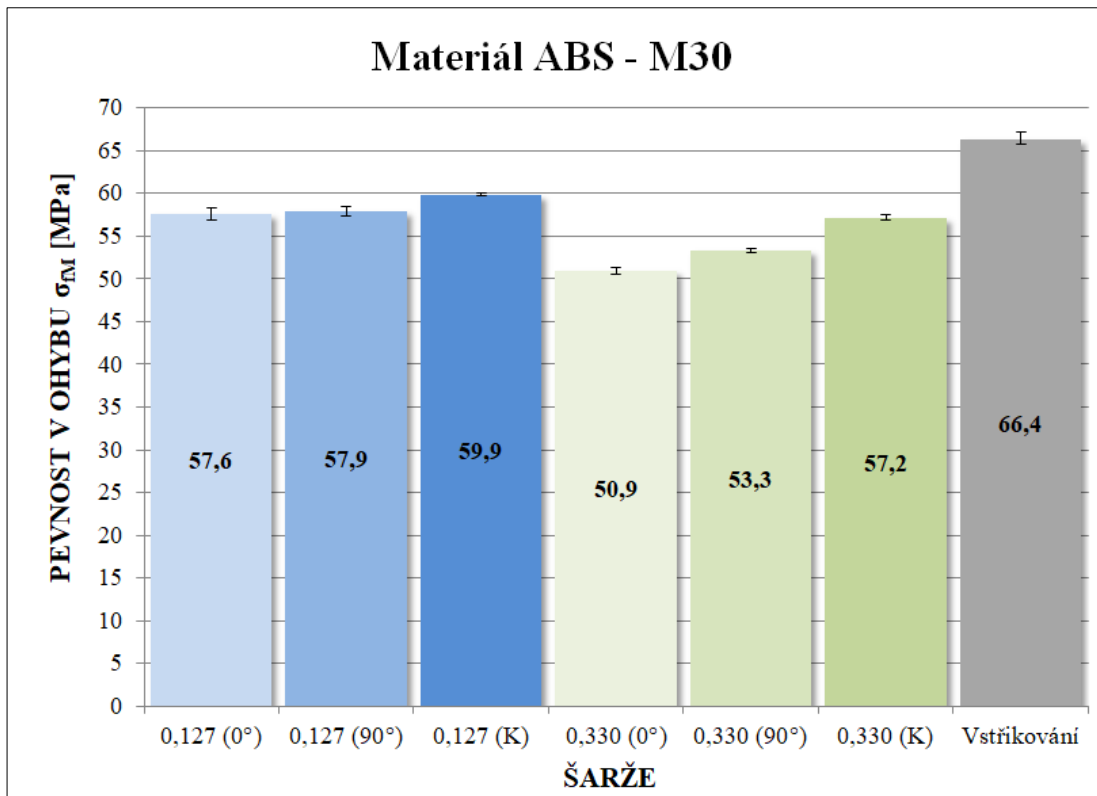
4.2 Vyhodnocení ohybových vlastností

Vyhodnocení ohybových vlastností zkušebních vzorků bylo provedeno v souladu s ČSN EN ISO 178. Naměřené hodnoty ohybových vlastností uvedené v tab. 14 a tab. 15 byly použity pro vytvoření grafické závislosti pevnosti a modulu pružnosti v ohybu na jednotlivých šaržích vzorků.

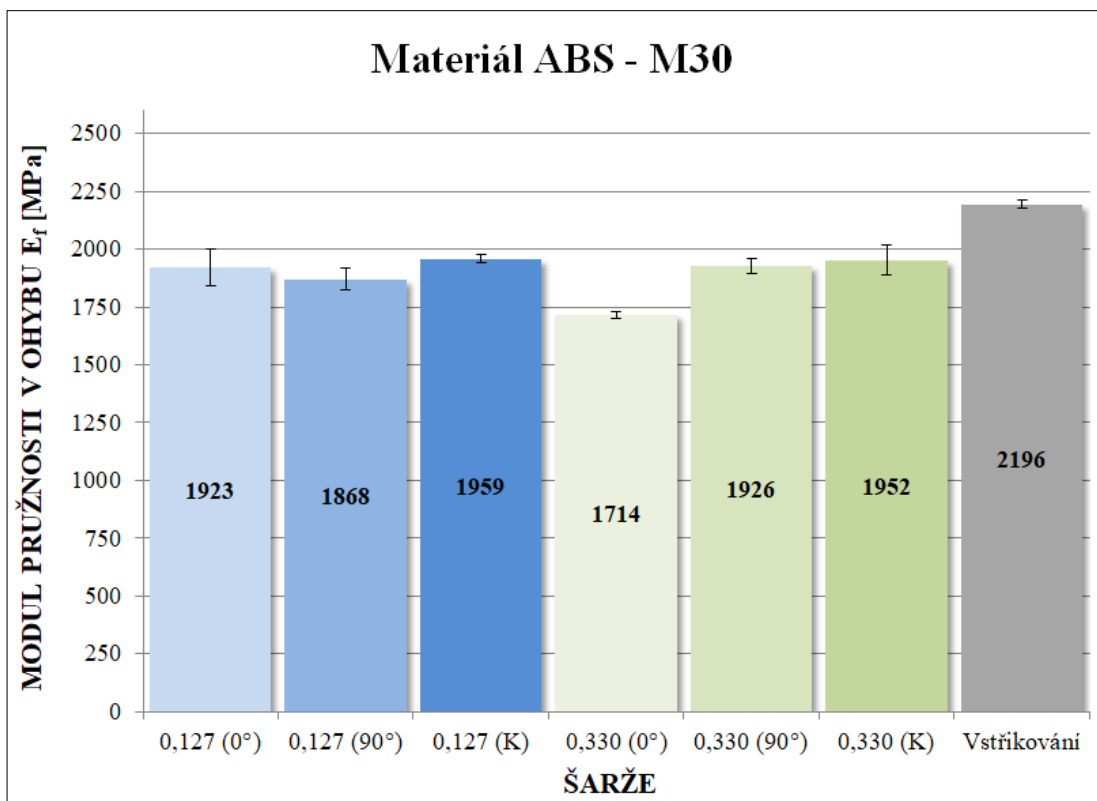
Vzorky z materiálu **ABS – M30** vyrobené metodou FDM (s **odlišnou tloušťkou vrstvy při její konstantní orientaci**) vykazovaly s rostoucí tloušťkou vrstvy pokles pevnosti v ohybu (viz obr. 55). Mezi vzorky 0,127 (0°) a 0,330 (0°) byl zaznamenán pokles hodnoty o 12%. U vzorků s konstantní orientací 90° klesla pevnost v ohybu s rostoucí tloušťkou vrstvy o 8 %. Mezi vzorky s koncentrickým uspořádáním byl pokles ohybové pevnosti s rostoucí tloušťkou vrstvy nejmenší a to 5 %. Lze konstatovat, že vzorky s větší tloušťkou vrstvy při její konstantní orientaci vykazují menší pevnost v ohybu. Příčinou může být horší zaplnění objemu materiálem nebo menší počet nanesených vrstev materiálu, které působí proti ohybovému napětí. Vliv **různé orientace vrstev** na pevnost v ohybu **při konstantní tloušťce vrstvy**, se u vzorků vyrobených metodou FDM projevil nepatrným nárůstem pevnosti v ohybu (viz obr 55), zejména při tloušťce vrstev 0,330 mm. Avšak tento nárůst mezi vzorky 0,330 (0°) a 0,330 (90°) je 5 % a vzhledem k homogenitě materiálu je na hranici statistické významnosti. Nepatrný nárůst pevnosti v ohybu byl zaznamenán také mezi vzorky 0,127 (90°) a 0,127 (K), ale i tento nárůst je statisticky nevýznamný. Z těchto výsledků je zřejmé, že při změně orientace vrstev (při konstantní tloušťce vrstvy) dochází k minimální změně pevnosti v ohybu.

Na obr. 56. jsou znázorněny naměřené hodnoty **modulu pružnosti v ohybu**. Ze získaných výsledků lze konstatovat, že jejich závislost je v korelaci s průběhem změn pevnosti v ohybu. Při orientaci vrstvy (0°) byl s rostoucí tloušťkou vrstvy zaznamenán pokles modulu pružnosti o 11 %. Při konstantní tloušťce 0,330 mm byl se změnou její orientace (90°) zaznamenán nárůst o 12 %. Tedy podobně jako byly diskutovány změny ohybových pevností. Při koncentrickém uspořádání vrstev nebyl zaznamenán vliv na modul pružnosti materiálu.

Nejvyšší hodnoty měřených ohybových vlastností vykazovaly vzorky vyrobené běžným způsobem vstřikování. K těmto hodnotám se nejvíce přiblížily koncentricky orientované vzorky s tloušťkou vrstvy 0,127 mm. V případě pevnosti v ohybu činí rozdíl hodnot cca 14 %, u modulu pružnosti v ohybu cca 11 %.



Obr. 55 - Porovnání pevnosti v ohybu u vzorků z materiálu ABS - M30

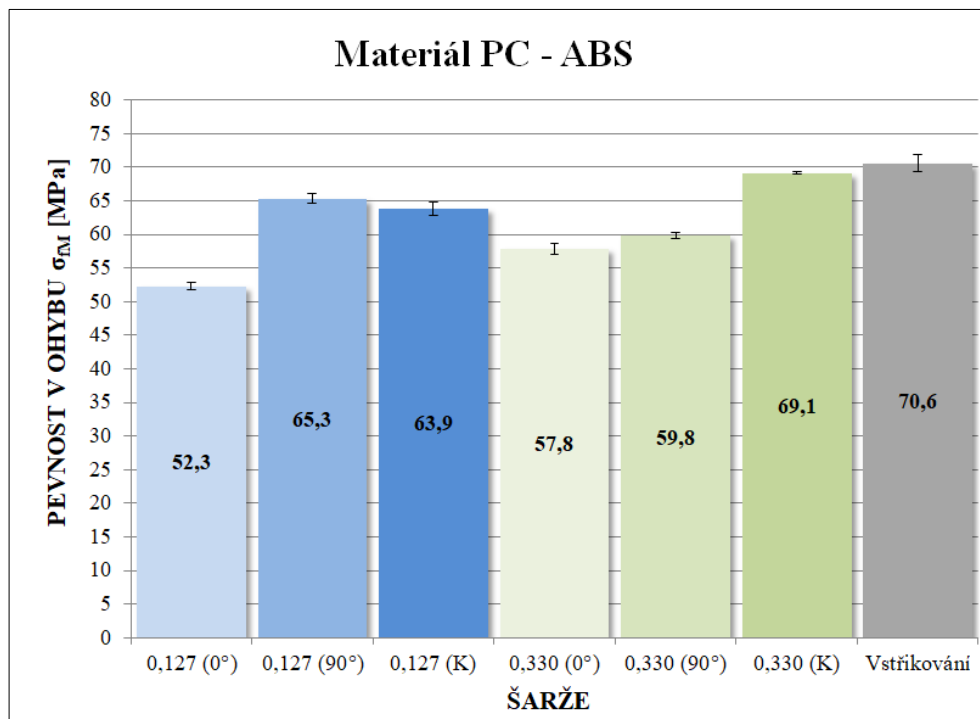


Obr. 56 - Porovnání modulu pružnosti v ohybu u vzorků z materiálu ABS - M30

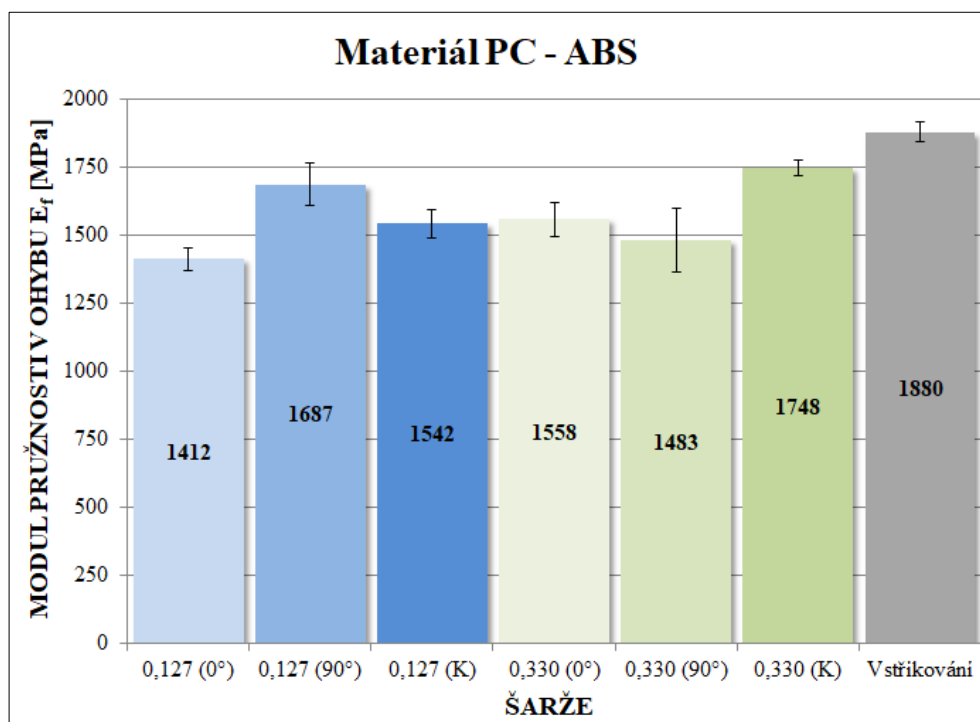
U vzorků vyrobených z materiálu **PC/ABS** (viz obr. 57 a obr. 58), byly **vlivem změny tloušťky vrstvy (při stejné jejich orientaci)** zaznamenány různé změny ohybových vlastností. Např. mezi vzorky 0,127 (0°) a 0,330 (0°) vyvolala změna tloušťky vrstvy navýšení pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu cca o 10 %. Navýšení ohybových vlastností proběhlo i mezi vzorky s koncentrickým uspořádáním, kde došlo k navýšení pevnosti o 8 % a u modulu pružnosti o 13 %. Naopak pokles pevnosti v ohybu o cca 8 % a modulu pružnosti o 12 % byl zaznamenán mezi vzorky 0,127 a 0,330 s orientací vláken na výšku (90°), kde se při orientaci na výšku negativně projevuje soudržnost vrstev vlivem nedokonalého vyplnění objemu tělesa materiálem při větší tloušťce vrstev. Z hlediska hodnocení **vlivu různé orientace vrstev při jejich konstantních tloušťkách**, je z obr. 57 a obr. 58 zřejmý skokový nárůst ohybových vlastností mezi vzorky 0,127 (0°) a 0,127 (90°), který je u hodnot ohybové pevnosti téměř 25 % a v případě modulu pružnosti cca 20%. Tato skutečnost je dána orientací vrstev a charakteru zatěžování. Vzorky s orientací vrstev 90° lépe odolávají ohybovému zatěžování. Tato změna se více projevila u polymerní směsi PC/ABS, u vzorků z materiálu ABS – M30 byly tyto změny s ohledem na rozptyl měřených hodnot nulové. Důvodem může být nejspíše přítomnost PC v polymerní směsi, kdy vyšší pevnost PC současně podpoří vliv orientace vrstev. U vzorků 0,127 (K) byly naměřeny stejné ohybové vlastnosti (s ohledem na směrodatnou odchylku), jako u diskutovaných vzorků 0,127 (90°). Ovšem i zde, byly u vzorků 0,127 (K) přítomné drobné výrobní vady spojené s nedokonalým zaplněním objemu tělesa materiálem, kvůli kterým nemohly ohybové vlastnosti dosáhnout vyšších hodnot jako např. u vzorků 0,330 (K). U vzorků s konstantní tloušťkou vrstvy 0,330 mm byl zaznamenán největší nárůst ohybových vlastností u vzorků 0,330 (K). Ty se (s ohledem na směrodatnou odchylku) svojí pevností téměř vyrovnaly vstříkovaným vzorkům, zejména při měření pevnosti v ohybu.

V případě vzorků vyrobených z materiálu **ULTEM 1010**, došlo při porovnání ohybových vlastností vzorků s rostoucí tloušťkou vrstvy materiálu k poklesu jak pevnosti, tak modulu pružnosti v ohybu, obdobně jako u materiálu ABS – M30 (viz obr. 59 a obr. 60). Mezi vzorky 0,254 (0°) a 0,330 (0°) byl tento pokles u pevnosti v ohybu o 13 % a u modulu pružnosti o cca 10 %. Důvodem je nejspíš větší počet tenčích vrstev, které více odolávají ohybovému namáhání a vykazují u vzorků 0,254 (0°) lepší ohybové vlastnosti. Při jejich porovnání se vzorky vyrobenými běžným

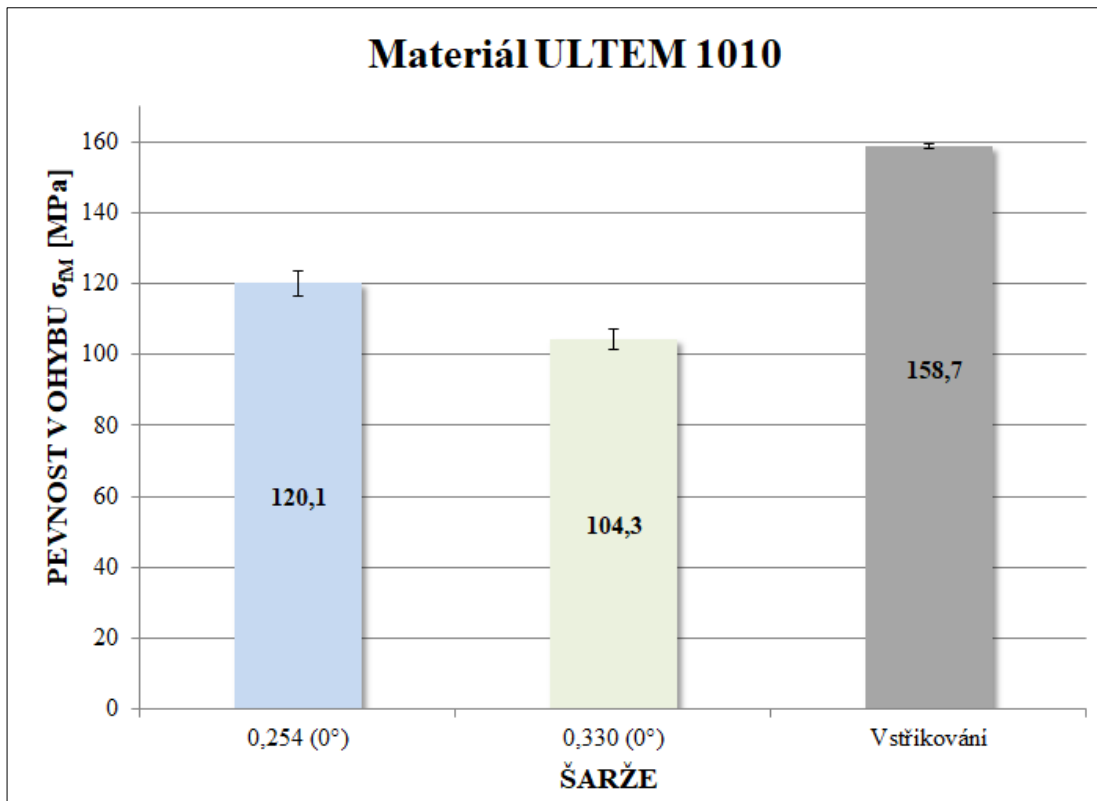
způsobem vstřikování vyplývá, že vstřikované vzorky vykazují o 32 % vyšší pevnost a o 28 % vyšší modul pružnosti. To je způsobeno jejich lepší homogenitou (vyplněním objemu tělesa materiálem), která způsobuje lepší soudržnost materiálů.



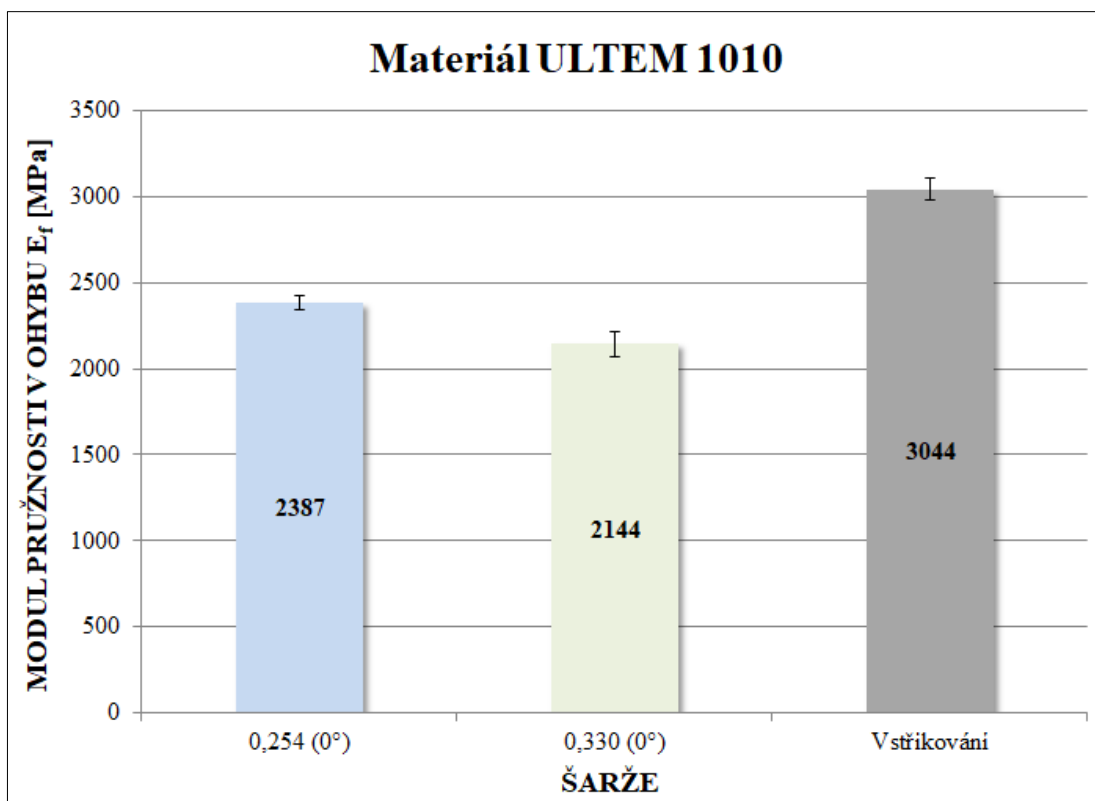
Obr. 57 - Porovnání pevnosti v ohybu u vzorků z materiálu PC/ABS



Obr. 58 - Porovnání modulu pružnosti v ohybu u vzorků z materiálu PC/ABS



Obr. 59 - Porovnání pevnosti v ohybu u vzorků z materiálu ULTEM 1010



Obr. 60 - Porovnání modulu pružnosti v ohybu u vzorků z materiálu ULTEM 1010

4.3 Vyhodnocení rázové houževnatosti Charpy

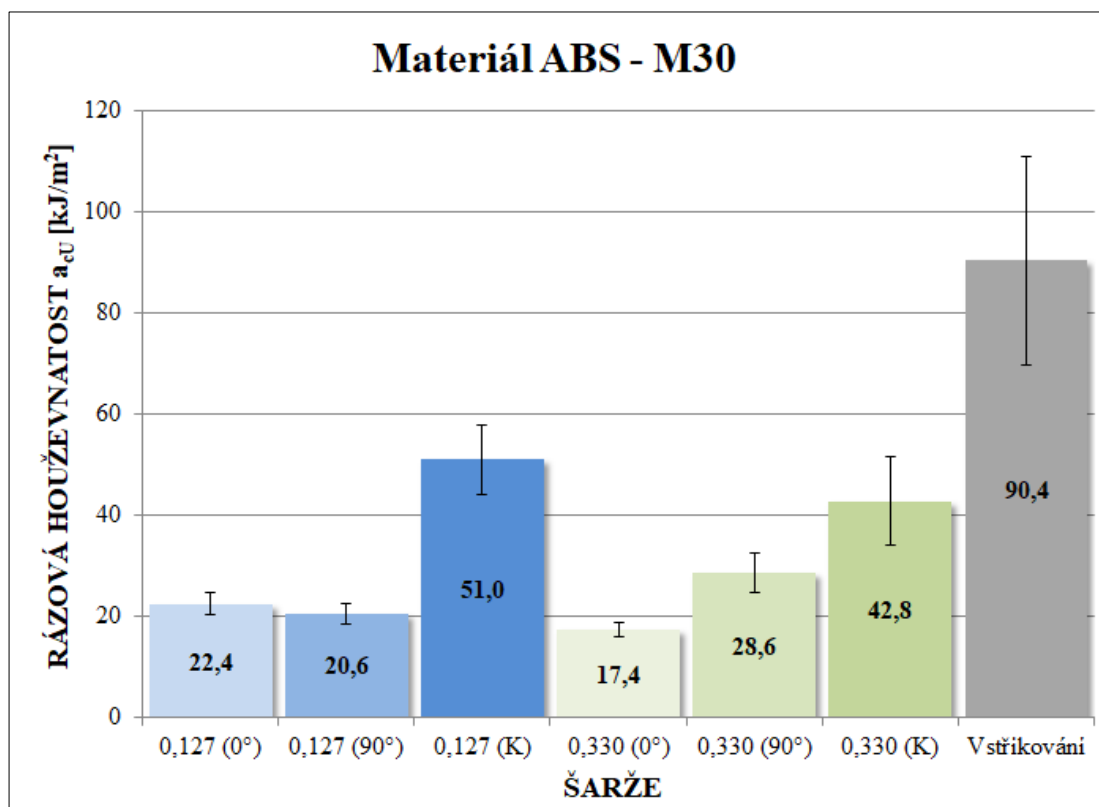
Měření rázové houževnatosti zkušebních vzorků bylo provedeno za definovaných podmínek normou ČSN EN ISO 179 – 1. Získané hodnoty jsou uvedeny v tab. 16 a tab. 17, z kterých byla vytvořena jejich grafická závislost na jednotlivých šaržích vzorků.

Při porovnání **vzorků se stejnou orientací vrstev** je z obr. 61 a obr. 62 patrné, že mezi vzorky 0,127 (0°) a 0,330 (0°) došlo (**při zvětšení tloušťky vrstvy**) k poklesu rázové houževnatosti, zejména u polymerní směsi PC/ABS o cca 22 % (důvodem může být nižší kvalita vyplnění objemu tělesa materiálem). U vzorků s vrstvy orientovanými na výšku došlo naopak k nárůstu rázové houževnatosti s tloušťkou vrstvy o téměř 39 % u materiálu ABS – M30, resp. 30 % u materiálu PC/ABS. Tento opačný efekt může být způsobem nedostatečným vyplněním objemu tělesa materiálem u vzorků s tloušťkou vrstvy 0,330 mm a typem rázu, kdy u vzorků s vrstvy orientovanými na plocho (0°) byl charakter rázu rovnoběžný, zatímco u vzorků s vrstvy orientovanými na výšku (90°) se jednalo o ráz normálový. V případě koncentricky orientovaných vzorků byla u obou šarží materiálu ABS – M30 (s ohledem na velikost směrodatné odchylky) naměřena stejná hodnota rázové houževnatosti. U vzorků z materiálu PC/ABS je rázová houževnatost koncentricky orientovaných vzorků vyšší s rostoucí tloušťkou vrstvy neboť u vzorků 0,330 (K) nedošlo při použití kladiva s nominální energií 5 J k jejich přeražení tak jako u vzorků 0,127 (K). K přeražení nedošlo ani u vstříkovaných vzorků, proto byly tyto vzorky podrobeny rázové zkoušce s nominální energií kladiva 50 J, naměřené průměrné hodnoty rázových houževnatostí z této zkoušky jsou uvedeny v příloze 1 a jsou zapsané v obr. 62. Z výsledků je patrné, že mezi vstříkovanými vzorky a vzorky 0,330 (K) byla naměřena (s ohledem na směrodatnou odchylku) stejná rázová houževnatost, která je o cca 100 % vyšší, než u vzorků 0,127 (K).

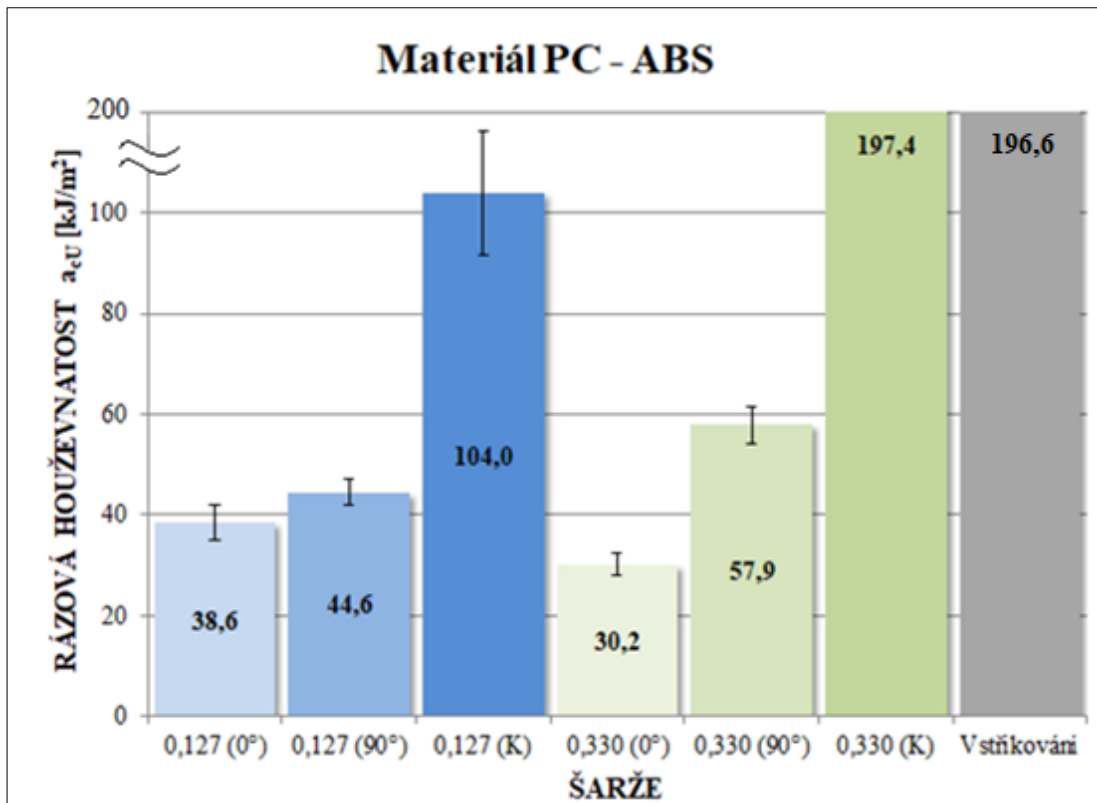
Vliv různé orientace vláken při konstantní tloušťce vrstvy se projevil postupným nárůstem rázové houževnatosti, zejména u vzorků s konstantní vrstvou 0,330 mm. Konkrétně byl tento nárůst mezi vzorky 0,330 (0°) a 0,330 (90°) o 64 % u materiálu ABS – M30, resp. 92 % u materiálu PC/ABS. Nejvyšší rázová houževnatost byla naměřena u vzorků vyrobených vstříkovaním, u kterých je vysoká rázová houževnatost podpořena homogenitou a objemovým zaplněním dílu materiálem. Vstříkovaným dílům se nejvíce přiblížily koncentricky orientované vzorky s rázovou houževnatostí

např. u materiálu ABS – M30 o 44 % nižší (viz obr. 61) a u materiálu PC/ABS byla rázová houževnatost vstříkovaných těles (vzhledem k rozptylu hodnot) stejně vysoká jako u koncentrických vzorků s tloušťkou vrstvy 0,330 mm (viz obr. 62). U šarže 0,330 (K) a u vzorků vstříkovaných z materiálu PC/ABS docházelo k částečnému přeražení i nepřeražení zkušebních těles (viz příloha 2 a příloha 3).

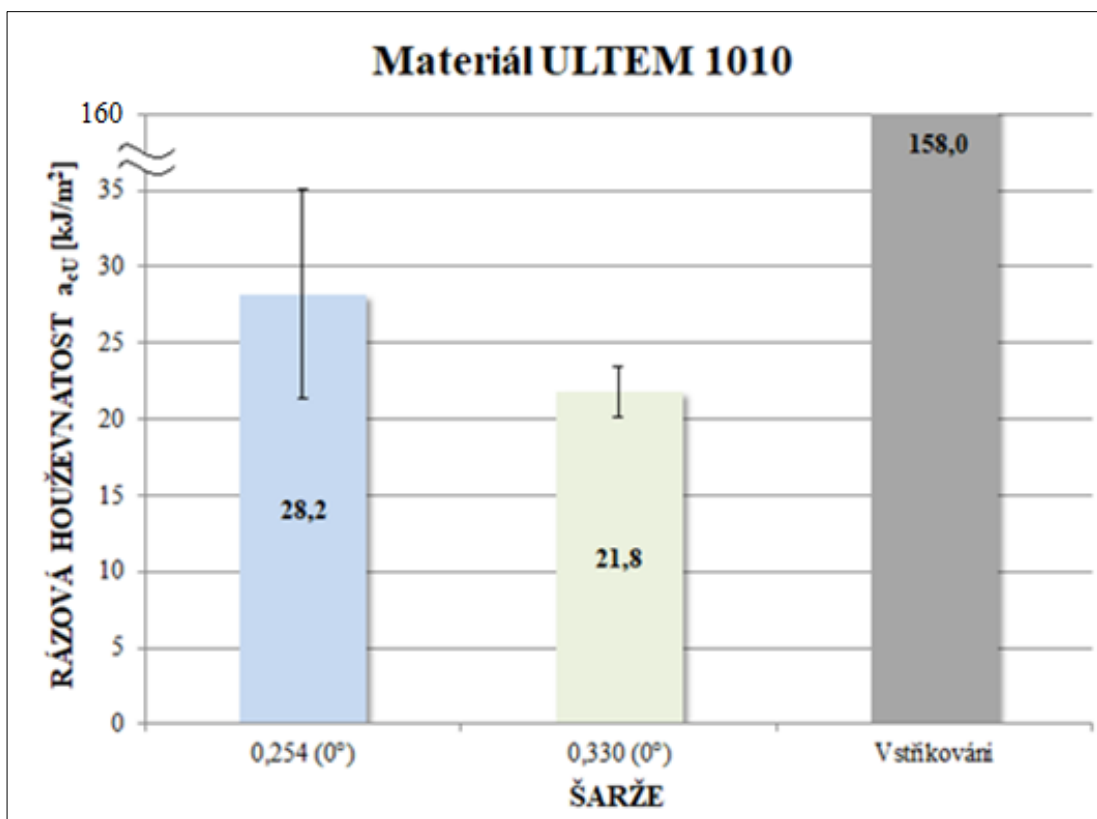
U hodnocení rázové houževnatosti vzorků vyrobených z materiálu **ULTEM 1010** je z obr. 63 patrné, že u vzorků 0,254 (0°) a 0,330 (0°) dochází k náznaku poklesu rázové houževnatosti s rostoucí tloušťkou vrstev. Tento pokles je eliminován velikostí směrodatných odchylek a ze statistického hlediska také není průkazný. Vstříkované vzorky nebyly při hodnocení rázové houževnatosti s nominální energií kladiva 5 J přeraženy. Proto byly tyto vzorky pro získání hodnoty rázové houževnatosti vystaveny rázovému namáhání kladivem s nominální energií 50 J. U všech vstříkovaných těles došlo k jejich úplnému přeražení (viz příloha 1). Jejich průměrná hodnota rázové houževnatosti je o cca 460 % vyšší, než u vzorků vyrobených metodou FDM (viz obr. 63).



Obr. 61 - Porovnání rázové houževnatosti u vzorků z materiálu ABS - M30



Obr. 62 - Porovnání rázové houževnatosti u vzorků z materiálu PC/ABS



Obr. 63 - Porovnání rázové houževnatosti u vzorků z materiálu ULTEM 1010

5 Závěr

Cílem předložené diplomové práce bylo studium materiálových vlastností dílů vyrobených 3D aditivní technologií FDM a jejich následné porovnání s díly zhotovenými konvenčním způsobem vstřikování. Pro experimentální studii byly vybrány materiály ABS, PC/ABS a PEI. U dílů zhotovených pomocí technologie FDM byla posuzována různá tloušťka vrstev materiálu při jejich různé orientaci: na plocho (0°), na výšku (90°) a koncentricky uspořádané (K). Vliv tloušťky vrstev a jejich orientace je podrobně diskutována v kap. 3.2.2. Závěrečná diskuse diplomové práce se zaměřuje především na zhodnocení nejvhodnější geometrii 3D tisku dílů ve vztahu k vstřikovaným dílům z hlediska jejich užitných vlastností.

Při hodnocení **tahových vlastností materiálu ABS – M30** lze konstatovat, že z hlediska meze pevnosti v tahu byly u koncentricky orientovaných vzorků naměřeny lepší hodnoty, než u vzorků vstřikovaných. Vzorky s tloušťkou vrstvy 0,127 mm (koncentrický způsob) vykazují mez pevnosti vyšší o 28 %. Při hodnocení modulu pružnosti se tuhostí vstřikovaným vzorkům opět nejvíce vyrovnávají vzorky s koncentricky orientovanými vrstvami. Naopak žádná z geometrií 3D vzorků nedosahovala hodnoty jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení, které bylo naměřeno u vzorků vyrobených vstřikováním. Tato skutečnost je dána kvalitou zaplnění objemu vzorku materiálem. U **ohybových vlastností** se při hodnocení pevnosti v ohybu pozitivně projeví vzorky s menší tloušťkou vrstvy 0,127 mm a to ve všech svých variantách. Nejvyšší hodnota pevnosti byla naměřena u varianty s koncentrickým uspořádáním 0,127 (K), která vykazovala pevnost v ohybu o cca 23 % menší, než vzorky vstřikované. U této varianty byl naměřen i nejvyšší modul pružnosti, který se však s ohledem na velikost směrodatné odchylky od vzorků 0,127 (0°), 0,330 (90°) a 0,330 (K) příliš neliší. U materiálu ABS – M30 lze tedy konstatovat, že geometrie tisku vrstev 3D dílu (za předpokladu použití minimální tloušťky vrstev) nemá výrazný vliv na jeho ohybové vlastnosti. **Z výsledků rázové houževnatosti** lze konstatovat, že hodnotám vstřikovaných vzorků se opět nejvíce přiblížily vzorky s koncentrickým uspořádáním, avšak zdaleka nedosahují jejich hodnot (rázová houževnatost je o 44 % nižší, než u vzorků vstřikovaných). Tato skutečnost je opět dána kvalitou zaplnění objemu vzorku materiálem, které u 3D dílů není dokonalé.

U vzorků z materiálu **PC/ABS** je z naměřených tahových vlastností zřejmé, že nejlepšími hodnotami všech měřených veličin dosahovaly vzorky s koncentrickým uspořádáním, za předpokladu potlačení vad (nevyplněných prostorů), které při tomto způsobu tvorby vrstev mohou vznikat (v závislosti na geometrii tělesa). Vzorky 0,330 (K) vykazovaly pouze o 9 % nižší hodnotu pevnosti v tahu, než vzorky vstříkované. Podobné hodnoty meze pevnosti mohly dosáhnout i vzorky 0,127 (K) pokud by nedocházelo k jejich předčasnému porušení v důsledku výrobních vad. Při stanovení modulu pružnosti v tahu neovlivňují zmíněné vady výsledky měření (modul pružnosti je měřen pouze v oblasti Hookova zákona), z nichž je zřejmé, že modul pružnosti v tahu je u koncentrických dílů pouze o 9 % nižší, než u vzorků vstříkovaných (obdobně jako u materiálu ABS – M30). Při **hodnocení jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení** se vstříkovaným vzorkům (s ohledem na rozptyl měřených hodnot) vyrovnaly šarže orientované na výšku (90°) i koncentricky (při minimální tloušťce vrstvy). Z výsledků ohybových vlastností vyplývá, že vstříkovaným vzorkům se nejvíce vyrovnaly koncentricky orientované vzorky 0,330 (K), jejich hodnota pevnosti byla pouze o 2 % menší a hodnota modulu pružnosti o 7 % menší. Větší rozdíl pak vykazovaly vzorky 0,127 (90°), které měly hodnotu pevnosti oproti vstříkovaným vzorkům menší o 8 % a modul pružnosti o cca 10 %. **V případě rázové houževnatosti** se vstříkovaným tělesům opět vyrovnaly koncentricky orientované vzorky s tloušťkou vrstvy 0,330 mm, které vykazují (s ohledem na velikost směrodatné odchylky) stejnou hodnotu rázové houževnatosti. Lze konstatovat, že koncentrické vzorky jsou jedinou geometrickou variantou 3D dílu, která se z hlediska tahových vlastností blíží vstříkovaným dílům (obdobně jako u vzorků z materiálu ABS – M30).

Vzorky z materiálu **ULTEM 1010** nevykazovaly při změně tloušťky vrstvy žádné prokazatelné změny v tahových a rázových vlastnostech (s ohledem na rozptyl měřených hodnot). U ohybového namáhání se negativně projevila vyšší tloušťka vrstvy, důvodem je nízká kvalita zaplnění objemu vzorku materiálem. U všech hodnocených veličin dosahovaly nejvyšších hodnot vzorky vyrobené vstříkovaním. Jejich hodnotám se vzorky vyrobené metodou FDM zdaleka nepřiblížily. Na základě zjištěných mechanických vlastností zkušebních vzorků lze konstatovat, že vstříkovaným vzorkům se svými mechanickými vlastnostmi nejvíce přiblížily koncentricky uspořádané vzorky vyrobené metodou FDM. Ty vykazují velmi dobrou

rázovou houževnatost i pevnost v tahu a ohybu, přičemž vliv tloušťky vrstvy je u této geometrie 3D tisku nevýznamný na rozdíl od tisku vrstev na plocho (0°) a na výšku (90°). Naopak celková tažnost je výrazně menší, než u vstříkovaných dílů, a to i přesto, že jsou vstříkované díly zatíženy vnitřní napjatostí, tak jak je zaznamenáno v kap. 3.4.4. Tato skutečnost je dána nedostatečným zaplněním objemu tělesa materiálem.

Použití koncentrického způsobu tisku je značně omezené vzhledem k přítomnosti výrobních vad, které způsobují předčasné porušení součásti při zatížení. Vzhledem k orientaci vrstev a charakteru jejich stavby se lze těmto vadám vyhnout pouze u jednoduchých geometrických tvarů. Z tohoto důvodu lze konstatovat, že koncentricky orientovaná tělesa se sice vyrovnají svými vlastnostmi tělesům vstříkovaným, ale nejsou vhodná pro výrobu složitějších dílů. V případě nutnosti výroby složitějších dílů, je v případě ohybového namáhání možné koncentricky orientované díly nahradit 3D díly s vrstvami orientovanými na výšku (90°). Takto orientované díly odolávají ohybovému namáhání podobně jako tělesa s koncentrickým uspořádáním.

Použitá literatura

- [1] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. Liberec, 2015 [cit. 2018-05-18]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Impresum.html>
- [2] SVOBODA, Rostislav. *Základy technologie vstřikování plastů? S námi je zvládnete* [online]. 2016, 25. února 2016 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/zaklady-technologie-vstrikovani-plastu-s-nami-je-zvladnete/>
- [3] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. Liberec, 2015 [cit. 2018-05-18]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Impresum.html>
- [4] NEUHÄUSL, Emil. *Historie a rozvoj vstřikování plastů v ČR* [online]. 2010, 03.02.2010 [cit. 2018-05-18]. DOI: 100119. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/historie-a-rozvoj-vstrikovani-plastu-v-cr.html>
- [5] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: úvod do vstřikování termoplastů*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [6] SOVA, Miloš. *Orientace makromolekul a vláknitého plniva při vstřikování plastů* [online]. 2015, 6.6.2015 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/orientace-makromolekul-a-vlaknitého-plniva-pri-vstrikovani-plastu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVU4EqQUkSFod1GxXkk4k9vN4rs/?query=anizotropie&serp=1>
- [7] NEUHÄUSL, Emil. *Vady výstřiků – 6. díl, Skryté vady (orientace, struktura, nehomogenita)* [online]. 2010, 18.11.2010 [cit. 2018-05-18]. DOI: 101112. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-6-dil-skryte-vady-orientace-struktura-nehomogenita.html>
- [8] NEUHÄUSL, Emil. *Polymery amorfni a semikrystalické z hlediska vstřikování* [online]. 2012, 15.02.2012 [cit. 2018-05-18]. DOI: 120122. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/polymery-amorfni-a-semikrystalicke-z-hlediska-vstrikovani.html>
- [9] CHALUPA, Michal. *GEOBUSINESS - NOVINKY OD ČÚŽK* [online]. Ostrava, 2012, s. 28 [cit. 2018-05-18]. ISBN 1802-4521. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/images/geobusiness-2012-01-3Dtisk.pdf>
- [10] *3D tisk* [online]. 25. 2. 2013, , 1 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/3d-tisk/>

- [11] VÍTEK, Jan. *3D tisk elektronických obvodů vylepšen pomocí UV světla* [online]. 2017, 15.11.2017 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-elektronicky-obvodu-vylepsen-pomoci-uv-svetla/45521>
- [12] HAJNYŠ, Jiří. *3D tisk kovů: Jak omezit 3D tisk podpurného materiálu* [online]. 2017, 22. 8. 2017 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/2017/08/22/3d-tisk-kovu-jak-omezit-3d-tisk-podpurneho-materialu/>
- [13] Automobilový průmysl. *3D wiser, power of printing* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/vyuziti-v-praxi/automobilovy-prumysl/>
- [14] Používá se už i v Česku ve zdravotnictví k něčemu 3D tisk?. *VŠEOBECNÁ ZDRAVOTNÍ POJIŠŤOVNA* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.vzp.cz/o-nas/tiskove-centrum/otazky-tydne/vyuziti-3d-tisku-ve-zdravotnictvi>
- [15] ŘEŘUCHOVÁ, Ivana. *Porovnání vlastností dílů vyrobených obráběním a pomocí technologie RP*. Liberec, 2016. Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Petr Keller, Ph.D.
- [16] PAJR, Aleš. *ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ ULTEM ZPRACOVANÉ POMOCÍ TECHNOLOGIE 3D TISKU*. Liberec, 2017. Bakalářská práce. Technická Univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Jiří Šafka, Ph.D.
- [17] *Aditivní technologie – metody Rapid prototyping* [online]. Brno [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_technologie_metody_Rapid_Prototyping.pdf
- [18] CHLEBO, Martin. *Budoucnost materiálů pro 3D tisk* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.o3d.cz/3d-tisk/%C5%A1t%C3%ADtky/historie-3d-tisku/>
- [19] *Historie 3D tisku* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/chvistkovad/home/historie-3d-tisku>
- [20] *The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
- [21] *3D-Printable Prosthetic Devices* [online]. 2017, 23.3.2017 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.mkstechgroup.com/category/uncategorized/page/3/>
- [22] ZENKNER, Petr. *3D tisk mění strojírenství, může zrychlit výrobu až o 85 procent. "Tisknou" se první kovové součástky* [online]. 2016, 14. 11. 2016 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://archiv.ihned.cz/c1-65516340-3d-tisk-meni-strojirenstvi>

- [23] HOMOLA, Jan. *Stereolitografie* [online]. 2013, 26. 2. 2013 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/stereolitografie/>
- [24] 3D tisk-metody: Přehled a principy základních metod. *14220* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>
- [25] Solid Ground Curing, SGC. *Manufacturing guide* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/solid-ground-curing-sgc>
- [26] *An Introduction to Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.ielm.ust.hk/dfaculty/ajay/courses/ieem513/RP/RPlec.html>
- [27] *Technologie 3D tisku* [online]. 2006 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/3dtisk.html>
- [28] *Periferie - tiskárny* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: http://talmar.masteride.cz/Modul_EP_pf/EP-vyuka12.html
- [29] *Technologie 3D tisku* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.tisknulevne3d.cz/technologie-3d-tisku>
- [30] *3D visual PROTOTIPOS: PolyJet* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://totalprototipo.com/impresion-3d/tecnologias/61-tecnologia-polyject.html>
- [31] *3d Printing Technologies: Polyjet 3D printing* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.additive-3d.com/technologie-polyjet.html>
- [32] MOLITCH, Michael. *3D HUBS HD UNLOCKS POLYJET IN 350+ LOCATIONS WORLDWIDE* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/63551-63551/>
- [33] Informace o technologiích 3D tisku. *EasyCNC* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku>
- [34] Selective Laser Sintering, SLS: Additive manufacturing method that uses laser sintering for the creation of porous 3D objects. *Manufacturing guide* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls>
- [35] Who Benefits Most From 3D Printing?. *Finnovation PD* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.finnovationpd.com/blog/who-benefits-most-from-3d-printing>
- [36] Selective Laser Sintering: Our Selective Laser Sintering Work. *ProtoCAM* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.protocam.com/additive-manufacturing-services/selective-laser-sintering-sls/>

- [37] HOMOLA, Jan. *Technologie DMLS při opravách forem prostřednictvím 3D tisku kovovým materiálem* [online]. 2013, 23. 8. 2013 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/technologie-dmls-pri-opravach-forem-prostrednictvim-3d-tisku-kovovym-materielem/>
- [38] LOUCKÝ, Milan. *Jak funguje 3D tisk metodou Direct Metal Laser Sintering* [online]. 2015, 9. 3. 2015 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/2015/03/09/jak-funguje-3d-tisk-metodou-direct-metal-laser-sintering/>
- [39] Impression 3D : quelles solutions juridiques ?. *Breese* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://breese.blogs.com/pi/2014/02/impression-3d.html>
- [40] DMLS : Additive Metal Manufacturing. *MING-LI* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.moulds.asia/whats-new/dmls-direct-metal-laser-sintering/>
- [41] Laminated Object Manufacturing, LOM: Additive manufacturing method where the cross section of the detail is cut into a thin material which is then successively glued to the previous layer. *Manufacturing guide* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/laminated-object-manufacturing-lom>
- [42] Sheet Lamination: (LOM, SDL, Electrosonic Welding). *3D iligent* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.3diligent.com/sheet-lamination/>
- [43] HOMOLA, Jan. *Fused Deposition Modeling* [online]. 2013, 18. 9. 2013 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/fused-deposition-modeling/>
- [44] *Fused Deposition Modeling (FDM)* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://ss.whiteclouds.com/3dpedia-index/fused-deposition-modeling-fdm>
- [45] *Přehled technologií 3D tisku* [online]. 09.01.2018 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [46] ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. *Nekonvenční metody obrábění 10. díl* [online]. 2008, 17.12.2008 [cit. 2018-05-18]. DOI: 081207. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
- [47] BELLEHUMEUR, C., et al., Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. *Journal of Manufacturing Process*. 2004, roč. 6, č. 2, s. 170-178
- [48] SUN, Q., G. M. RIZVI, C. T. BELLEHUMEUR a P. GU, Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*. 2008, roč. 14, č. 2, s. 72-80
- [49] *Stratasys: Where Function Meets Form* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/fdm-technology>

- [50] CANESSA. E., et al, Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development. ICTP – The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. 2013. ISBN 92-95003-48-9. Dostupné z: <http://web.archive.org/web/20150402165048/http://sdu.ictp.it/3d/book.htm>
- [51] *Stratasys: ABS-M30* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/search/abs-m30>
- [52] *MATERIÁLY TISKU: Běžně používané materiály* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://3dtisk1.webnode.cz/material-tisku/>
- [53] BENCHOFF, Brian. *PRINTING WITH CLEAR POLYCARBONATE* [online]. 30.10.2011 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://hackaday.com/2011/12/30/printing-with-clear-polycarbonate/>
- [54] Polycarbonate. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 24.6.2016 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Polycarbonate>
- [55] *PC-ABS: Silná kombinace PC a ABS* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy/pc-abs>
- [56] PC-ABS. *Stratasys* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/search/pc-abs>
- [57] *ULTEM* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/ultem/>
- [58] *ULTEM® 1010 Natural 3D printing filament 1,75 mm 500 g* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: https://eshop.svet-3d-tisku.cz/tiskove-struny/ultem-1010-natural-3d-printing-filament-1-75-mm-500-g/?gclid=CjwKCAjwwuvWBRBZEiwALXqjwy_yGxu2Epr4lnWfnOc-X19hFg2kFaRSjuIMna6Gm-JmNgOW7Pji9hoCes4QAvD_BwE
- [59] *Ultem 1010* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/search/ultem1010>
- [60] *Co je stl soubor a jak otevřít soubor stl ?* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.openthefile.net/cs/extension/stl>
- [61] FORTUS 380MC AND FORTUS 450MC. *Stratasys* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/fortus-380mc-450mc>
- [62] Laboratoř zpracování plastů. *Katedra strojírenské technologie TUL* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/laborator-zpracovani-plastu>

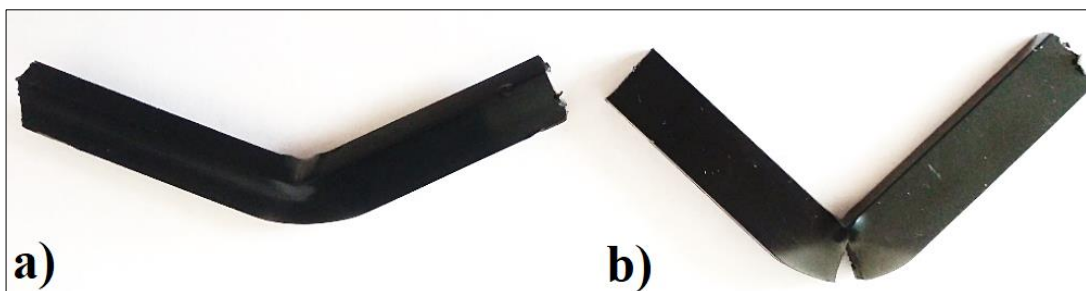
- [63] BUREŠ, Bedřich. *Základy zpracování polymerů: Průvodní jevy při vstřikování termoplastů* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/1914554/>
- [64] *Vnitřní napětí v plastovém výrobku* [online]. 2013, 13.02.2013 [cit. 2018-05-18]. DOI: 130142. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vnitri-napeti-v-plastovem-vyrobku.html>
- [65] *Vady výstřiků: 5. díl Skryté vady (vnitřní pnutí)* [online]. 2010, 20.10.2010 [cit. 2018-05-18]. DOI: 101017. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-5-dil-skryte-vady-vnitri-pnuti.html>
- [66] ČSN EN ISO 527-1,2. Plasty – Stanovení tahových vlastností. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. Třídící znak 64 0604.
- [67] ČSN EN ISO 178. Plasty – Stanovení ohybových vlastností. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak 64 0607.
- [68] ČSN EN ISO 179-1. Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. Třídící znak 64 0612.

Seznam příloh

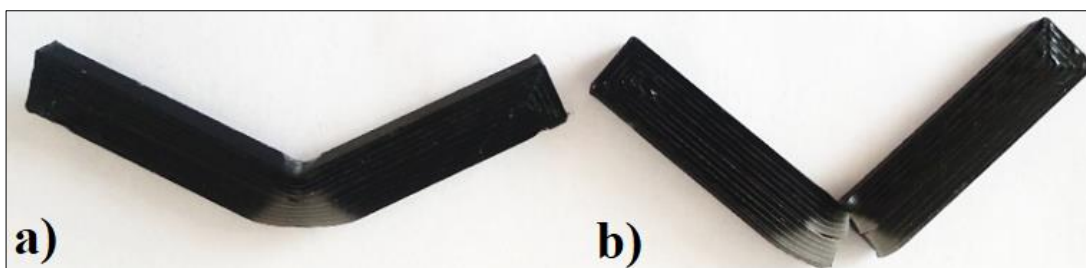
| | |
|---|----|
| Příloha 1 - Hodnoty rázové houževnatosti s použitím 50 J kladiva..... | 85 |
| Příloha 2 – Vstříkované vzorky z materiálu PC/ABS, a) nepřeražený vzorek, b) částečně přeražený vzorek | 85 |
| Příloha 3 – Vzorky 0,330 (K) z materiálu PC/ABS, a) nepřeražený vzorek, b) částečně přeražený vzorek | 85 |

| RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST CHARPY (50 J) | | | | | | |
|-----------------------------------|------------------|-------------|--------------------|-------------|------------------|-------------|
| Material | PC/ABS Stratasys | | | | PEI (ULTEM 1010) | |
| Šarže | 0,330 K | | Vstříkované | | Vstříkované | |
| Vzorek | Ec [J] | acU [kJ/m2] | Ec [J] | acU [kJ/m2] | Ec [J] | acU [kJ/m2] |
| 1 | 6,62 | 151,98 | 9,72 | 234,25 | 8,74 | 213,35 |
| 2 | 5,81 | 133,38 | 7,67 | 184,85 | 8,08 | 197,24 |
| 3 | 9,30 | 213,50 | N | | 5,97 | 145,73 |
| 4 | N | | 9,01 | 217,14 | 6,54 | 159,65 |
| 5 | 10,13 | 232,56 | 6,83 | 164,60 | 5,47 | 133,53 |
| 6 | 10,19 | 233,94 | N | | 5,41 | 132,06 |
| 7 | 9,87 | 226,59 | 7,64 | 184,12 | 6,01 | 146,71 |
| 8 | 8,26 | 189,63 | N | | 5,93 | 144,76 |
| 9 | N | | N | | 5,24 | 127,91 |
| 10 | N | | 8,08 | 194,73 | 7,32 | 178,69 |
| ∅ | 8,6 | 197,4 | 8,2 | 196,6 | 6,5 | 158,0 |
| zápis dle ČSN ISO 179-1 | 197,4 P* | | 196,6 P* | | 158,0 | |
| směr. odchylka | 40,6 | | 25,1 | | 29,2 | |
| ∅ šířka vzorku [mm] | 10,13 | | 10,17 | | 10,14 | |
| ∅ tloušťka vzorku [mm] | 4,30 | | 4,08 | | 4,04 | |
| TYP PŘERAŽENÍ | ÚPLNÉ PŘERAŽENÍ | | ČÁSTEČNÉ PŘERAŽENÍ | | NEPŘERAŽENO | |

Příloha 1 - Hodnoty rázové houževnatosti s použitím 50 J kladiva



Příloha 2 – Vstříkované vzorky z materiálu PC/ABS, a) nepřeražený vzorek, b) částečně přeražený vzorek



Příloha 3 – Vzorky 0,330 (K) z materiálu PC/ABS, a) nepřeražený vzorek, b) částečně přeražený vzorek