



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

3D FDM TISKÁRNA REPRAP A PARAMETRY TISKU

3D FDM PRINTER REPRAP AND PARAMETERS OF PRINT

DIPLOMOVÁ/BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ KRATOCHVÍL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMČÍK, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tomáš Kratochvíl

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

3D FDM tiskárna reprop a parametry tisku

v anglickém jazyce:

3D FDM printer reprop and parameters of print

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Součástí práce je stavba 3d tiskárny z rodiny reprop, její následné oživení a testy. Autor rovněž zvolí vhodné materiály pro tisk, na základě jejich charakteristik a provede testy směřující k volbě optimálních technologických podmínek. Výsledkem práce budou doporučené technologické podmínky pro 3D tisk pro zvolený materiál.

Cíle diplomové práce:

- rešerše fdm tisku
- rešerše tiskáren reprop
- rešerše materiálů pro FDM tisk
- stavba 3D tiskárny
- testy technologických podmínek
- vyhodnocení testů a doporučení autora

Seznam odborné literatury:

1. CHUA, C.K., K.F. LEONG a C.S. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.
2. WANG, Wego. Reverse Engineering: Technology of Reinvention. 1. vyd. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2011, 322 s. ISBN 978-1-4398-0630-2.
3. HECHT, Jeff. Dawn of the self-replicating machine. The New Scientist. roč. 198, č. 2659, s. 28.
4. NORTON, Robert L. Cam design and manufacturing handbook. New York: Industrial Press, 2002, 610 s. ISBN 0-8311-3122-5.
5. BILÍK, Oldřich a Martin VRABEC. Vrabec Martin Technologie obrábění s využitím CAD/CAM systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská-Technická univ., 2002, 128 s. ISBN 80-248-0034-9.
6. PLCHOVÁ, Anna a Michal KOLESÁR. Moderní metody v konstrukční praxi. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004, 66 s. ISBN 80-248-0538-3.
7. PABLA, B.S. a M. ADITHAN. CNC Machines. 2. vyd. New Delhi: New Age International, 2008, 140 s. ISBN 9788122420197.
8. PÍŠKA, Miroslav et al. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009, 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

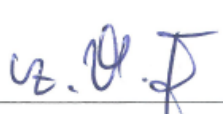
Vedoucí diplomové práce: Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 21.11.2014




prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu


doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Tato práce shrnuje současné poznatky o domácím 3D tisku technologií FDM. Podstatou práce je demonstrovat nabyté znalosti formou stavby 3D tiskárny, která je schopná částečné sebereplikace, a zhodnocení jejich technologických parametrů. Experimentální část je zaměřena na vliv změny technologických podmínek při tisku na mechanické vlastnosti vytištěné součásti.

Klíčová slova

3D tisk, FDM, RepRap, tahová zkouška

ABSTRACT

This master thesis summarizes the current knowledge about non-commercial 3D printing FDM technology. The goal of this thesis is to demonstrate the gained knowledge by building a 3D printer which can partially replicate itself, and to evaluate its technological parameters. The experimental part of this work is focused on the impact of the changes in technological parameters of printing on mechanical properties of printed parts.

Key words

3D printing, FDM, RepRap, tensile test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRATOCHVÍL, T. *3D FDM tiskárna reprop a parametry tisku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 72 s, 4 přílohy, CD. Vedoucí diplomové práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **3D FDM tiskárna rebrap a parametry tisku** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Tomáš Kratochvíl

PODEKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu doktoru Oskarovi Zemčíkovi za cenné konzultace, které mi poskytl při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl tímto poděkovat panu inženýrovi Marku Zbončákovi, za pomoc se sběrem dat pro praktickou část této práce.

OBSAH

ABSTRAKT	5
PROHLÁŠENÍ	7
PODĚKOVÁNÍ.....	8
OBSAH.....	9
ÚVOD	12
1 RAPID PROTOTYPING A ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	13
1.1 RAPID PROTOTYPING	13
1.2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	13
1.2.1 SLA	13
1.2.2 SLS	13
1.2.3 METODA FDM	14
1.2.4 3DP	14
1.3 REPRAP	15
1.3.1 HISTORIE PROJEKTU REPRAP.....	15
1.3.2 GENERACE TISKÁREN REPRAP.....	16
2 STAVBA 3D TISKÁRNY	20
2.1 TISKÁRNA PRUSA I3 HEPHESTOS	20
2.2 DÍLČÍ KOMPONENTY 3D TISKÁRNY	21
2.2.1 TISKOVÁ HLAVA.....	21
2.2.2 KROKOVÝ MOTOR	23
2.2.3 RAMPS 1.4	24
2.2.4 KONCOVÝ SPÍNAČ	25
2.2.5 INFORMAČNÍ DISPLAY	25
3 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY TISKU	26
3.1 PŘÍMÉ PARAMETRY.....	26
3.1.1 VÝŠKA VRSTVY	26
3.1.2 MNOŽSTVÍ VYLUČOVANÉHO MATERIÁLU	28
3.1.3 POHYB.....	28
3.2 NEPŘÍMÉ PARAMETRY TISKU	28
3.2.1 ORIENTACE MODELU	28
3.2.2 PODPORA	29
3.2.3 VNĚJŠÍ STĚNY TĚLESA	29
3.2.4 VÝPLŇ	30
3.2.5 MOST.....	31

3.2.6	KRAJNICE	31
3.2.7	LEM.....	31
3.2.8	TISKOVÁ PODLOŽKA	32
3.3	FORMÁT .STL	32
3.4	SOFTWARE PRO GENEROVÁNÍ G-KÓDŮ	32
3.4.1	SKEINFORGE.....	32
3.4.2	SLIC3R.....	33
3.5	SOFTWARE PRO KOMUNIKACI S 3D TISKÁRNOU.....	34
4	MATERIÁLY.....	35
4.1	MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ	35
4.1.1	VISKOELASTICITA.....	36
4.1.2	CREEP	37
4.1.3	TEPLOTA SKELNÉHO PŘECHODU	38
4.2	ABS.....	39
4.2.1	ABS A1.....	40
4.3	PLA	40
4.4	PET	40
4.5	HIPS.....	41
4.6	PVA.....	41
4.7	NYLON.....	41
4.8	SHRNUTÍ VLASTNOSTÍ	42
5	CÍL EXPERIMENTU A JEHO REALIZACE.....	44
5.1	ZKOUŠKA TAHEM.....	44
5.1.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA DLE ISO 527	45
5.1.2	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ	46
5.1.3	LABORATORNÍ PODMÍNKY	47
5.2	MĚŘENÉ PARAMETRY TISKU	47
5.2.1	MATERIÁL A VLIV TEPLIT	47
5.2.2	VLIV VÝŠKY VRSTVY	48
5.2.3	VLIV DRAH	49
5.3	SHRNUTÍ MĚŘENÝCH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ ...	53
6	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT.....	54
6.1	MEZ PEVNOSTI V TAHU	54
6.1.1	VLIV ZÁVISLOSTI MEZE PEVNOSTI NA TLOUŠTCE VRSTVY	54
6.1.2	VLIV TEPLIT TISKU NA MEZ PEVNOSTI V TAHU	55
6.1.3	PODÍL TVÁRNÉHO A KŘEHKÉHO LOMU.....	56
6.2	TAŽNOST	58

6.2.1 SROVNÁNÍ TAŽNOSTI S PLA, ABS, ABS A1	61
DISKUSE.....	63
ZHODNOCENÍ ZÁVISLOSTI PARAMETRŮ TISKU NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI	63
EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PROVOZU TISKÁRNY	64
NÁKLADY NA HODINU PROVOZU TISKÁRNY.....	64
JEDNOTKOVÝ ČAS TISKÁRNY	64
DÁVKOVÝ ČAS TISKÁRNY	64
JEDNICOVÉ NÁKLADY PROVOZU STROJE	64
DÁVKOVÉ NÁKLADY PROVOZU STROJE	65
REŽIJNÍ NÁKLADY NA PROVOZ STROJE.....	65
OPERAČNÍ NÁKLADY	65
ZHODNOCENÍ VYUŽITELNOSTI 3D TISKÁRNY REPRAP	66
DOPORUČENÍ AUTORA	66
NÁVRHY POKRAČOVÁNÍ ŘEŠENÍ.....	66
ZÁVĚR	67
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	68
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	70
SEZNAM ZKRATEK.....	70
SEZNAM SYMBOLŮ.....	70
SEZNAM PŘÍLOH	72

ÚVOD

V 80. letech 20 století se na světě začali objevovat první aditivní technologie. Na rozdíl od do té doby konvenčních metod založených na ubírání materiálu, aditivní metody materiál přidávají malá množství materiálu na požadovaná místa a vytvářejí tak celkový objekt. Veškeré tyto technologie a jejich inovativní zlepšení, však byly vždy patentovány firmami, které si dodnes udrželi pozice lídrů v oboru. Pořizovací ceny těchto komerčních zařízení využívajících aditivní technologie však byly téměř astronomické.

V roce 2005, když začala vyprchávat platnost prvních patentů, se však začali objevovat pokusy o vytvoření domácích tiskáren, které by se daly zhotovit z volně dostupných komponent. O tři roky později se povedlo sestavit funkční tiskárnu, která byla schopná vytisknout většinu důležitých dílů, ze kterých šlo sestavit další 3D tiskárnu. Od tohoto okamžiku dochází k postupnému rozvoji domácího 3D tisku, který trvá dodnes.

Zatímco technologické parametry a využití tiskáren se mohly vyvíjet na akademické půdě a v průmyslové praxi, jsou nekomerční tiskárny pořád na počátku vývoje, protože komerční sféra má náskok 20let. Vývoj domácích tiskáren od vydání verze i3 jde však neodvratným tempem vpřed, a dá se očekávat, že časový náskok ve vývoji bude postupně smazáván.

Tato práce má za úkol shrnout problematiku domácího 3D tisku. Demonstrovat nabyté znalosti stavbou tiskárny a shrnout je do uceleného celku.

Součástí práce má být experiment spočívající v ověření mechanických vlastností dílů vytištěných různými parametry na domácí 3D tiskárně z vhodně zvoleného materiálu.

1 RAPID PROTOTYPING A ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

1.1 Rapid prototyping

Obor zabývající se rychlou výrobou prototypů se nazývá rapid prototyping (RP). Hlavní výhodou této technologie je rychlost výroby prvních kusů ve srovnání s konvenčními technologiemi. Jediným potřebným vstupem je 3D model, který je ve vhodném softwaru převedena na data pro stroj, který se následně postará o fyzickou realizaci modelu.

Bohužel i přes pokroky moderních technologií mají technologie RP svá omezení, jako například přesnost, druhy používaných materiálů, a kvalitu povrchu. To je dáno tím, že například aditivní technologie jsou založeny na nanášení vrstev keramiky, vosku, nebo plastů na sebe za účelem vytvoření celkového objektu, zatímco konvenční technologie založené na odebírání materiálu tyto limity nemají, a lze najít vhodné inženýrské řešení. Je však výhodné a někdy dokonce nezbytné, vytvořit několik prototypů před zahájením sériové výroby pro analýzu jejich skutečných vlastností (například jednotlivé komponenty letadla v aerodynamickém tunelu) [1].

1.2 Aditivní technologie

Jako aditivní technologie lze označit veškerou výrobu výrobků, které nejsou vyrobeny konvenčním odebíráním materiálu, ale nanášením jednotlivých vrstev materiálu na sebe. Vstupem je virtuální model vytvořený v CAD systému, který je následně v CAM systému nařezán na tenké vrstvy, které jsou přeneseny na stroj ve formě G-kódu [1].

1.2.1 SLA

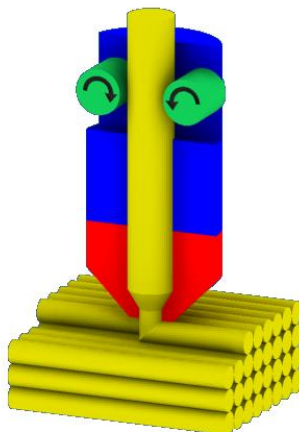
První technologií RP která byla na dostatečné úrovni, aby se pro ni našlo komerční uplatnění je Stereolitografie (SLA). Tato technologie byla patentována v roce 1986. Stereolitografie využívá principu vytvrditelnosti speciálních materiálů při ozařování ultrafialovým světlem (UV). Jednotlivé vrstvy jsou postupně po vytvrzení posunuty o krok (obvykle 0,05-0,15 mm) níže v nádrži s tekutým fotopolymerem. SLA poskytuje velmi přesné výrobky s kvalitním povrchem. Nevýhodou jsou však špatné mechanické vlastnosti vytištěných materiálů, které nejsou dostatečně pevné. Technologie je proto vhodná pro pohledové díly [1].

1.2.2 SLS

Technologie Selective Laser Sintering (česky: selektivní spékání laserem) byla patentována v roce 1989. Jak vyplývá z názvu, technologie spočívá ve spékání práškových materiálů laserem, které jsou na sebe postupně vrstveny. Spékací teplota se pohybuje nad poloviční hodnotou teploty tavení a teplotou tavení. Spékáním jsou dvě a více práškových částic materiálu svařovány k sobě čímž je vytvořen pevný objekt. Ve srovnání s SLA jsou výrobky přesnější a pevnější. Povrch součástí je velmi porézní a výrobky nejsou příliš hezké na pohled. Pro tuto technologii se z materiálů nejvíce hodí nylon nebo polystyren [1].

Z této metody vychází metoda DMLS (direct metal laser sintering), ve které je spékán práškový kov.

1.2.3 Metoda FDM



Obr. 1. Princip metody FDM.

Fused Deposition Modeling (dále jen jako FDM), je technologická metoda která dokáže vytvořit komplexní geometrická tělesa v přijatelném časovém horizontu. Spočívající ve vytváření tenkých vrstev z roztaveného materiálu, které jsou na sebe postupně nanášeny, dokud není dosaženo výsledného tvaru. Vstupní materiál ve formě tenkých cívek, nebo prášků je roztaven tiskové hlavě, odkud je vytlačován malým otvorem na cílový povrch. Oproti technologiím SLA nebo SLS je možné použít širší spektrum materiálů. Mezi nejběžněji tisknuté materiály patří polymery ABS, PLA, nylon, PET, ale technologie umožňuje tisk vosků, keramických hmot. Díly vytištěné metodou FDM jsou díky silným vazbám mezi jednotlivými vrstvami vhodné pro výrobu funkčních dílů. Nevýhodou technologie je špatný povrch součástí. Na vytištěných dílech jsou vidět jednotlivé vrstvy a na vodorovných plochách jde vidět dráha nástroje [1, 6].

FDM technologii vyvinul v roce 1989 S. Scott Crump, který si ji později nechal patentovat. Komerčně se začala využívat v 90. letech. Největším problémem byla cena těchto tiskáren [6].

1.2.4 3DP

Technologie 3DP (three dimensional printing) tiskne objekty z práškového materiálu který je slepován v jeden celek. Tisková hlava přejíždí nad urovnanou hladinou materiálu a vypouští drobné kapičky vody či lepidla, které se při kontaktu s materiálem spojují v tištěný objekt. Výhodou metody je snadná možnost obarvit tištěný výrobek dle potřeby. 3DP umožňuje tisknout objekty např. ze škrubu, sádry, keramických hmot, a kovových prášků. Vytištěné díly neoplývají velkou pevností a nejsou vhodné pro výrobu funkčních dílů.

1.3 RepRap

Je projekt původem z Velké Británie, jenž si kladl za úkol vytvořit 3D tiskárnu, která by si mohla vytvořit většinu komponent sama. Zkratka je odvozena z anglického replicating rapid prototyper [7].

1.3.1 Historie projektu RepRap

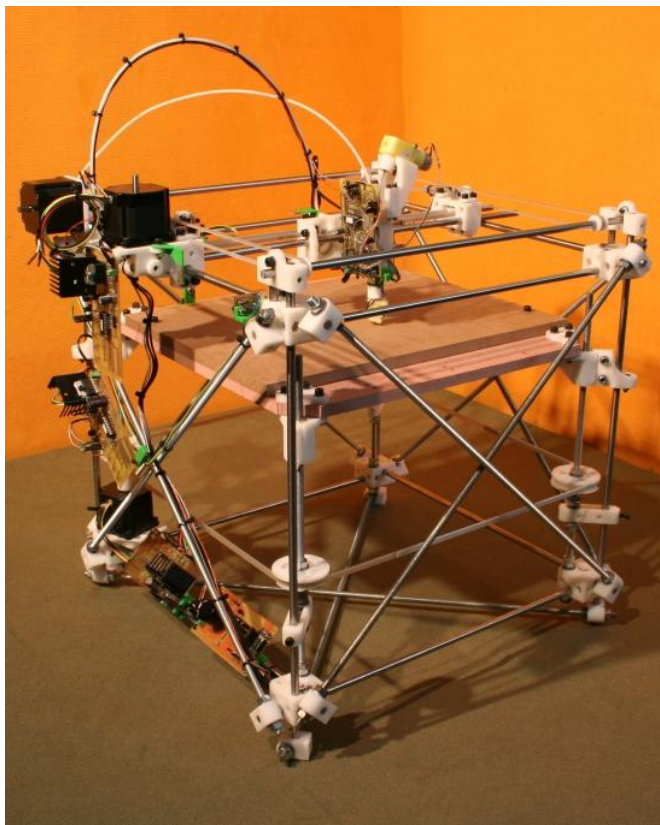
Stručné shrnutí historie projektu [7]:

- 23. 3. 2005 - Byl založen blog věnující se této problematice Dr Adrianem Bowyerem z Univerzity v Bathu ve Velké Británii.
- 13. 9. 2006 - Prototyp RepRap 0.2 úspěšně vytisknul první část, která mohla nahradit originální díl vytištěný na komerční 3D tiskárně.
- 9. 2. 2008 – Tiskárna RepRap 1.0 „Darwin“ úspěšně vytisknula polovinu plastových součástek.
- 14. 4. 2008 – Pravděpodobně první vytisknutý předmět pro koncového uživatele. Držák telefonu do auta.
- 29. 5. 2008 – RepRap tiskárna poprvé stvořila druhou tiskárnu.
- 23. 9. 2008 – Na světě je minimálně dalších 100 tiskáren.
- 13. 10. 2009 – Dokončena druhá generace tiskáren – RepRap 2.0 „Mendel“
- září 2012 – Dokončena verze tiskárny Prusa i3.

1.3.2 Generace tiskáren RepRap

1.3.2.1 RepRap 1.0 Darwin

První generace tiskáren byla vytvořena v roce 2008. Šlo o úplně první tiskárnu na světě, která byla schopná sebereplikace. Darwin se skládá z rámu ze závitových tyčí a dílů, které drží tyče pohromadě, pracovního stolu který se pohybuje vertikálně uvnitř rámu v ose Z. Dále ze dvou tiskových hlav umístěných nad horní stěnou rámu, které se pohybují v ose X a Y. Tištěný objekt se při tisku posouvá spolu se stolem dolů, vrstvu po vrstvě [8].



Obr. 2. 3D tiskárna RepRap 1.0 Darwin [8].

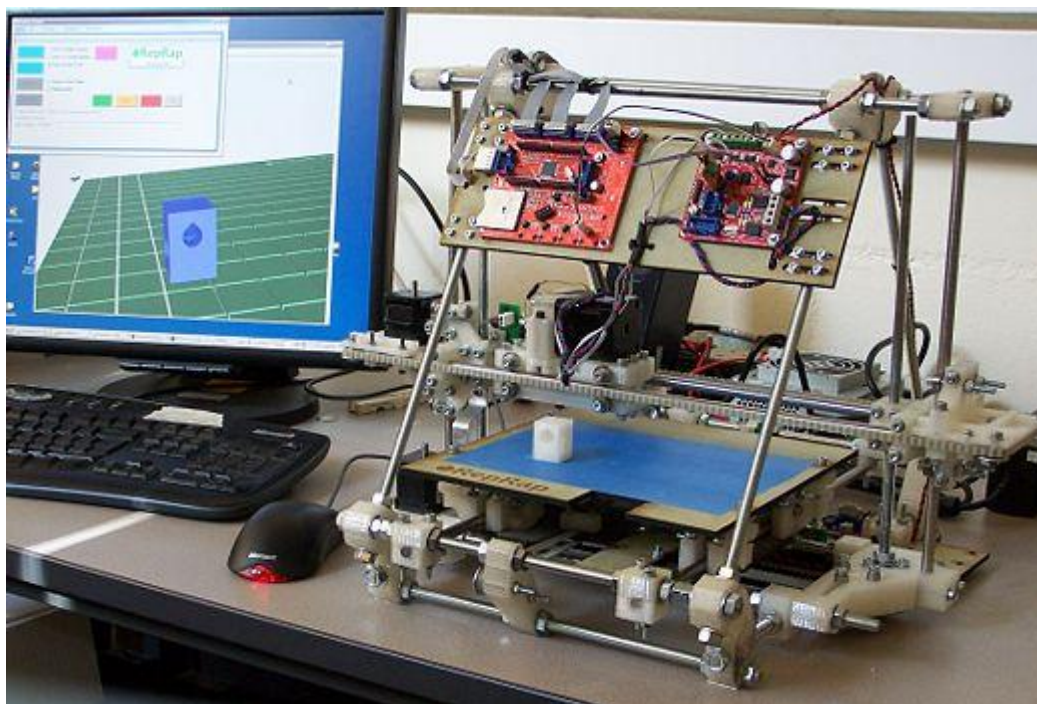
Parametry tiskárny RepRap 1.0 Darwin [8]

- Pracovní objem - 230 x 230 x 100 (Z)
- Motory - NEMA 23
- Přesnost v osách XY - 0,1 mm
- Počet tiskových hlav - 2 (materiál a podpora)
- Vnější rozměry - 600 x 520 x 650 (v) mm
- Váha – 14 kg

1.3.2.2 Mendel

Druhá generace tiskáren přišla s jiným uspořádáním os. Stůl se hýbe pouze v ose Y, zatímco tisková hlava se nyní pohybuje v ose X a Z.

Mezi hlavní přednosti tiskárny patří větší tisknutelný objem, mnohem jednodušší montáž, lepší organizace pracovních os a z toho vyplývající tuhost tiskárny [9].



Obr. 3. 3D tiskárna Mendel [9].

Parametry tiskárny Mendel [9]

- Pracovní objem - 200 x 200 x 140 (Z) mm
- Váha – 7 kg
- Přesnost v osách XY - 0,1 mm
- Rychlost tisku – 15 cm³ / hod
- Vnější rozměry - 500 x 400x 360 (v) mm
- Objem vytištěných částí - 1110 cm³

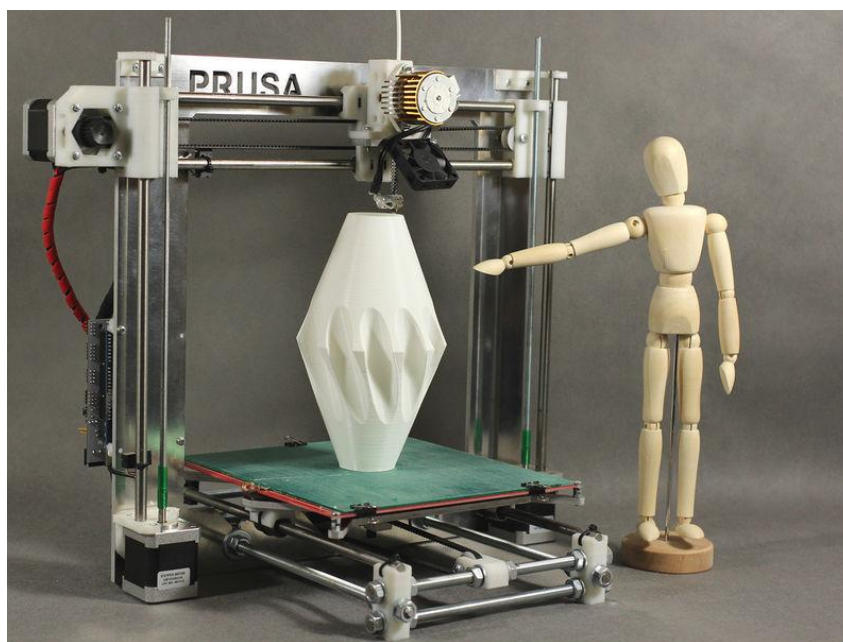
1.3.2.3 Prusa i3

Jedná se nejrozšířenější tiskárnu z rodiny RepRap. Autorem této tiskárny je přední český vývojář tiskáren Josef Průša.

Mezi hlavní přednosti patří vyšší tuhost rámu a značně zjednodušená montáž proti tiskárně Mendel [10].

Vydání tiskárny pod GPL licencí mělo za následek vznik velké řady modifikovaných tiskáren, z jinými díly, z jiných materiálů, jinou montáží. Tyto tiskárny se však z funkčního hlediska považovány za typ Prusa i3.

Existují dva základní druhy rámu tiskárny a to s hliníkovým rámem z plechu o tloušťce 6mm, nebo krabicová konstrukce vyrobená ze dřeva. Krabicová konstrukce byla vymyšlena, pro zachování reppap principu, jelikož se dá vyrobit v domácím prostředí se základním nářadím na práci s dřevem. Naproti tomu hliníkový rám je tužší a vypadá profesionálněji, ale musí být vyroben na obráběcím stroji (laserem, vodním paprskem, frézováním). Prusa i3 také většinou obsahuje vyhřívanou podložku, která usnadňuje tisk materiálu ABS [10].



Obr. 4. 3D tiskárna Prusa i3 [10].

Parametry tiskárny Prusa i3 s hliníkovým rámem [10]

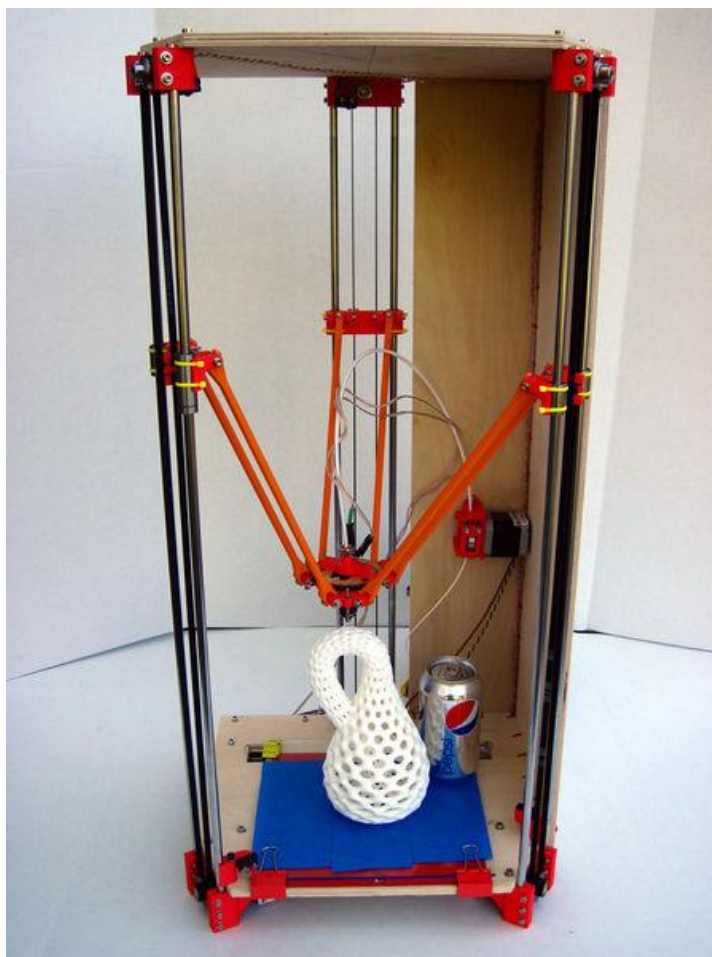
- 26 plastových částí
- Nevytištěných součástek (přibližně) - 337
- Cena – 300 až 1000 \$
- Elektronika - téměř celá RepRap
- Pracovní objem - 200 x 200 x 200 mm
- Motory - 5x Nema 17
- Rám materiálu – 6 mm tlustý hliníkový plech

1.3.2.4 Rostock

Tento prototyp z roku 2012 otevřel novou kategorii 3D tiskáren RepRap zvanou delta a položila základ pro tiskárny Kossel, Delta-Pi, Cerberus, a mnoho dalších. Tiskárna používá paralelní kinematický mechanismus, jehož výhodou jsou větší zrychlení a rychlosti tiskové hlavy, než u klasických mechanismů se sériovou kinematikou.

Parametry tiskárny Rostock [11]

- Tiskový prostor – 200 x 200 x 400 mm
- Pevný stůl - 200 x 200 mm
- Hmotnost koncového efektoru s tryskou je menší než 50gramů
- Rychlost polohování až 800 mm ve všech třech osách
- Je složená z méně než 200 dílů

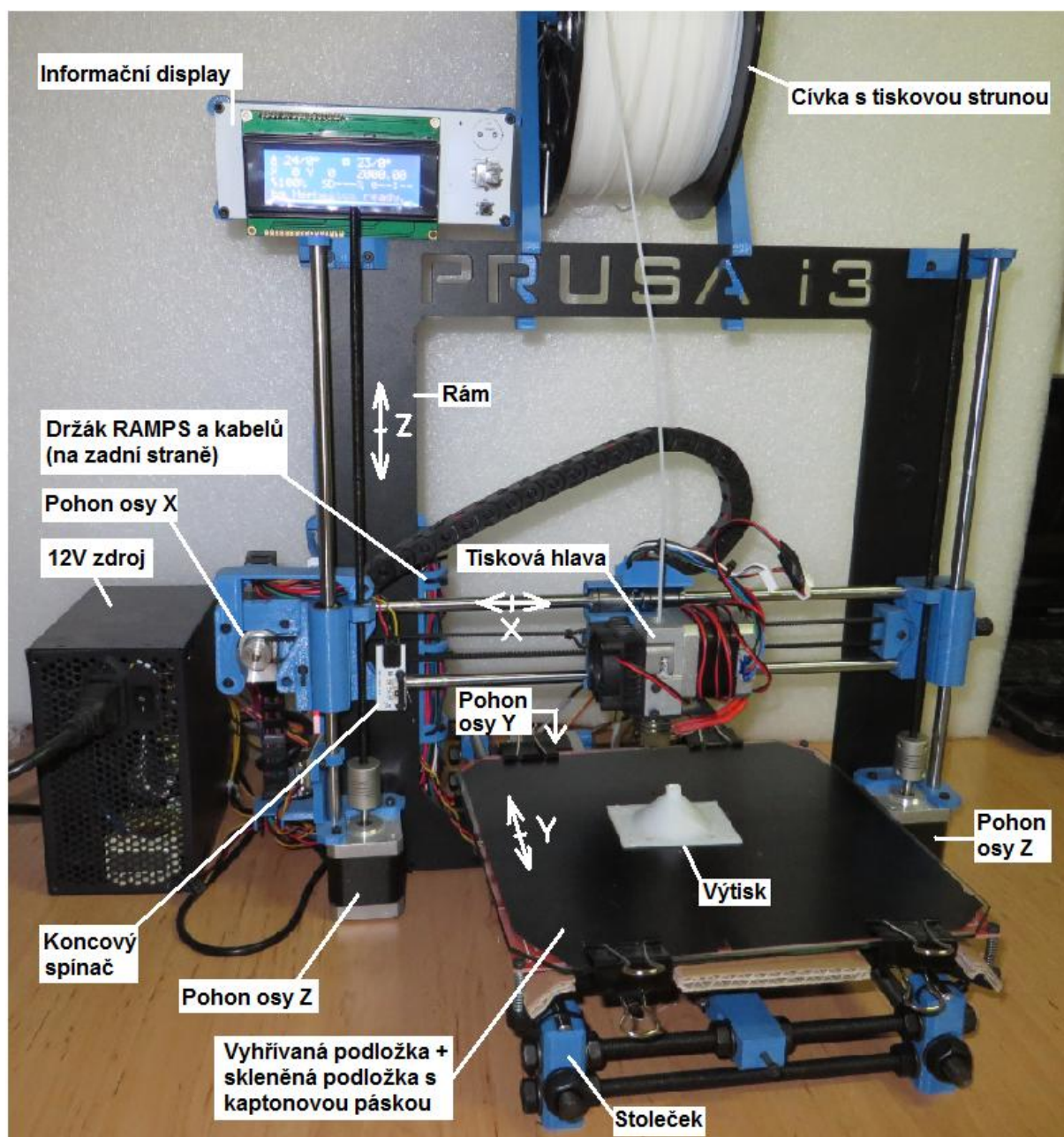


Obr. 5. 3D tiskárna Rostock [11].

2 STAVBA 3D TISKÁRNY

2.1 Tiskárna Prusa i3 Hephestos

Pro samostatnou stavbu byla vybrána tiskárna Prusa i3 Hephestos. Tuto tiskárnu je možné nakoupit jako stavebnici přímo od firmy BQ, nebo je možné ji postavit z jednotlivých komponent. Modely plastových dílů si lze stáhnout přímo ze stránek výrobce, a vytisknout si je na jiné tiskárně. Tento typ tiskárny proto splňuje princip RepRap tiskárny.



Obr. 6. Popis 3D tiskárny Prusa i3 Hephestos.

Mezi hlavní přesnosti této verze patří dle výrobce velká přesnost (výška vrstvy až 0,05 mm), velký tiskový prostor 215 x 210 x 180 mm, slušná rychlost tisku

(maximální doporučená 80-100 mm), dobře uspořádané kabely a dobře popsaná montáž [13].

Nevýhodou této tiskárny je absence vyhřívané podložky, špatná kvalita plastových dílů ve stavebnici, hlučná lineární ložiska a chyby v návodu. Celková montáž tiskárny trvala asi 24hodin, které byly většinou stráveny pilováním špatně vytištěných plastových dílů. Další čas zabralo řešení jiných technických problémů, jako třeba ucpaný vstup do trysky, špatný firmware nahraný na desku plošných spojů atd.

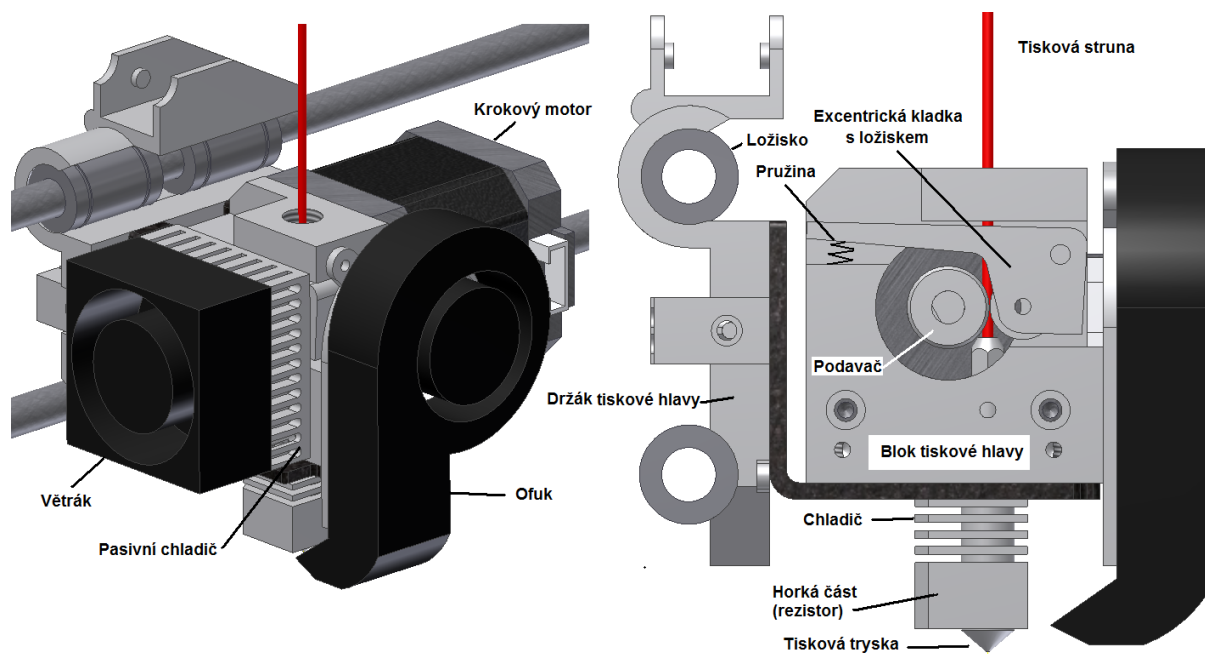
2.2 Dílčí komponenty 3D tiskárny

2.2.1 Tisková hlava

Tisková hlava, často též nazývaná extruder (z anglického extrude-vylučovat), patří mezi nejdůležitější součásti 3D tiskárny. Skládá se ze studené části a horké části.

Studená část slouží k dávkování vstupního materiálu a jeho posunu směrem do horké části. Rychlost posuvu vstupního materiálu je řízena krokovým motorem. Některé typy podavačů bývají zpřevodovány pro dosažení optimálního výsledku.

Horká část slouží k zahřátí vstupního materiálu na požadovanou teplotu tavení v tepelné komoře a vyloučit ho malým otvorem ve výstupní trysce. Průměr výstupního otvoru trysky se nejčastěji pohybuje v hodnotách $\varnothing 0,3 \text{ mm} - 1 \text{ mm}$. Ohřev horké části zajišťuje rezistor. Teplota horkého konce je snímána termistorem, který



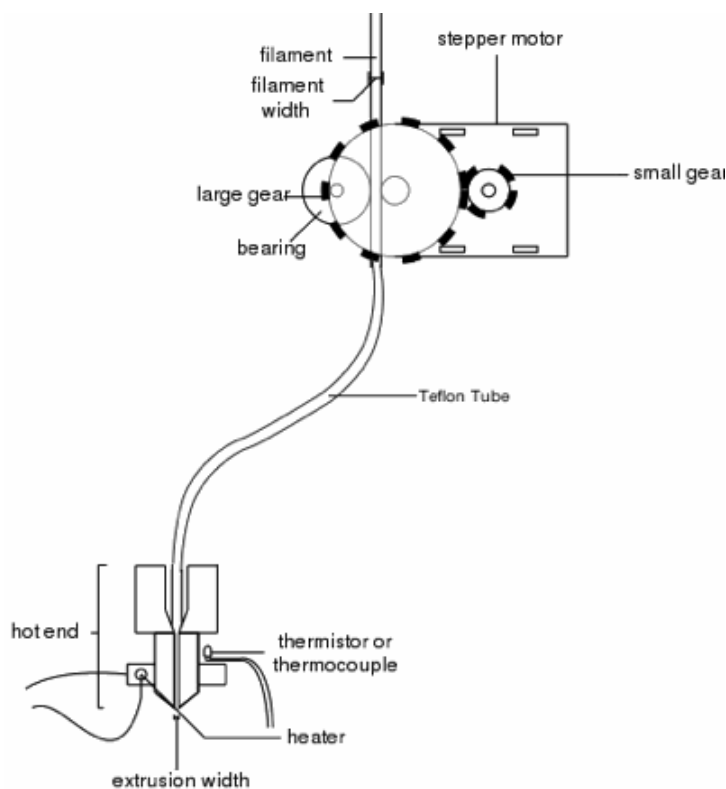
Obr. 7. Popis tiskové hlavy.

Během vylučování termoplastu je vyvinuto mechanické napětí odvíječi které posouvají strunu do tepelné komory. Směrem od odvíječe k cívce převažuje mírné tahové napětí, zatímco od odvíječe směrem k trysce dochází k vytvoření tlakového napětí. Struna navíjená do tiskové hlavy funguje jako píst, který vytlačuje materiál tryskou.

Síla potřebná k vytlačení materiálu tryskou musí být dostatečná, aby překonala odpory ve vylučovacím systému. Mezi hlavní odpory patří viskozita taveného materiálu a geometrický tvar trysky [14].

Existují dva typy tiskových hlav. S přímým pohonem a hlavy typu Bowden. U přímých pohonů se krokový motor podávající tiskovou strunu, nachází v těsné blízkosti vylučovací trysky. Vzhledem k značné hmotnosti krokového motoru, dochází k působení značných setrvačných sil, které nepříznivě ovlivňují parametry tisku. Je nutné přizpůsobit rychlost polohování tiskové hlavy, tak, aby tyto síly ovlivňovaly tisk co nejméně.

Hlavy typu Bowden mají oddělenou horkou část od studené. Krokový motor se nachází na části tiskárny, která není v pohybu. Tisková struna je mezi krokovým motorem a vylučovací tryskou dopravována v pružné trubičce. Tato trubička je obvykle z teflonu, kvůli svým dobrým kluzným vlastnostem. Výhodou tohoto řešení jsou nižší setrvačné síly působící na tiskovou hlavu a lze proto dosahovat vyšších rychlostí tisku. Nevýhodou je snížená přesnost dávkování materiálu, která je dána větší vzdáleností mezi tryskou a podávacím zařízením [15].



Obr. 8. Schéma tiskové hlavy typu Bowden [15].

2.2.2 Krokový motor

„Krokový motor je synchronní točivý stroj většinou napájený impulsy stejnosměrného proudu. Magnetické pole je generováno postupným napájením jednotlivých pólových dvojic. Pohyb rotoru krokového motoru je při nízkých rychlostech nespojitý, rotor se pohybuje mezi stabilními polohami vždy v určitém úhlu – mluvíme o pohybu v krocích. Počet kroků (stabilních klidových poloh) je dán počtem pólových dvojic, rovněž může být ovlivněn způsobem ovládání. K pohybu tohoto motoru je vždy třeba řídicí elektronika – ovladač krokového motoru. K mechanickému kontaktu a tudíž otěru nedochází u krokových motorů jinde než v ložiscích. Vyznačují se proto velkou mechanickou odolností, dlouhou dobou života a provozem téměř bez údržby. Nevýhodou krokových motorů je tzv. ztráta kroku, která nastává při překročení mezního zatížení a sklon k mechanickému zakmitávání, které může vést k nestabilitě při pohybu. Obě tyto negativní vlastnosti lze předem vyloučit volbou vhodného motoru a ovladače s přihlédnutím k momentovým charakteristikám pohon [16].“

Mezi nejdůležitější parametry krokových motorů je úhel kroku a krouticí moment. V současné době je nejrozšířenějším krokovým motorem u reprop tiskáren model NEMA 17.

Příklad parametrů motoru NEMA 17 (model 42BYGH W811)

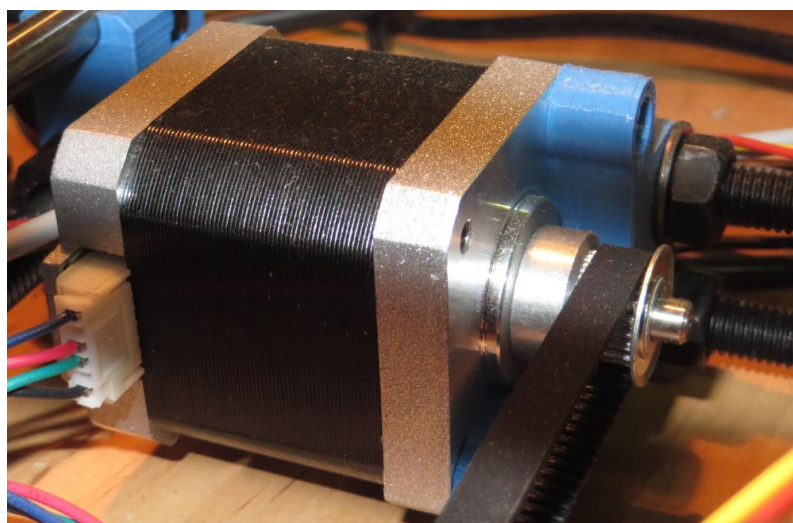
Krouticí moment - 47.0 N·cm

Jmenovité napětí - 3.1 V

Výstupní hřídel - Ø 5 mm

Úhel kroku - 1.8°

Délka motoru - 48 mm



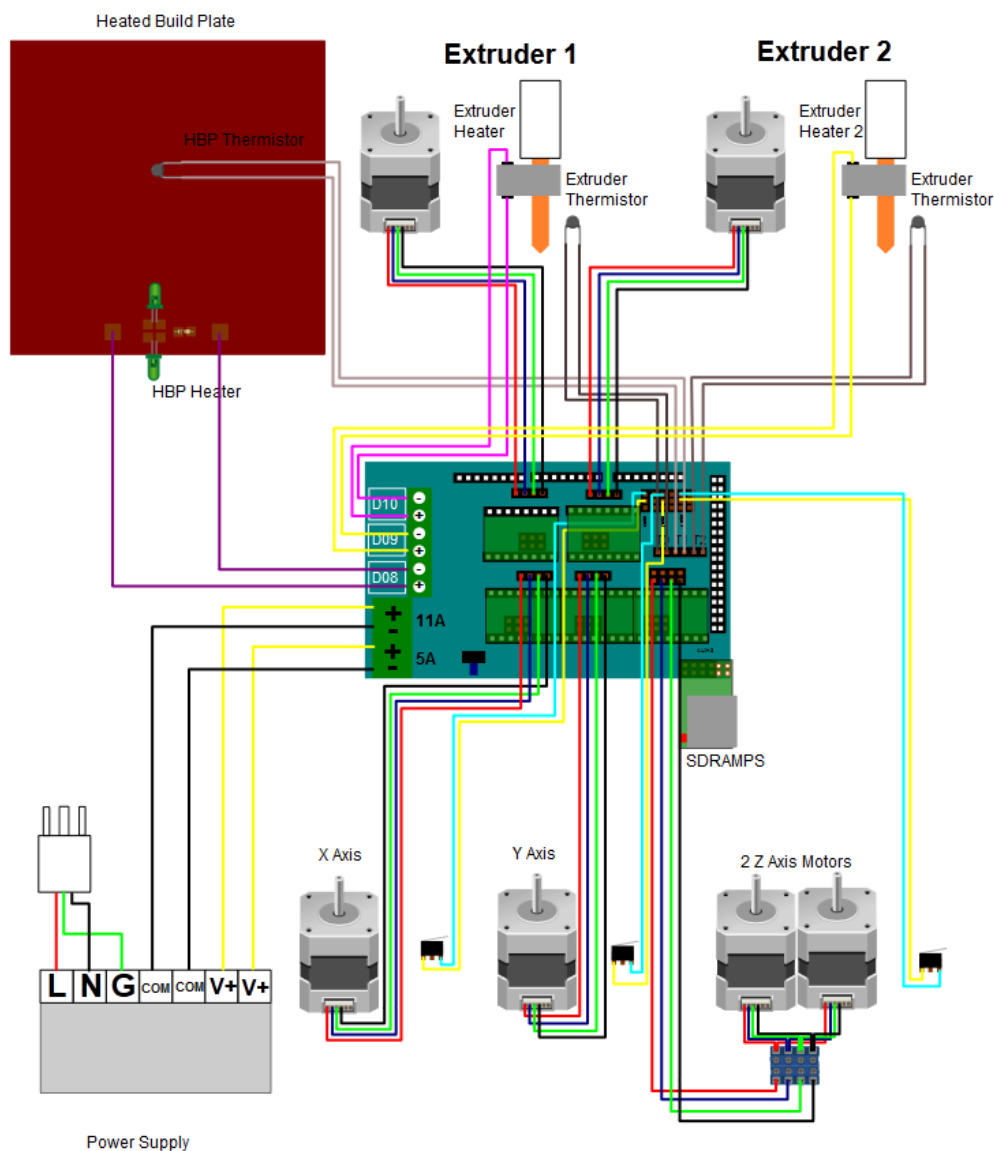
Obr. 9. Krokový motor NEMA 17.

2.2.3 RAMPS 1.4

Veškerá elektronika většiny tiskáren RepRap je řízená elektronickou deskou RepRap Arduino Mega Pololu Shield. Tato deska je spojena a rozšiřuje programovatelný logický automat (PLC) Arduino Mega.

Parametry desky RAMPS [17]:

- Uzpůsobena pro kartézský souřadný systém
- Lze rozšířit o různé doplňky
- 3 zdrojové výstupy pro ohřev tiskové hlavy/větrák/vyhřívanou podložku a 3 termistorové okruhy pro měření teploty.
- Obsahuje pět driverů krokových motorů
- Obsahuje konektor USB typ B
- Vstupní napětí 12V



Obr. 10. Schéma zapojení elektroniky 3D tiskárny [17].

2.2.4 Koncový spínač

Slouží k určení nulového bodu na dané ose. Zatímco v ose X, Y lze nastavit polohu koncového spínače s přesností na milimetry, tak v ose Z je nutné docílit přesnosti nulového bodu v řádech setin. Tato procedura zvaná leveling probíhá tak, že mezi trysku a tiskovou podložku je vložen papír, který musí klást velice mírný odpor při vkládání. Po té je změřena tloušťka papíru a tato hodnota se zapíše do příslušného softwaru pro tvorbu G-kódu jako rozdíl mezi teoretickou a skutečnou hodnotou nulového bodu. Vygenerovaný G-kód bere tuto hodnotu v potaz.

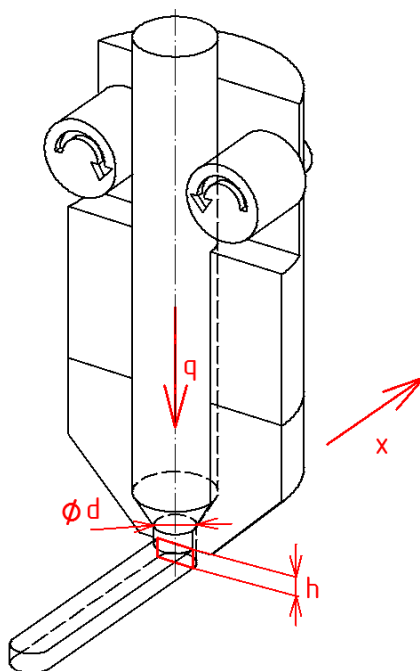
2.2.5 Informační display

Display má hned několik šikovných funkcí. Během tisku ukazuje teploty tiskové trysky a vyhřívané podložky, dobu od začátku tisku, a souřadnice tiskové hlavy v prostoru. Dále umožňuje tisk z paměťové karty a odpadá nutnost použít k řízení tiskárny PC. Dále obsahuje reproduktor a je například možné být po dokončení tiskárny upozorněn výstražným tónem o dokončení úlohy.

3 TECHNOLOGICKÉ PARAMETRY TISKU

3.1 Přímé parametry

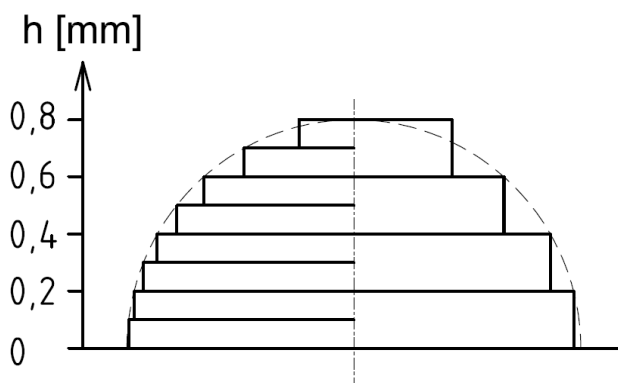
Jako přímé lze označit ty, které umožňují principiálně 3D tisk. Jedná se o množství vylučovaného materiálu, které je nanášeno z určité výšky za definovaného pohybu. Tyto parametry jsou jednoznačně mechanicky definovány pohybem motorů a geometrií tiskové trysky.



Obr. 11. Znáznornění přímých parametru na tiskové hlavě.

3.1.1 Výška vrstvy

Jedná se o jeden z naprosto klíčových parametrů tisku. Výška vrstvy je pohyb mezi základní rovinou a tiskovou tryskou. Směr výšky vrstvy je orientována jako osa Z. Obecně se dá říci, že s vyšší vrstvou se zkracuje čas tisku. Avšak silnějšími vrstvami je znatelnější schodovitost. Tenčí vrstvy se hodí pro detailnější úlohy [5].



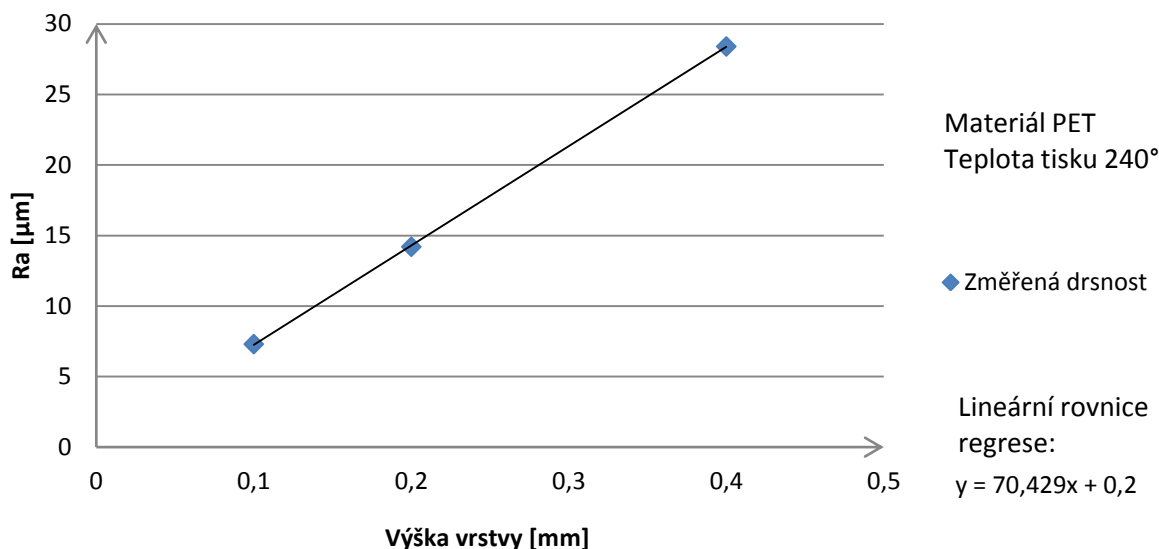
Obr. 12. Vliv výšky vrstvy na schodovitou u tvarově složitějších dílů.

Výška vrstvy má také velmi značný vliv na kvalitu bočních stěn. Srovnání jednotlivých skutečných profilů lze vidět v následujícím schématu. Drsnost povrchu R_a bočních stěn se v tomto případě pohybuje od $7,3\mu\text{m}$ u do $28\mu\text{m}$.

Výška vrstvy h [mm]	Teoretické schéma	Naměřený profil	R_a
0,1			7,3
0,2			14,2
0,4			28,4

Obr. 13. Vliv výšky vrstvy na strukturu bočních stěn.

Pokud se naměřené hodnoty a vynesou do grafu, získá se následující závislost, ze které plyne, že drsnost povrchu je přímo úměrná výšce vrstvy.



Obr. 14. Závislost drsnosti povrchu na výšce vrstvy.

3.1.2 Množství vylučovaného materiálu

Další z přímých parametrů regulujeme otáčkami krokového motoru podavače materiálu, jehož rychlost je řízená G-kódem. Rychlost otáček závisí na geometrii výstupní trysky, která je pevně daná. Značný vliv má také i rozměr tiskové struny navinuté na kotouči s tiskovým materiálem, pokud bude její průměr kolísat, bude tisk negativně ovlivněn.

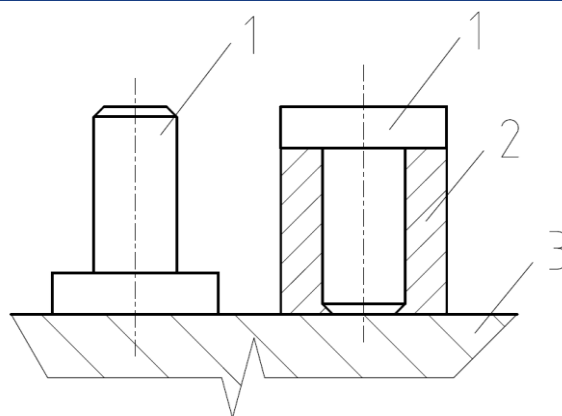
3.1.3 Pohyb

Velice zjednodušeně lze prohlásit, že se snižující se rychlostí roste kvalita tisku, ale také značně narůstá strojní čas. Maximální rychlost pohybu tiskové hlavy je dána působícími setrvačnými silami působícími ve směru pohybu hlavy. Optimální tiskárna musí být proto co nejvíce tuhá, aby působení těchto sil bylo co nejmenší. Nastavení správné rychlosti tisku na tiskárně Reprap je proto otázka zkušenosti uživatele tiskárny.

3.2 Nepřímé parametry tisku

3.2.1 Orientace modelu

Vzhledem k limitům technologie FDM, je volba orientace tištěného objektu klíčová. Je vhodné si uvést ukázkou na vhodném geometrickém modelu, jako je například čep s válcovou hlavou. Pokud bude čep pro tisk orientován, tak že čep bude stát na dříku, došlo by při tisknutí hlavy čepu k tomu, že budeme tisknout do vzduchu, což není technologicky možné. Je nutné čep orientovat hlavou čepu dolů. Pokud by však bylo nezbytně nutné, aby byl čep orientován dříkem dolů, je nutné hlavu podepřít pomocným materiálem. Tento materiál nazýváme podpora [5].



Obr. 15. Ukázka vhodné (vlevo) a nevhodné orientace modelu (vpravo).

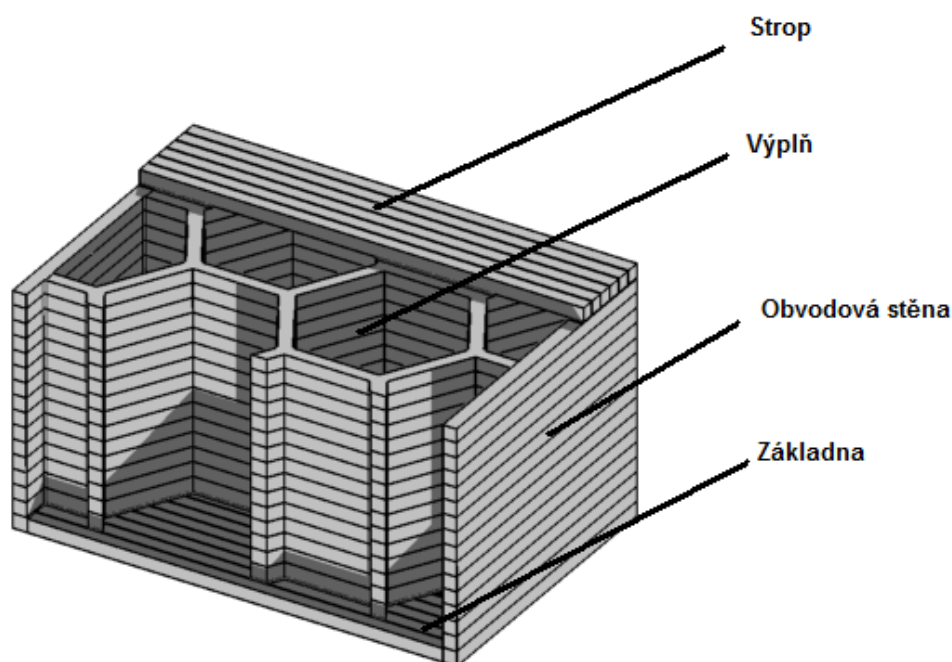
1 - model, 2 - podpora, 3 – tisková podložka.

3.2.2 Podpora

Je materiál, který je vytištěn z technologického hlediska limitů metody FDM. Podpory jsou dvojího druhu. Mohou být tvořeny buď stejným materiálem jako je tištěná součást, který je nutné mechanicky odstranit. Nevýhodou tohoto řešení je ruční vícepráce s odstraňováním podpor. Není nutné mít na tiskárně druhý extruder. Druhé řešení je použití dalšího extruderu s materiálem, který lze rozpustit ve vhodném médiu. Jedná se například o HIPS který je rozpustný v limonenu, nebo například PVA který je rozpustný ve vodě.

3.2.3 Vnější stěny tělesa

Jako vnější strany tělesa označujeme všechny viditelné stěny tělesa. Jednotlivé druhy stěn jsou schematicky naznačeny na následujícím obrázku.



Obr. 16. Popis stěn výtisku.

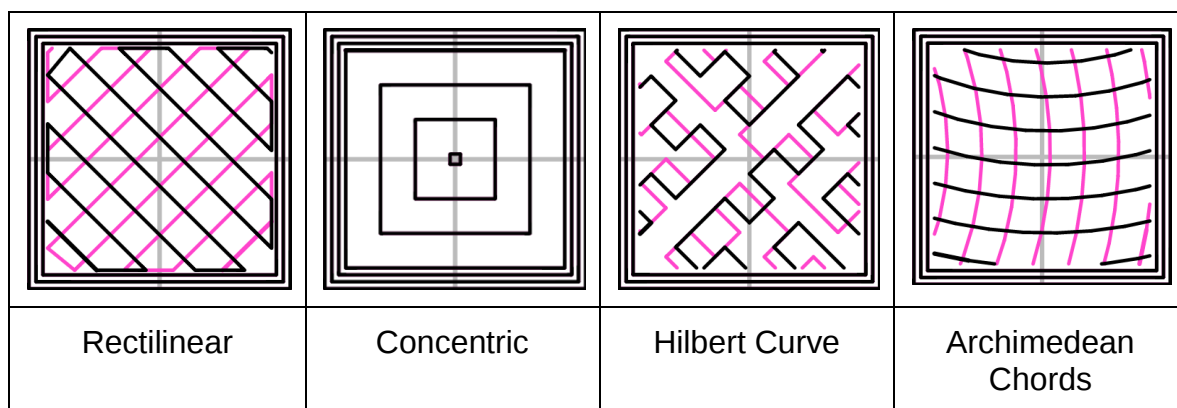
Vnější stěny dělíme do tří druhů:

- **Základna** – Jsou umístěny na tiskové podložce. První vrstva základny, jenž leží na podložce, má nejhladší povrch z celého tělesa. Plocha této roviny obvykle nepotřebuje žádné dokončovací úpravy. To však neplatí o hranách první vrstvy základny, která může obsahovat technologický lem (objasněn níže), nebo může být širší, než ostatní vrstvy, což může být nežádoucí. Jiná šířka může být způsobena teplem z vyhřívané podložky, nebo jinak nastavenými parametry tisku pro první vrstvu. U jednovrstvých modelů, se často používá silnější první vrstva.

- **Obvodové stěny** – Vertikální obvodové stěny. Je na nich vidět struktura jednotlivých natisknutých vrstev, což může být nežádoucí pro pohledové díly. U obvodových stěn dosahujeme největší přesnosti, je proto vhodné orientovat například otvory, které musí být vůči sobě v určité toleranci orientovat právě do této roviny.

- **Stropy** – Uzavírají těleso shora. Nedosahují tak dobré povrchové kvality jako základna. Protože tělesa obvykle nejsou plná, jsou stropy kladeny na výplně a jsou tvořeny sérií mostů. Protože mosty jsou obvykle dosahují nižší třídy kvality, je velmi vhodné použít více vrstev materiálu.

Horizontální stěny (základny a stropy) jsou vytvářeny v určitých geometrických vzorech, v závislosti na nastavení a použitém softwaru.

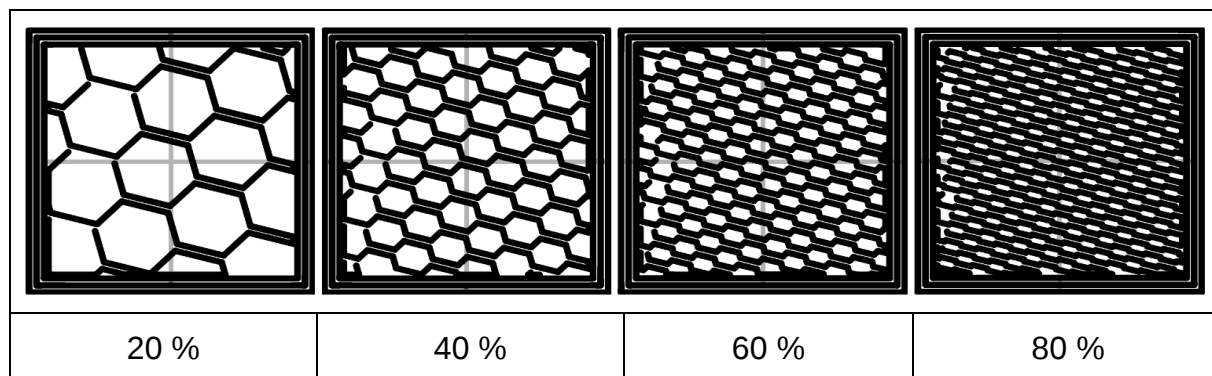


Obr. 17. Příklady geometrických vzorů pro horizontální stěny používaných programem slicer [18].

3.2.4 Výplň

Pokud to není nezbytně nutné, například pro mechanické zkoušky materiálu, nebývá objem tištěného tělesa plně vyplněn. Největší výhodou použití dutých těles je samozřejmě materiálová úspora. Čím méně je použito materiálu, tím více klesá cena výrobku v podobě přímých nákladů na materiál, ale také ve formě časové úspory na strojním času. Pokud by však bylo použito kompletně duté těleso, jeho mechanické vlastnosti by byly velice špatné. Proto se používají různé výplňové vzory, které vytištěnému dodají pevnost. Výplň také zabraňuje smršťování součástí. Výplňové vzory se používají tenké proto, aby se mohly axiálně roztahovat, zatímco se radiálně smršťují, takže nestahují obvodové stěny do objektu, zatímco chladnou [5].

Na rozdíl od základů a stropů, kde je vždy použita 100% výplň, lze nastavit u vnitřních výplňových vzorů procentuální množství výplně.



Obr. 18. Znárodnění vlivu hustoty výplně na vzoru Honeycomb [18].

3.2.5 Most

FDM technologie sice neumožňuje vést vlákno do volného prostoru, ale je možné vlákno vést přes volný prostor na pevný bod kde dojde k jeho uchycení. Tento princip je nazýván jako tvorba mostů. Vzhledem k tomu, že vyloučené vlákno je vlivem vysoké teploty velmi měkké, působí na něj značně gravitační síla, která způsobuje průvlak. Tato technologie je vhodná pouze pro menší mezery. Pro větší mezery je nutné využít podpor.

Existují dva přístupy ke stavění mostů. Při prvním dochází ke zpomalení rychlosti tisku a mírnému zvýšení průtoku tištěného materiálu, díky čemuž nemusí být prohnutí příliš značné skrze tuhost vytvořeného mostu. Při druhém způsobu je naopak rychlost zvýšena a průtok snižena, čímž dojde k rychlému vytvoření mostu s tím, že se na měkkém materiálu nestihne vytvořit průvlak. Použití správného přístupu vždy záleží na vzdálenosti, kterou je třeba překlenout a dalších okolnostech [5].

3.2.6 Krajnice

Krajnice (anglicky brim) je tenká vrstva materiálu, která má větší rozměr než finální objekt. Tato vrstva má za úkol lepší přichycení výtisku k podložce, na které probíhá tisk. Kraje tištěných objektů mohou mít tendenci ztrácet přilnavost vůči podložce vlivem tepelného smršťování plastů. Její uplatnění má smysl u větších výrobků, které mají malou stykovou plochu vůči podložce, a je u nich velké riziko posunutí výtisku, nebo u výtisků kde vzhledem k množství tištěného materiálu dochází k nerovnoměrnému ochlazování materiálu. Nutnost použití okrajů se snižuje při využití vyhřívané podložky. Nevýhodou je vícepráce s odstraněním přidaného materiálu.

3.2.7 Lem

Jedná se o uzavřenou smyčku, která obklopuje tištěný objekt. Lem (anglicky skirt) slouží ke stabilizaci vylučování tisknutého materiálu z trysky. Je prakticky nezbytný při změně tištěného materiálu, abychom dostali zbytky předchozího

materiálu z trysky. Lem má obvykle 1 vrstvu, a je zadáván v počtu smyček, nebo minimální délce smyčky.

3.2.8 Tisková podložka

Volba vhodné podložky pro tisk je naprosto klíčová pro úspěšnost tisku. Je nutné zajistit, aby vytištěný objekt byl pevně připevněn k podložce. Existuje několik způsobů jak toho dosáhnout. Nejrozšířenějším způsobem, je použití vyhřívané podložky. Vlivem zvýšené teploty podložky, první vrstva vytištěného materiálu, lépe přilne na tištěný povrch. V pozdější fázi tisku, kdy se tisknou vyšší vrstvy, se vlivem ochlazování první vrstvy začne výtisk smršťovat. Síly působící ze smrštění materiálu mohou vést až k úplnému utržení výtisku od tiskové plochy.

Při generování kódu je nutné brát v úvahu jaký materiál je tištěn. U první vrstvy, lze například nastavit jinou teplotu tisku, nebo nastavit vyšší výšku vrstvy.

3.3 Formát .STL

Nejpoužívanějším formátem pro práci s 3D tiskárnami je beze sporu .STL (STereoLitografie). Jedná se formát souborů vytvořen firmou 3D Systems [19].

Soubor STL geometricky popisuje pouze povrch 3D tělesa. Povrch je definován trojúhelníkovými polygony v kartézském tří rozměrném prostoru. STL formát je nejběžněji vyexportován z některého CAD programu. Nejsou zachovány, žádné vlastnosti jako je barva, textura, hmotnost a další fyzikální vlastnosti.

Samotný formát ovlivňuje tisk zaoblených ploch, protože je nahradí několika polygony. CAD programy často nabízí několik možností, jak moc detailní má být export do formátu STL [19].

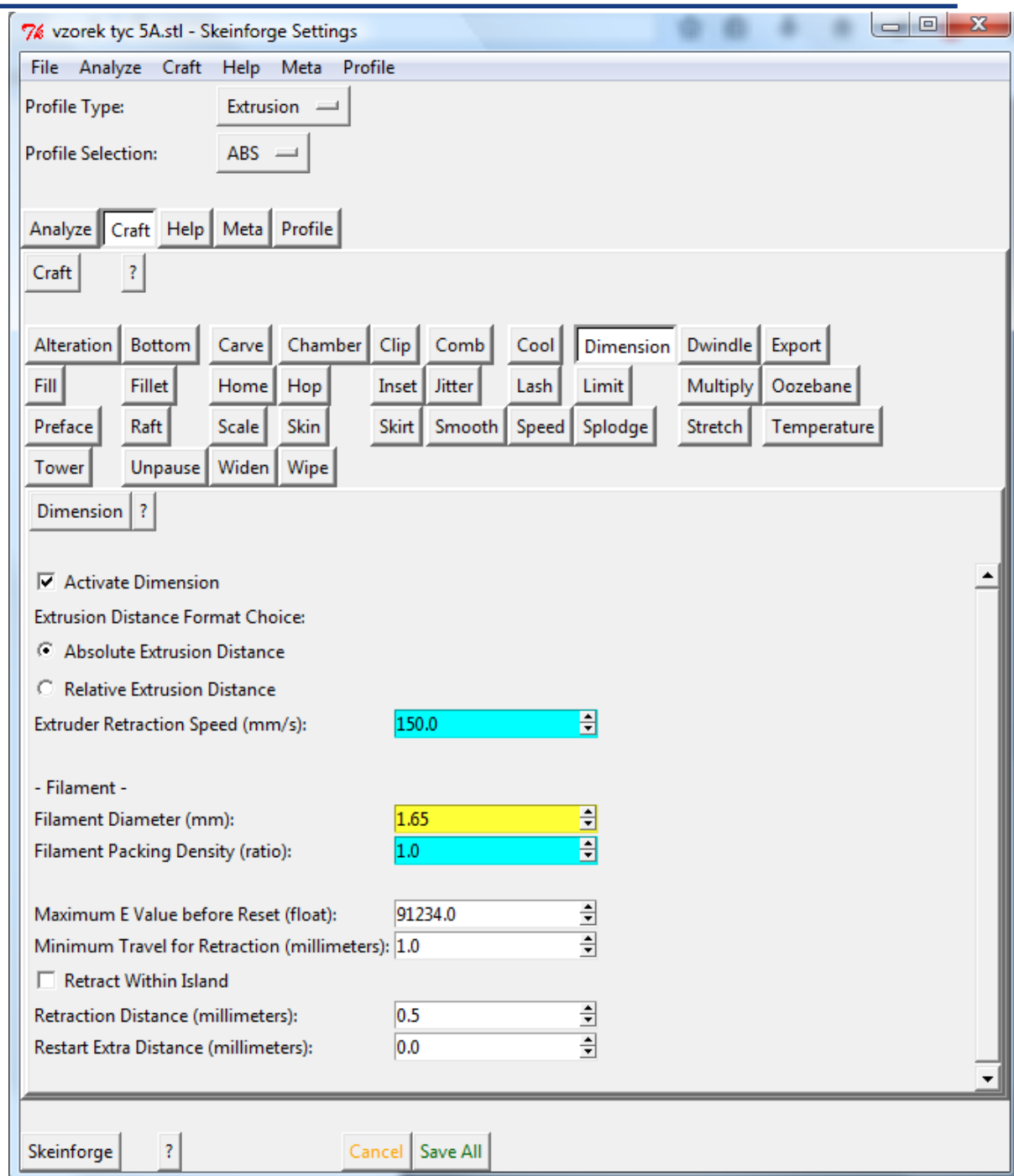
3.4 Software pro generování G-kódů

3.4.1 Skeinforge

Skeinforge je program napsaný v programovacím jazyku Python, bez něhož nelze Skeinforge spustit. Program byl vyvíjen od listopadu 2009 do března 2012, kdy byla vydána poslední verze.

Program je z pohledu běžného uživatele, příliš komplexní a nepřehledný. Obsahuje 34 palet nástrojů, které ovlivňují parametry tisku. Každá paleta má dále na výběr z řady nastavení a celkem lze využít až přes 220 nastavení. Je zřejmé, že správné nastavení programu pro dosažení požadovaných výsledků, může být značně náročné.

Další nevýhodou je pomalost samostatné tvorby G-kódu. Skeinforge totiž využívá pro výpočet G-kódu pouze jedno jádro procesoru [20]. Výhodou však může být, právě velká možnost nastavení pro zkušené uživatele.



Obr. 19. Uživatelské prostředí programu Skeinforge.

3.4.2 Slic3r

Slic3r je dalším volně dostupným softwarem pro generování G-kódu z STL modelů. Je vyvíjen od roku 2011. Poslední aktuální verze je 1.2.6 byla vydána 1.2.2015 a program je doposud vyvíjen.

Na rozdíl od programu Skeinforge, je Slic3r uživatelsky daleko přívětivější a přehlednější. Velkou část nastavení program generuje sám bez možnosti nastavení uživatele. S tímto programem lze dosáhnout značných výsledků v krátkém čase, bez hlubších znalostí 3D tisku. Další výhodou oproti programu Skeinforge je kratší výpočetní čas samostatného G-kódu.

3.5 Software pro komunikaci s 3D tiskárnou

Existuje několik programů pro komunikaci s tiskárnou reprop. Jmenovitě lze uvést třeba Pronterface, Cura, Repetier-Host a další. Jednotlivé programy se od sebe neliší natolik závažným způsobem, aby museli být dále rozebírány. Navíc vzhledem k tomu, že v současné době mohou být tiskárny vybaveny modulem se slotem na paměťovou kartu, nemusí být tyto programy (teoreticky) vůbec použity.

4 MATERIÁLY

4.1 Mechanické vlastnosti polymerů

Chování polymerů vzhledem k mechanickým vlastnostem je velmi komplexní záležitost. Polymery se totiž mohou chovat jako tekutina, guma, křehké sklo, nebo jako měkká a pružná pevná tělesa. Obecně lze prohlásit, že toto chování závisí na jejich molekulární struktuře. Polymery, které mají svou strukturu ve tvaru prostorové sítě se mají tendenci chovat více křehce oproti materiálu, který prostorovou strukturu sítí nemají. Krystalická struktura také může způsobovat, že některé oblasti mají vyšší tuhost. Tyto a další vlastnosti jsou předmětem zkoumání materiálových a chemických věd [2].

Pro zhodnocení mechanických vlastností materiálů se používá napětí, deformace a modul pružnosti v tahu. Napětí vzniká v tělese, pokud na něj působí síla. Označuje se σ a je vyjadřuje sílu působící na daný průřez. Jako jednotky pro vyjádření napětí se používají MPa ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$).

Deformace vyjadřuje změnu rozměru tělesa vlivem působením vnějších sil. Jedná se o bezrozměrnou veličinu. Je odpovědí materiálu na působící napětí.

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (1)$$

Modul pružnosti v tahu (někdy také označován jako Youngův modul), vyjadřuje poměr napětí a deformace. Jako pro vyjádření modulu pružnosti v tahu se používají MPa nebo GPa.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Mezi nejvýznamnější parametr pro shrnutí mechanických vlastností je pevnost v tahu. Tato materiálová charakteristika vyjadřuje napětí, které daný materiál snese. Zkušební tyč o definovaném průřezu je zatěžována zvětšující se silou, tato síla způsobí rostoucí napětí v materiálu, které se projeví deformací zkušební tyče. Tyč je natahována, až do úplného utržení. Po celou dobu tahové zkoušky, je měřena zatěžovací síla a prodloužení tyče. Z těchto parametrů jsme schopni vyhodnotit mez pevnosti v tahu.

Rozlišujeme dva základní druhy chování materiálu v tahové zkoušce a to podle lomu:

- Materiál s křehkým lomem, u kterého dochází k náhlému ulomení s minimálními deformacemi v oblasti lomu.
- Materiál s tvárným lomem, u kterého dochází k postupné deformaci tyče ve formě zužování materiálu a tvorbě krčku před utržením tyče [2].

Jak se materiál zlomí, záleží na například na teplotě. Se snižující se teplotou okolí je pravděpodobnější, že materiál se bude lámat křehkým lomem.

4.1.1 Viskoelasticita

Viskoelasticita označuje vlastnost materiálu chovat se jak elasticky, tak i viskózně. Elastický materiál je takový, jenž se deformuje přímo úměrně zatěžující síle, s tím, že tato deformace je vratná. K tomu to chování dochází při malých deformacích a řídí se Hookovým zákonem [4].

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (3)$$

Naproti tomu, Newtonské kapaliny vykazují pouze viskózní tečení. Viskozita charakterizuje vnitřní tření uvnitř kapalin. Kapaliny s větší hodnotou viskozity kladou větší odpor proti tečení.

Působí li na viskózní kapalinu vnější smyková síla, řídí se způsob zatěžování vztahem

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (4)$$

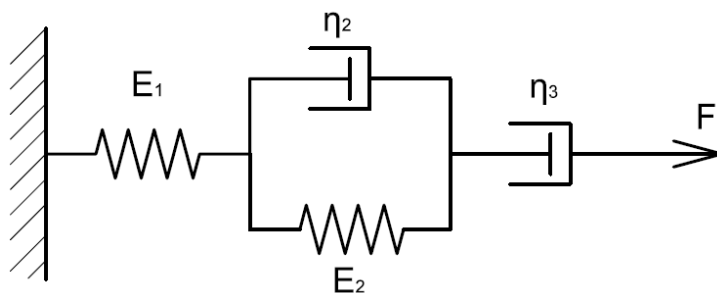
τ - smykovém napětí

γ - smyková rychlost

μ – dynamická viskozita

Chování plastů lze vysvětlit na vhodném mechanickém modelu. Pro tuto úvahu je použit model o čtyřech prvcích, skládající se z elastických pružin (chovajících se podle Hookova zákona) a viskózních tlumičů (chovajících se jako Newtonská kapalina) [4].

Konstantní napětí vložené na pružinu způsobí okamžité protažení, které se nebude s časem měnit. Stejné napětí působící na tlumič povede k deformaci tlumiče, která bude vzrůstat lineárně s časem.



Obr. 20. Čtyřprvkový model viskoelastického chování termoplastů [4].

Deformace působící na tento model se rozkládá do několika fází a je dána vztahem [4]:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (5)$$

Kde ε_1 je deformace podle Hookova zákona, ε_2 je zpožděná deformace a ε_3 je viskózní tok.

Dále platí [4]:

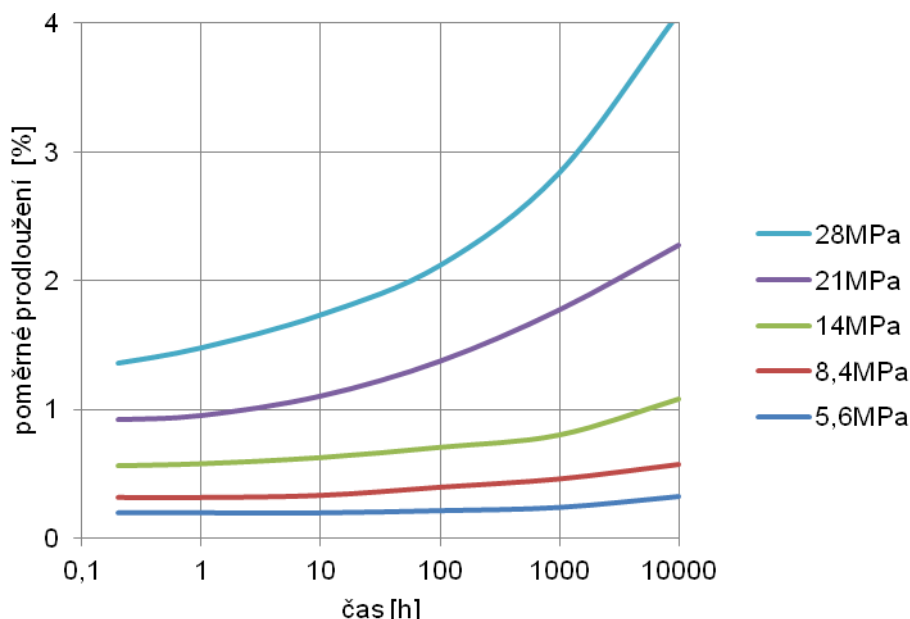
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} (1 - e^{-t/\tau}) + \frac{\sigma}{\eta_3} t \quad (6)$$

Kde ε je celková deformace v čase t od okamžiku zatěžování, σ -napětí vyvolané vnější silou, E_1 – tuhost pružiny 1, E_2 tuhost pružiny 2, η_2 viskozita tlumiče 2, η_3 viskozita tlumiče 3, τ – doba retardace, tj čas nutný k tomu, aby souběžná kombinace vlivů E_2 a η_2 deformovala systém na určitý stupeň celkové deformace.

4.1.2 Creep

Jako creep (tečení) nazýváme vlastnost materiálu měnit rozměr při statickém zatížení. Makromolekulární struktura plastů se při dlouhodobém zatížení totiž mění. Tato vlastnost se zjišťuje dlouhodobými statickými zkouškami, a z funkčního hlediska se jedná o velmi důležitou charakteristiku, jelikož zahrnuje důležitý faktor času [4].

Creepovou zkoušku lze rozdělit na tři základní oblasti. Oblast primárního Creepu – rychlost tečení hmoty termoplastu se od okamžiku zatížení konstantně zpomaluje a deformace je teoreticky vratná. V sekundárním Creepu dochází k trvalému plastickému protažení, při konstantní rychlosti deformace. Při terciárním creepu začíná rychlost deformace rychle vzrůstat až do okamžiku vyčerpání deformačního mechanismu a porušení tělesa lomem [4].



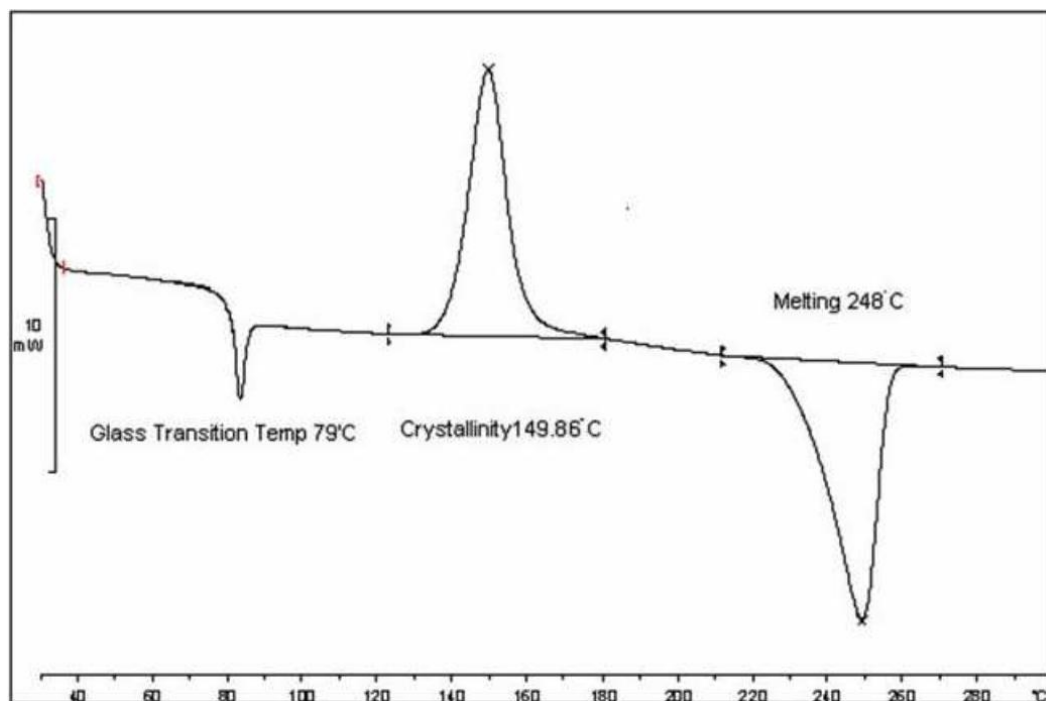
Obr. 21. Creepové křivky středně houževnatého termopolymeru ABS při různém osovém zatížení. Zkušební teplota 23 °C [4 - upraveno].

4.1.3 Teplota skelného přechodu

Teplota skelného přechodu (T_g) je teplota, při které dochází k amorfní polymer z vláčně kaučkovitého stavu do křehkého sklovitého stavu. Při této teplotě dochází k omezení stupně volnosti určitých kmitů v segmentech polymerních řetězců (omezuje se Brownův pohyb segmentů). Při teplotě nad T_g se uvolňují slabší mezimolekulové vazby, takže se mohou volně otáčet a ohýbat úseky řetězců mezi silně vázanými skupinami. Při T_g se více či méně mění všechny fyzikální vlastnosti polymerů. Hodnota T_g se stanovuje měřením teplotní závislosti příslušné fyzikální veličiny [3].

4.1.3.1 Diferenční termická analýza

Je oblíbenou metodou pro studium chování polymerů za vysokých teplot. Slouží ke zjištění exotermických (maxima křivky) a endotermických pochodů (minima křivky), které probíhají při plynulém zvyšování nebo snižování teploty vzorku a jeho okolí. Současně se zkoušeným vzorkem se zahřívá srovnávací tepelně stálý vzorek a měří se teplotní rozdíl mezi oběma vzorky. Teplota srovnávacího vzorku se mění lineárně s teplotou pece. Naproti tomu u zkoumaného vzorku polymeru není průběh teploty lineární, ale dochází k relativnímu ochlazení nebo oteplení vlivem změn probíhajících ve zkoušeném vzorku [3].



Obr. 22. Křivka DTA pro materiál PET [12].

4.2 ABS

Polymer ABS je heterogenní materiál tvořený kombinací monomerů akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Poměr jednotlivých složek se pohybuje v rozmezí 45-70% styrenu, 10-30% akrylonitrilu a 15-50% butadienu. Akrylonitrilová složka zvyšuje chemickou odolnost, zatímco butadienová složka podstatně zvyšuje houževnatost. Ve výsledku se polymery ABS vyznačují se dobrým poměrem chemické odolnosti a houževnatosti při zachování dostatečné tuhosti, pevnosti v tahu a ohybu. Jeho hustota se pohybuje od 1,02 až 1,08g . cm⁻³ [3,4].

ABS vyrábí mnoho výrobců, kteří si jednotlivé složky míchají podle sebe, a na trhu je velké množství různě kvalitních materiálů.

Obecně lze vlastnosti ABS shrnout:

- Dobré mechanické vlastnosti
- Snadno zpracovatelné,
- malý elektrostatický náboj,
- jsou odolné proti řadě chemikálií,
- mají tvrdý a lesklý povrch,
- v závislosti na použité technologii, nevyžadují dodatečnou úpravu
- tvarově stálé do 80-105 °C
- malá odolnost proti povětrnostním podmínkám a světelnému záření
- nejsou odolné proti ohni a jsou zařazeny v kategorii látek pomalu hořících

V technické praxi lze ABS dobře zpracovávat všemi běžnými technologickými postupy používanými u termoplastů – vstřikováním, válcováním, vyfukováním, tvarováním za tepla i lisováním. Nejčastěji se jedná o vstřikování do forem při teplotě 180 až 250 °C [3].

ABS lze lepit, svařovat a povrchově upravovat. Materiál lze galvanicky pokovovat, čímž získá vzhled podobný kovům, ale také se zvýší jejich pevnost, odolnost proti rozpouštědlům, a tvarová stálost za tepla.

Uplatnění nachází například ve vnitřních i vnějších částech automobilů, ve spotřebičích pro domácnosti, skříně pro elektrotechnická zařízení, nábytek, sportovních potřeb, kancelářských vybavení a jiných oblastech [3].

ABS je jeden z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk. Nabízí dobré mechanické vlastnosti za příznivou cenu. Je navíc odolný do teplot okolo 100 °C. Na trhu je k dostání ve velké škále barev. Nevýhodou je vysoká tepelná roztažnost, a tedy velké smršťování při tisku. Teploty tisku se pohybují mezi 220-250 °C.

4.2.1 ABS A1

Jedná se o komerční označení typu ABS jiným poměrem akrylonitrilu, butadienu a styrenu, než běžné struny z ABS. Tento typ ABS by měl vykazovat menší smršťivost a lepší chování při tisku. Teploty tisku se pohybují okolo 220-240 °C [28].

4.3 PLA

Kyselina polymeléčná (PLA=polyactic acid) je rozložitelný termoplast který se vyrábí z obnovitelných surovin, jako je například kukuřičný škrob. Jedná se o semikrystalický polymer s teplotou skelného přechodu v 60 °C. Při této teplotě také ztrácí mechanickou pevnost, a hranice 60 °C je brána jako hraniční pro jeho použití.

Pro 3D tisk nachází PLA uplatnění spíše pro pohledové díly, jelikož při teplotách nad 60 °C ztrácí mechanickou pevnost. Je poměrně levný, a na trhu je k dostání hned v několika barevných provedeních. Tiskne se při teplotách 200-220 °C

4.4 PET

Polyethylentereftalát (zkráceně PET, dříve PETP) je nejvýznamnějším lineárním polyesterem. Polyestery jsou charakteristické přítomností esterových vazeb v hlavních řetězcích [3].

Nejčastější uplatnění v průmyslové sféře PET nachází ve formě vláken, fólií a lahví. Vyznačuje se dobrými mechanickými vlastnostmi, tvrdostí, odolností proti otěru, dobrou rozměrovou stálostí, nízkým koeficientem tření a malou navlhávností [3].

Je velmi dobře recyklovatelný, avšak kvalita jeho druhotného využití je závislá na čistotě vstupní suroviny.

3D tisk z materiálu PET není doposud tak obvyklý jako ABS nebo PLA a je proto dražší. Nabízí dobrou mechanickou pevnost a tepelnou odolnost. Tepelná roztažnost patří k nižším. Tiskne se při teplotách 220-260 °C

4.5 HIPS

Houževnatý polystyren (High Impact PolyStyren – HIPS) je dvoufázový systém polystyrenu a kaučuku. Tato dvoufázová struktura má za následek dosažení optimálních vlastností, a tedy spojení tuhosti plastu s houževnatostí kaučuku. Se zvyšujícím obsahem kaučuku roste rázová houževnatost, klesá tvrdost, tepelná odolnost a bod měknutí. HIPS má výrazně zvýšenou rázovou houževnatost (40 až 80 kJ · m⁻²) oproti obyčejnému polystyrenu (okolo 20 kJ · m⁻²). HIPS je kvůli přítomnosti kaučuku velmi náchylný na stárnutí, tento jev se dá v průběhu výroby stabilizovat, ale má jen omezenou účinnost, nedoporučuje se proto tento materiál používat pro venkovní aplikace [3].

HIPS se v 3D tisku používá jako materiál na podpory, protože je rozpustný v limonenu.

4.6 PVA

Jako Polyvinylalkohol (PVA, dříve také označován PVAL) označujeme produkty, které mají tolik volných hydroxylových skupin, že jsou rozpustné i ve studené vodě. PVA je použitelný v rozmezí teplot -50 až 130 °C a nad teplotou 220 °C dochází k jeho rozkladu [3].

PVA se používá v 3D tisku jako materiál na tvorbu podpor. Je rozpustný ve vodě. Je znatelně dražší než HIPS.

4.7 Nylon

Nylon je polymer, patřící do skupiny polyamidů. Nylon se vyznačuje vysokou houževnatostí, tvrdostí, odolností proti otěru a dobrými elektroizolačními vlastnostmi. Odolávají účinku pohonných hmot, olejů a velké řadě rozpouštědel. Jsou náchylné na vlhké prostředí, ve kterém se změkčují vlivem vyšší nasákavosti materiálu [3].

Jedná se však o krystalický materiál a jejich tvarová stálost za tepla je výrazně závislá na zatížení. Ve srovnání s ABS je tepelná odolnost značně vyšší při malém namáhání. Při větším zatížení Nylon ve srovnání s ABS méně odolný a vyznačuje se menší tuhostí za vyšších teplot. Polyamidy lze svařovat, lepit a pokovovat. Nylon může být transparentní [4].

Nylon není příliš obvyklý materiál pro 3D tisk, protože se tiskne za teplot přes 300 °C. Jeho výhodou jsou dobré mechanické vlastnosti a to i za vyšších teplot.

4.8 Shrnutí vlastností

Tab. 1 Přehled významných vlastností plastů [3, 26].

Polymer	Hustota [g /cm]	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Tvrdost kuličkou 10 s [MPa]	Rázová houže- vnatost [kJ/m ²]	Čírost	Nasákavost za 24 h [%]
ABS	1,03 až 1,06	32 až 50	15 až 30	1900 až 2800	80 až 120	70 až N	3	0,2 až 0,45
Nylon 6	1,13	40 až 50	200 až 300	900 až 1400	75	N	1 až 2	1,3 až 3,5
PET	1,37	50 až 80	30 až 300	3000	200	N	1 až 2	0,3
HIPS	1,05	20 až 50	25 až 60	1800 až 3800	80 až 130	38 až 80	3	0,05 až 0,6
PLA	1,24 až 1,26	14 až 70	1 až 12	310 až 5600	-	-	1 až 2	1,3

1-transparentní, 2 – opalescentní, 3 – netransparentní, N neláme se

Tab. 2 Přehled tepelných vlastností polymerů [3].

Polymer	Teplota použití (°C)			Tvarová stálost (°C)	Koeficient lineární roztlačnosti [K ⁻¹ · 10 ⁶]	Tepelná vodivost W [m ⁻¹ · K ⁻¹]	Speci- fické teplo [kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]
	max. krátko- době	max. dlouho- době	min. dlouho- době	Vicat 5kg			
ABS	85 až 100	75 až 85	-40	95	50 až 110	0,16 až 0,19	1,3
Nylon 6	140 až 180	80 až 100	-30	180	70 až 120	0,21 až 0,29	1,7
PET	200	100	-20	188	70 až 80	0,24	1,05
HIPS	60 až 80	50 až 70	-20	77	60 až 100	0,16 až 0,18	-

Zkouška tvarové stálosti Vicat udává teplotu při které dojde ke vtlačení jehly s plochým koncem s kulatým nebo čtvercovým průřezem o ploše 1 mm² do hloubky 1 mm. Zatěžovací síla je 10 N (zkouška Vicat typ A) nebo 50 N (zkouška Vicat typ B) [27].

Tab. 3 Přehled cen běžných tiskových strun na českém trhu k 12. 5. 2015.

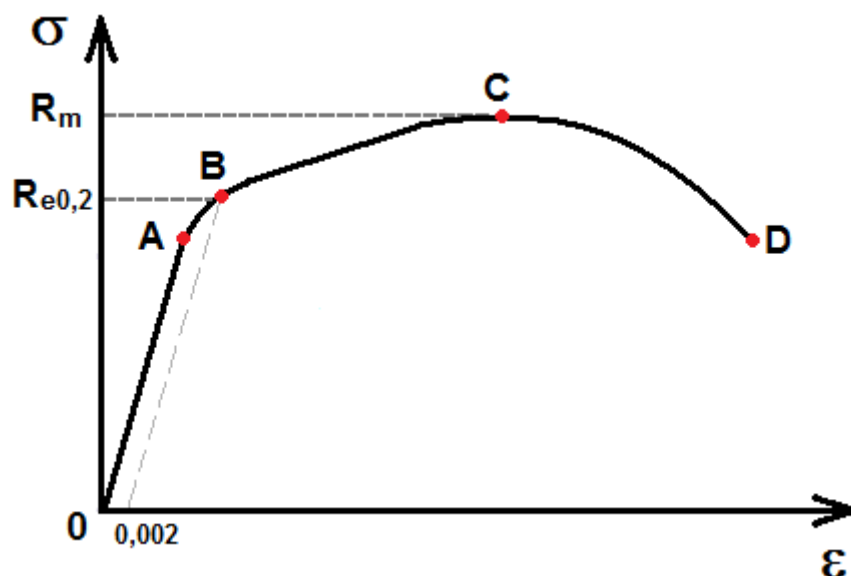
Tisková struna	Průměr struny [mm]	Počet cen [-]	Průměrná cena [kč]	Hustota [g/cm ³]	Měrná cena [kč/cm ³]
ABS	1,75	4	530	1,05	0,56
	3	4	521	1,05	0,55
PLA	1,75	4	536	1,25	0,67
	3	4	536	1,25	0,67
PET	1,75	3	679	1,37	0,93
	3	3	660	1,37	0,90
PVA	1,75	4	1090	1,25	1,36
	3	3	1120	1,25	1,40
HIPS	1,75	3	636	1,08	0,69
	3	2	553	1,08	0,60
NYLON	1,75	1	506	1,13	0,57
	3	1	506	1,13	0,57

5 CÍL EXPERIMENTU A JEHO REALIZACE

Cílem experimentu je porovnat a vyhodnotit mechanické vlastnosti termopolymery vytištěného na 3D tiskárně typu reprop, který byl vyroben za přesně definovaných parametrů. Experiment je zaměřen především na méně obvyklý materiál PET, ale pro srovnání byly provedeny i test několika vzorků z ABS a PLA. Mezi jedny z nejdůležitějších mechanických vlastností patří mez pevnosti v tahu a tažnost. Měření bude proto provedeno tahovou zkouškou.

5.1 Zkouška tahem

Testovaný vzorek je zatěžován podél hlavní podélné osy konstantní rychlostí, dokud napětí (pokles síly při utržení zkušební vzorku), nebo prodloužení nedosáhneme přednastavených hodnot. Během tohoto procesu měříme odporovou sílu, kterou působí vzorek na dynamometr umístěný v měřicím zařízení a prodloužení vzorku. Výsledkem tahové zkoušky je tahová křivka.



Obr. 23. Tahová křivka materiálu se smluvní mezí kluzu.

Tvar tahové křivky je pro různé látky jiný. Pro řadu materiálů lze tuto závislost vyjádřit křivkou znázorněnou na obrázku uvedeném výše. Počáteční část křivky až po bod A, je přímkového tvaru, napětí je úměrné deformaci, látka se chová dle Hookova Zákona. Napětí v Bodě A se označuje jako mez úměrnosti. Materiál se chová až do bodu B pružně. To znamená, že pokud odlehčíme zatížení, materiál se vrátí do svého původního délky. Mezi body A a B se materiál již chová jako neliniárně elastická látka. Napětí v bodě B označujeme $R_{e0,2}$ a představuje mez pružnosti nebo také mez elasticity. Index 0,2 vyjadřuje materiál se smluvní mezí kluzu. Po překročení meze pružnosti začíná materiál plasticky téct a po odtížení zůstane trvale deformován. Bod maxima křivky je označen bodem C a vyjadřuje maximální sílu, kterou je vzorek schopen přenést. Tento bod se nazývá mez pevnosti v tahu (R_m) a patří mezi nejdůležitější parametry materiálu. Po překročení meze pevnosti se začne průřez vzorku zmenšovat. Tato změna průřezu se nazývá vznik

krčku. Průřez se zmenšuje až do bodu D, kdy dojde k utržení vzorku. K tomuto bodu vyhodnocujeme tažnost A.

Výpočet meze pevnosti se počítá dle vztahu

$$R_m = \frac{F}{S} = \frac{F}{a \cdot b} \text{ [MPa]} \quad (7)$$

Výpočet tažnosti se řídí vztahem

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (8)$$

5.1.1 Tahová zkouška dle ISO 527

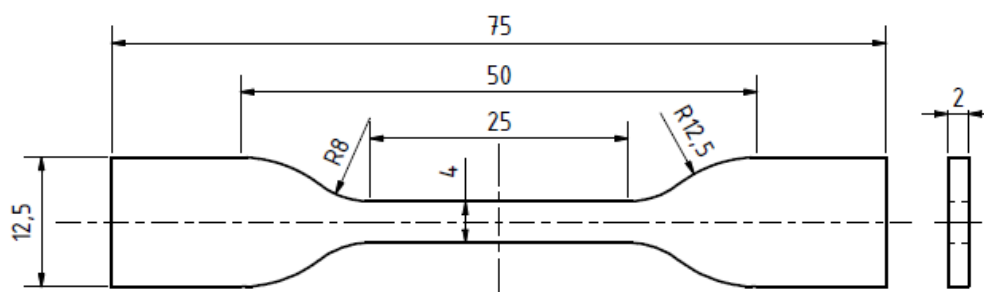
Tahová zkouška dle ISO 527 slouží k určení tahových charakteristik tvářených a vstřikovaných plastů. Existuje několik typů vzorků, které jsou určeny pro konkrétní typ materiálu (homogenní, vyztužené vlákny, krystalické polymery atd). Tyto vzorky jsou definovány preferovanými rozměry. Pokud jsou testy provedeny na vzorcích o nenormalizovaných rozměrech, nebo vzorcích, které byly připraveny za jiných než předepsaných podmínek, dochází k dosažení výsledků, které nejsou plně srovnatelné se standardními zkouškami. Dalším parametrem, který je nutno dodržet je rychlost průběhu tahové zkoušky z doporučených hodnot [21].

5.1.1.1 Počet měřených vzorků

Norma ISO527 předepisuje použití alespoň 5 vzorků, pro každý experiment. Vzorky u kterých došlo, k utržení v upínacích částech mají být vyřazeny a nahrazeny novým vzorkem [21]. Vzhledem k plánovanému množství zkušebních tyčí budou použity pouze 3ks na každý typ vzorku.

5.1.1.2 Tvar vzorku

Norma ISO 527 definuje pro různé materiály doporučený tvar vzorků. Vzhledem k uvažovaným materiálům a množství testovaných vzorků je pro experiment nejvhodnější použít typ vzorku označovaný jako 5A.



Obr. 24. Rozměry vzorku 5A dle normy ISO527-2 [22].

5.1.1.3 Rychlost zatěžování

Vzhledem k tomu, že experiment je zaměřen na materiál PET, který má dle literatury tažnost 30 až 300 %, je vhodné použít vyšší rychlost. Z doporučených hodnot z normy ISO 527 je zvolena rychlost zatěžování 10 mm/min. Pro určení Youngova modulu pružnosti E je určena rychlost zatěžování 1 mm/min, ale vzhledem k tomu, že na určení této hodnoty není experiment zaměřen, není na tuto rychlost brána v potaz a hodnoty E uvedeny v souhrnné tabulce jsou spíše orientační.

5.1.2 Měřící zařízení

Měření proběhlo na stroji Zwick Z010, který je přímo určené pro normu ISO 527. Maximální tahová síla vyvozená strojem činí 10 kN. Rychlost pohybu čelistí se pohybuje od 0,0005 do 2000 mm/min [23]. Pro vzorek 5A byly na stroji nasazeny čelisti o maximální upínací síle 2,5 kN. Tyto čelisti byly od sebe vzdáleny 50 mm v souladu s normou ISO 527..

Rozměry každého vzorku byly před samostatnou zkouškou přeměřeny a zadány do softwaru. Tento software na příslušném pracovišti z těchto dat vyhodnocuje mez pevnosti v tahu, tažnost, a Youngův modul pružnosti.



Obr. 25. Zařízení Zwick Z010 pro měření zkoušky tahem.

5.1.3 Laboratorní podmínky

Všechny zkušební tyče byly testovány v laboratoři, ve které se po dobu měření byla teplota vzduchu 17 °C. Vlhkost vzduchu byla 29 %.

5.2 Měřené parametry tisku

Mezi klíčové technologické parametry 3D tisku metodou FDM patří výška vrstvy, teplota, a orientace drah a ve kterých je objekt tištěn. Na další parametry, jako je například rychlost tisku a přesnost, nebyl v experimentu brán zřetel, protože tyto parametry závisí na tuhosti konstrukce tiskárny, a nejsou jednoznačně vypovídající, protože na každé tiskárně bude dosaženo rozdílných výsledků.

Konstantní parametry pro všechny vzorky:

- Rychlost polohování je pro všechny vzorky 50 mm/s.
- Šířka tištěné stopy 0,5mm (šířka trysky 0,4 mm)
- Teplota okolí při tisku: 24 až 26 °C
- Tisková tryska není ofukována

5.2.1 Materiál a vliv teplot

Experiment je zaměřen na méně obvyklý materiál PET. Pro srovnání jsou provedeny i srovnávací testy na materiálech ABS, ABS A1 a PLA. Materiál ABS A1 je ABS s jiným poměrem jednotlivých složek akrylonitrilu, butadienu a styrenu, než je běžné pro klasické ABS struny pro domácí tisk.

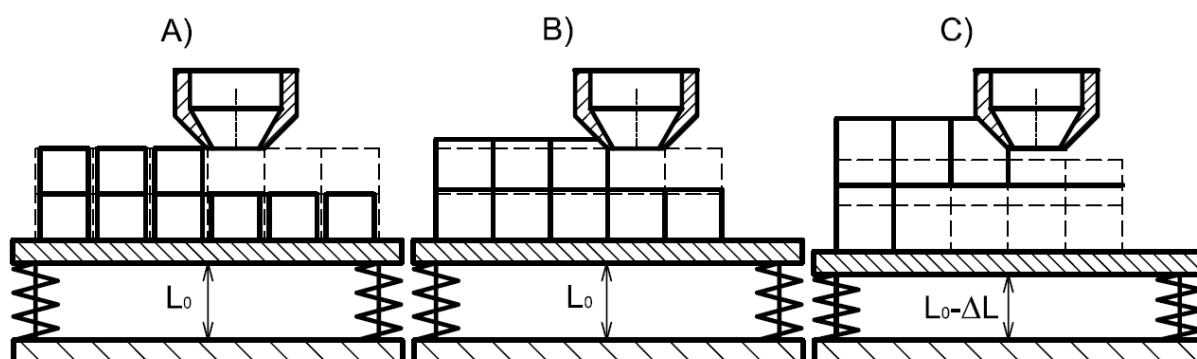
Doporučené teploty pro tisk jsou obvykle uvedeny na cívce s tiskovou strunou, případně jsou uvedeny na stránkách prodejce. Teploty jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab. 4 Tiskové struny pro experiment a teploty použití.

Materiál	Doporučená teplota tisku výrobcem [°C]	Zkoušené teploty při experimentu [°C]	Teplota vyhřívání podložky [°C]
PET	220-260	220, 230, 240, 250, 260	70
ABS	200-230	230, 240, 250	105
ABS A1	220-240	230, 240, 250	105
PLA	220	220, 230	70

Pro standardní materiál ABS, byly zvoleny vyšší teploty, než udával výrobce, protože při běžném tisku byla vyzorována horší spájitost vláken za teplot 220 °C a nižších.

Všechny uvedené materiály mají nominální průměr drátu 1,75 mm. Např u PET výrobce udává toleranci $\pm 0,05$ mm. Ve skutečnosti se tento průměr pohybuje v hodnotách 1,64-1,72 mm. Vzhledem k eliminaci dutin a defektů v materiálu byl v Softwaru nastaven průměr struny na spodní hodnotě tj 1,65 mm. Vliv podávaného množství znázorňuje následující obrázek. Obrázek A vyjadřuje stav, kdy je nastaveno příliš málo podávaného materiálu a dochází ke vzniku defektů v podobě dutin v tištěném tělese. Stav B znázorňuje stav, při kterém je přidáváno o něco více materiálu, než je potřeba. Stav C představuje extrémní případ, kdy se horká tryska brodí již vytištěným materiálem. Ve stavu C závisí na dalších okolnostech, jako je vliv teplot a rychlost pohybu trysky, které mohou způsobit, že odpružený stůl uhne tištěnému materiálu. Hotový vytištěný objekt, může mít větší rozměr, než byl pohyb tuhé osy Z.



Obr. 26. Znázornění vlivu nastavení množství toku materiálu.

Během tištění vzorků pro experiment docházelo u materiálu PET ke stavu B. Pouze u srovnávacích testů jiných materiálů došlo i ke stavu C. Vzhledem k tomu, že každý vzorek byl přeměřen, na jeho výslednou hodnotu mechanických vlastností to nemělo vliv.

5.2.2 Vliv výšky vrstvy

Experiment na materiálu PET se lze z hlediska výšky rozdělit do dvou skupin rozdělit do dvou skupin.

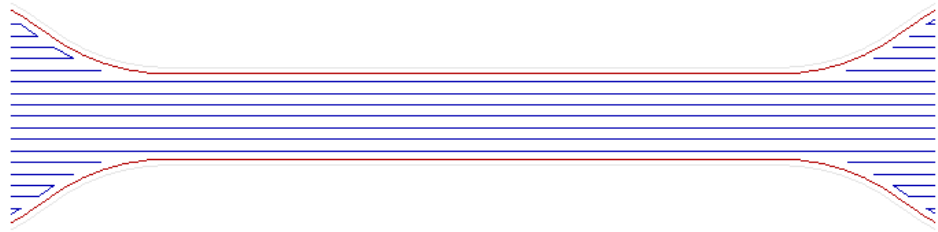
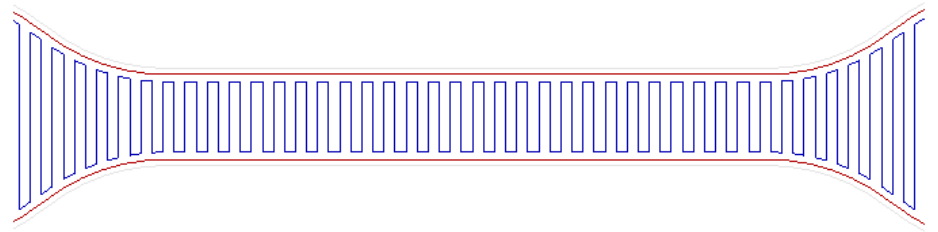
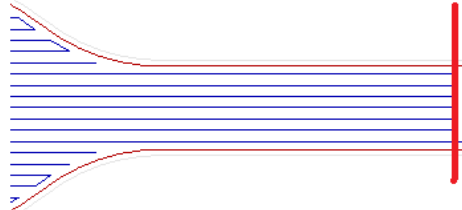
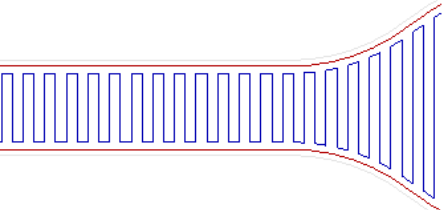
První skupinu tvoří vzorky ve třech tloušťkách tj 0,1 mm ; 0,2 mm a 0,4 mm, které jsou tisknuty při dalších variabilních parametrech, které jsou rozvedeny níže.

Druhý pokus tvoří vzorky tištěné ve vrstvách 0,05 až 0,4mm, s postupně rostoucí tloušťkou po 0,05 mm. Tento experiment proběhne za konstantní teploty tisku a stejného uspořádání vláken.

Pro ostatní materiály ABS, ABS A1 a PLA proběhne kontrolní ověření při konstantní tloušťce vrstvy 0,2 mm.

5.2.3 Vliv drah

Je zřejmé, že orientace drah, ve kterých pokládá tisková hlava vlákno, bude mít zásadní vliv na pevnost vytištěné součásti. Pro porovnání jednotlivé orientace drah byly vybrány základní orientace vláken:

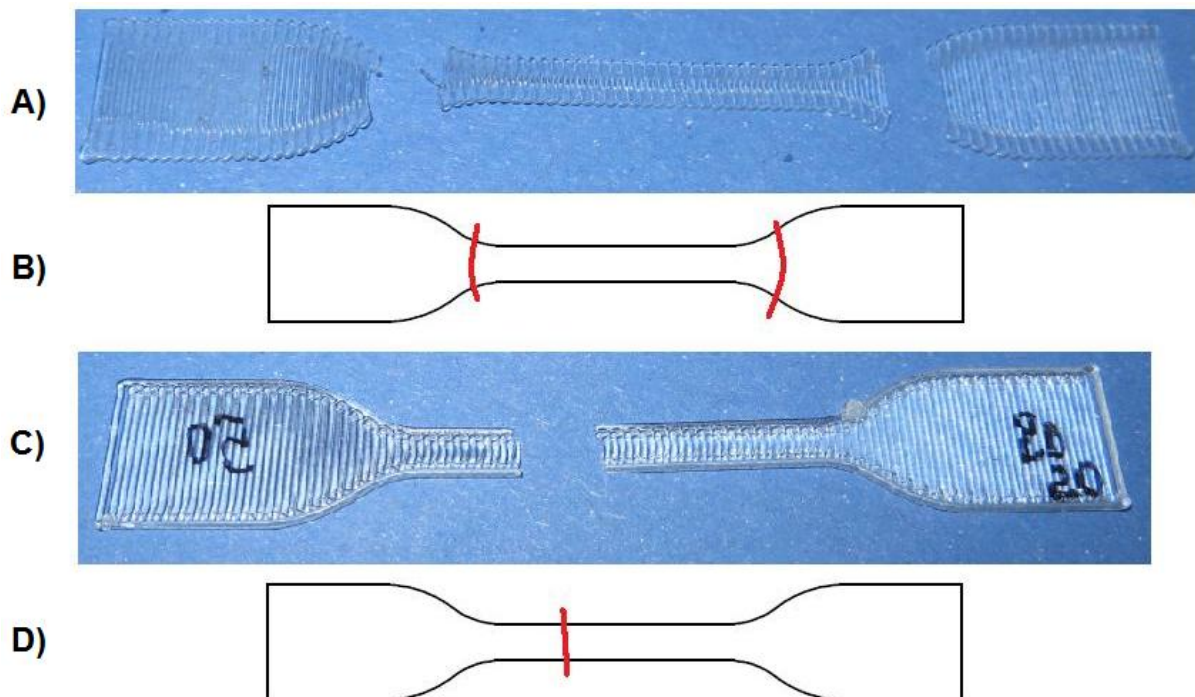
Typ	Úhel drah:	Schéma zúžené části vzorku 5A
A	0°	
B	90°	
C	Střídající se 0° a 90°	Liché vrstvy 0°  Sudé vrstvy 90° 

Obr. 27. Typy vzorku.

Logickým předpokladem je, že typ A snese nejvyšší zatížení. Účelem typu B je prověřit vliv spájení jednotlivých vláken za zvyšujících se teplot. Typ C, který je kombinací A a B je v praxi daleko častěji používán, a má za úkol prověřit zda se naměřené hodnoty budou mít předpokládanou velikost.

Následující obrázek znázorňuje vliv obvodové stěny u vzorku typu B. Pokus na vzorku vysokém pouze jednu vrstvu a který byl roztržen ručně, lze vidět, jak neblahý vliv mají jednotlivé vruby, které byly vytvořeny bez použití obvodové stěny. Na fotce A, lze vidět, že k utržení došlo v nejméně pravděpodobném místě, mimo zúženou část, kde se vzorek již rozšiřuje. Druhý lom byl vyzkoušen na zbytku vzorku po prvním pokusu, a opět došlo k utržení za rozšiřující se části vzorku. Vzhledem k průhlednosti materiálu PET jsou místa lomu znázorněna na schématu B).

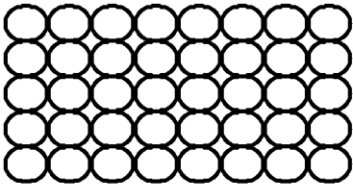
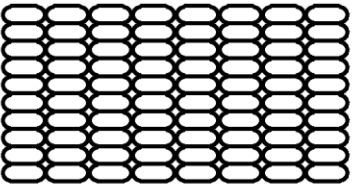
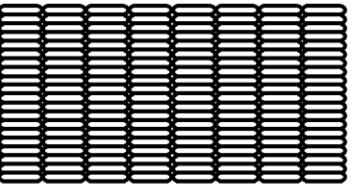
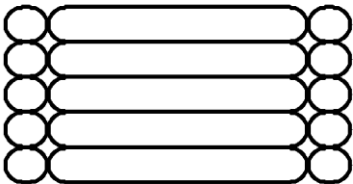
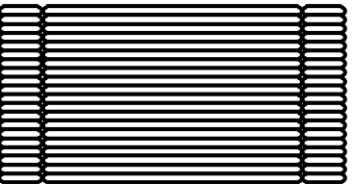
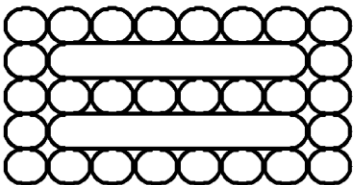
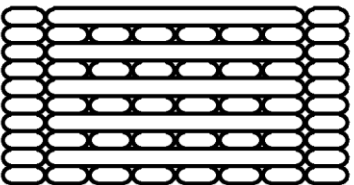
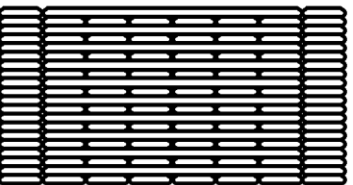
Při druhém pokusu o ruční roztrhnutí tenkého vzorku s dráhami orientovanými ve směru B, u kterého je použito obvodové stěny, lze vidět na obrázku C, a zvýrazněném na schématu D. Je patrné, že k roztržení došlo na správném místě.



Obr. 28. Experiment pro ověření nutnosti použití obvodové stěny vzorku typu B.

Vrstvy typu B (a samozřejmě taky C) musí proto obsahovat obvodovou stěnu. Tato obvodová stěna v podobě vláken namáhaných na tah však zvýší mez pevnosti v tahu daného vzorku. Vlákná v průřezu rozdělíme do dvou typů, a to vlákna namáhaná na tah a vlákna k sobě spájená. Podíl jednotlivých vláken znázorňuje následující tabulka:

Tab. 5 Znázornění průřezů vzorky při různých parametrech

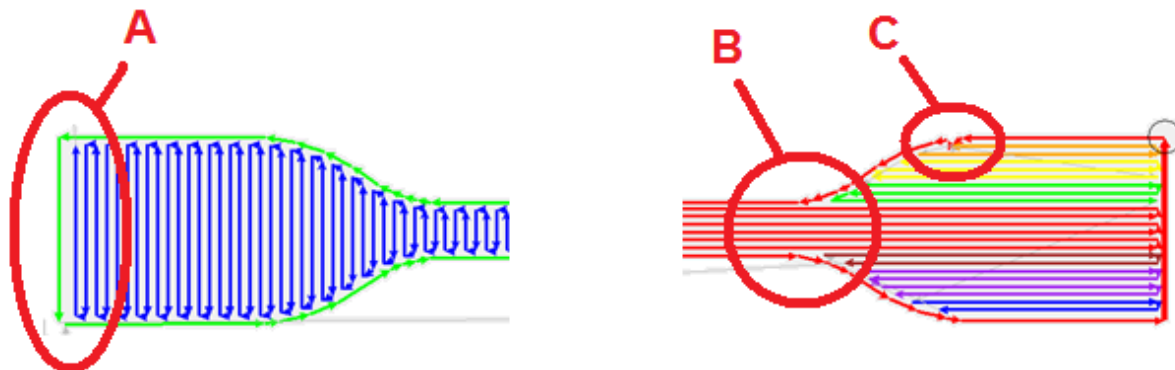
	h 0,4			h 0,2			h 0,1		
A									
B									
C									
	T	S	eT	T	S	eT	T	S	eT
A	40	0	0	80	0	0	160	0	0
B	10	5	30	20	10	60	40	20	120
C	28	2	12	50	5	30	100	10	60

T - vláken tahových, S - vláken spájených, eT – plošný ekvivalent vláken tahových pro danou výšku vrstvy

5.2.3.1 Tvorba G-kódů zkušebních vzorků

Jak bylo uvedeno v kapitole software pro generování G-kódů pro náročnější aplikace by měl být vhodnější Skeinforge. Výhodné v programu Skeinforge jsou moduly Tower, který může dělat nejprve jeden celý vzorek a potom přejít na další a možnost Odd layer rotation (jiná lichá a sudá vrstva) v modulu Fill. Tyto možnosti předurčují Skeinforge jako ideálního kandidáta pro tvorbu vzorku A a B. Bohužel opak je pravdou. Při běžném 3D tisku se používá výplň například 10-20 %. To znamená, že je objekt plný dutin do kterých může odtéct materiál, který je navíc, například z důvodů špatně nastaveného průměru tiskové struny, nebo jejího nestálého se průměru. V případě plně vyplněného tělesa (výplň na 100 %), ovšem není prostor na chyby a vzhledem k tomu kolik neintuitivních parametrů je nutné nastavit, aby program fungoval, je časová náročnost na odladění programu pro plný materiál naprosto zdrcující. Jen namátkou lze zmínit, že například Infill density (hustota výplně), která má být logicky 1, lze nastavit nejvýše na hodnotu 0,3 a zbytek parametrů je nutné řešit jinými nastaveními, rozházenými do několika modulů. Po té co se povedlo odladit vzorek typu B na poměrně slušnou úroveň, vzorek typu B u

kterého by mělo dojít jen k otočení úhlu výplně o 90° vůbec nefungoval, a bylo nutné začít úplně od nuly, a hledat a odlaďovat jednotlivé parametry. K tomu navíc Skeinforge dělá zbytečné chyby, viz následující obrázek.



Obr. 29. Chyby při generování G-kódu v programu Skeinforge.

A představuje vytváření nesmyslných dutin, u jedné obvodové stěny, je vidět že u ostatních stěn výplň plně vyplňuje těleso; B vyjadřuje asymetrii ve středové části; C ukazuje nesmyslný vrub.

Ve výsledku bylo nutné od programu Skeinforge ustoupit a přejít na Slic3r a ruční editaci G-kódů.

Program Slic3r vygeneruje okamžitě a „napoprvé“ krásný G-kód v technologických limitech tohoto programu. Bohužel chybí funkce výše uvedená funkce Odd layer rotation a je nutné otevřít vygenerovaný G-kód v textovém editoru a smazat sudé vrstvy programu a nahradit je lichými, což je velmi pracné. Protože každý vzorek je vyroben po třech kusech, je vhodné vyrábět všechny tři vzorky v jednom souboru. Toho lze docílit tak dvěma způsoby:

- 1) Ve Slic3ru lze zadat výrobu 3ks, které se budou tisknout všechny zároveň. To znamená 1. vrstva na 1. vzorku, 1. vrstva na 2. vzorku, 1. vrstva na 3. vzorku, 2. vrstva na 1. vzorku a tak dále. Lepší je vytvořit každý objekt postupně, aby měli teploty větší vliv na tištěný objekt, což je cílem tohoto experimentu. Tento způsob by také obnášel nahrazování třikrát více vrstev tělesa u vzorků A a B.
- 2) Tisknout tělesa postupně v relativním prostoru. Výhodou oproti předchozí metodě je zmíněný vliv teplot a menší editace G-kódu, protože stačí editovat pouze jedno těleso a nahrát před program samotného tisku:

G28 ; snulovat vsechny osy před kazdym tiskem

G1 X0 Y100 Z0 F3000 ; posun pocatku na zvolene souradnice napr Y100

G92 X0 Y0 Z0 E0; snulovani pocatku v nove souradnici

G21 ; nastaveni jednotek na milimetry

G90 ; pouziti absolutnich souradnic

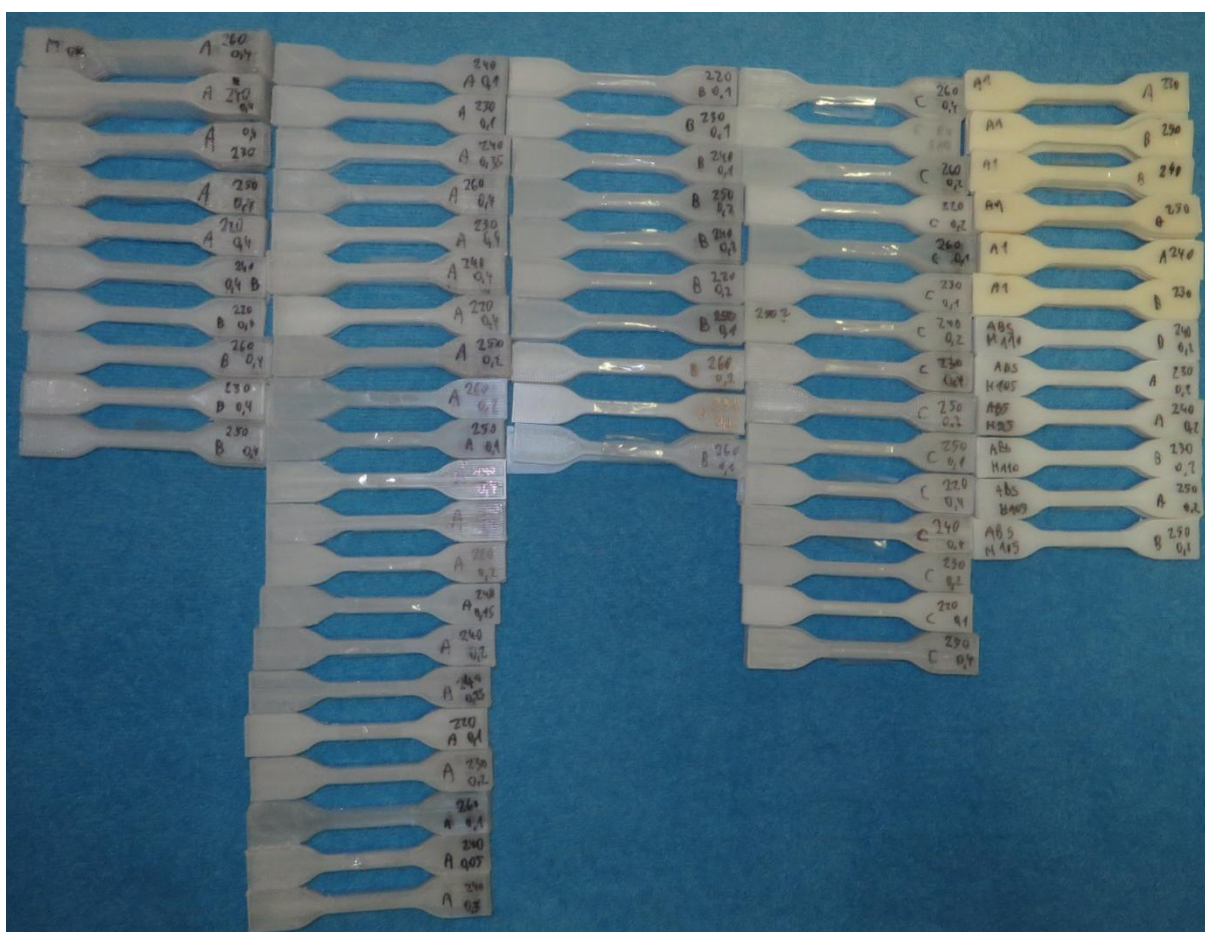
M82 ; pouziti absolutnich souradnic pro vylucovani struny.

G-KOD TISKU SOUCASTI

5.3 Shrnutí měřených technologických parametrů

Tab. 6 Souhrnný přehled kombinací měřených parametrů.

Materiál	Typ vzorku [-]	Teplota [°C]	Výška vrstvy [mm]	Skupin vzorků	Kusů
PET	A, B, C	220	0,1 ; 0,2 ; 0,4	9	27
PET	A, B, C	230	0,1 ; 0,2 ; 0,4	9	27
PET	A, B, C	240	0,1 ; 0,2 ; 0,4	9	27
PET	A	240	0,05 ; 0,015 ; 0,25; 0,3 ; 0,35	5	15
PET	A, B, C	250	0,1 ; 0,2 ; 0,4	9	27
PET	A, B, C	260	0,1 ; 0,2 ; 0,4	9	27
ABS	A, B	230	0,2	2	6
ABS	A, B	240	0,2	2	6
ABS	A, B	250	0,2	2	6
ABS A1	A, B	230	0,2	2	6
ABS A1	A, B	240	0,2	2	6
ABS A1	A, B	250	0,2	2	6
PLA	A, B	220	0,2	2	6
PLA	A, B	230	0,2	2	6
Celkem:				66	198

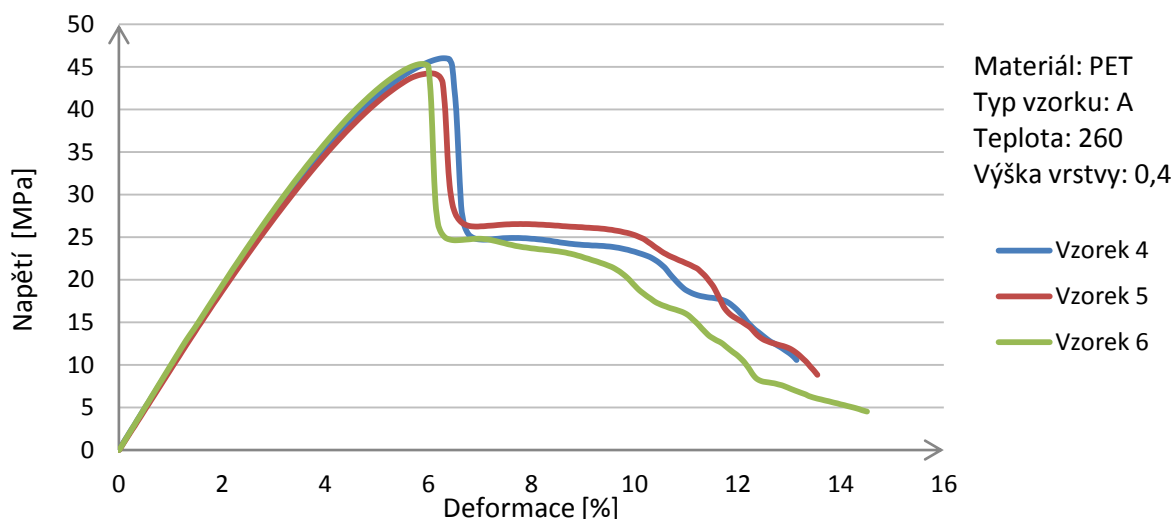


Obr. 30. Hromadná fotka skupin testovaných vzorků (na snímku chybí PLA).

6 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

6.1 Mez pevnosti v tahu

Každý experiment byl proveden ve třech kusech. Tyto křivky se od sebe vždy liší. Pro další výpočty a úvahy budeme vždy počítat průměrnou mez pevnosti z lepších dvou vzorků (R_{mp2+}). Na následujícím grafu je znázorněn průběh tahové zkoušky, kde došlo k postupnému utržívání vláken.

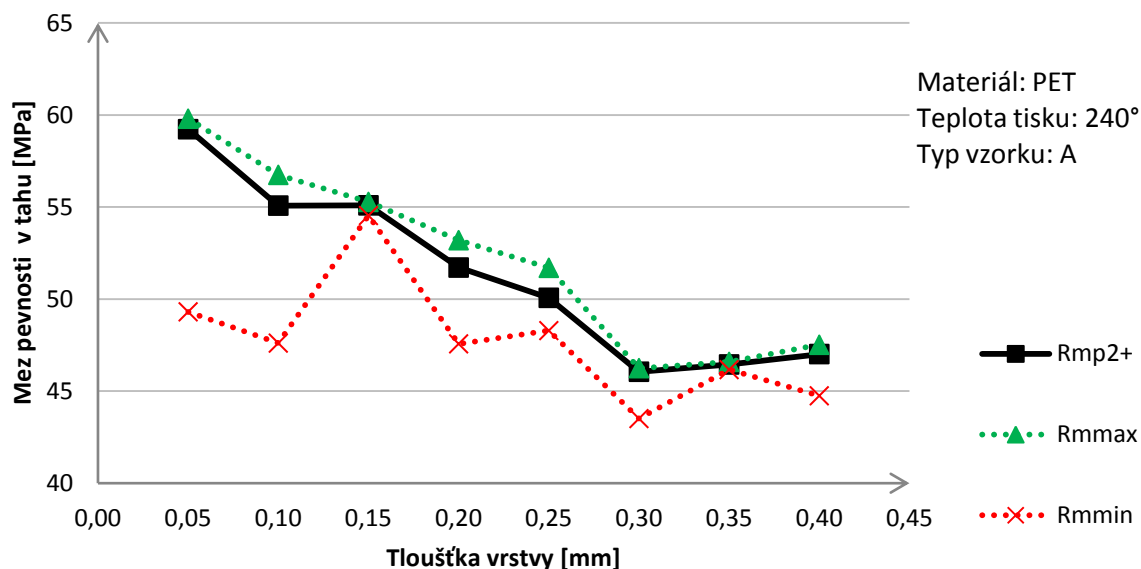


Obr. 31. Průběh tahové zkoušky pro vzorky 4, 5, 6.

6.1.1 Vliv závislosti meze pevnosti na tloušťce vrstvy

Pro tuto část experimentu bylo provedeno více vzorků o různých tloušťkách. Krok tloušťek byl zvolen o velikosti 0,05 mm v rozsahu 0,05 až 0,4 mm. Vyšší tloušťku generátor G-kódu neumožnil, protože by výška byla vyšší než průměr trysky tiskové hlavy. Experiment byl proveden za teploty 240 °C na vzorcích typu A.

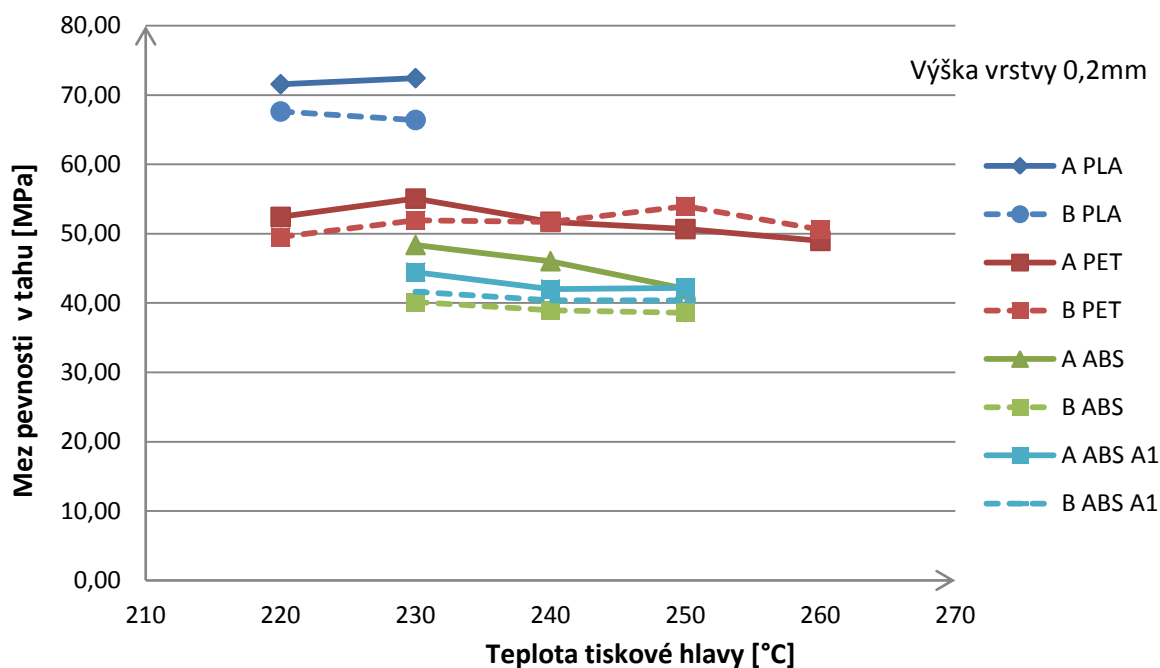
Vliv závislosti meze pevnosti na tloušťce vrstvy jednoznačně vyplývá z následujícího grafu. Je patrné, že s rostoucí výškou vrstvy se zmenšuje mez pevnosti v tahu.



Obr. 32. Závislost meze pevnosti na tloušťce vrstvy.

6.1.2 Vliv teplot tisku na mez pevnosti v tahu

Při srovnání teploty trysky při tisku na R_m docházíme k závěru, že ovlivnění teploty tisku nemá příliš zásadní vliv na pevnost. Všechny hodnoty R_m jednotlivých materiálů při dané orientaci vláken se pohybují v toleranci 5 MPa. Z následujícího grafu je patrný pokles meze pevnosti při orientaci vláken kolmo k ose zatěžování. Tento pokles je však mnohem menší než by se mohlo zdát.



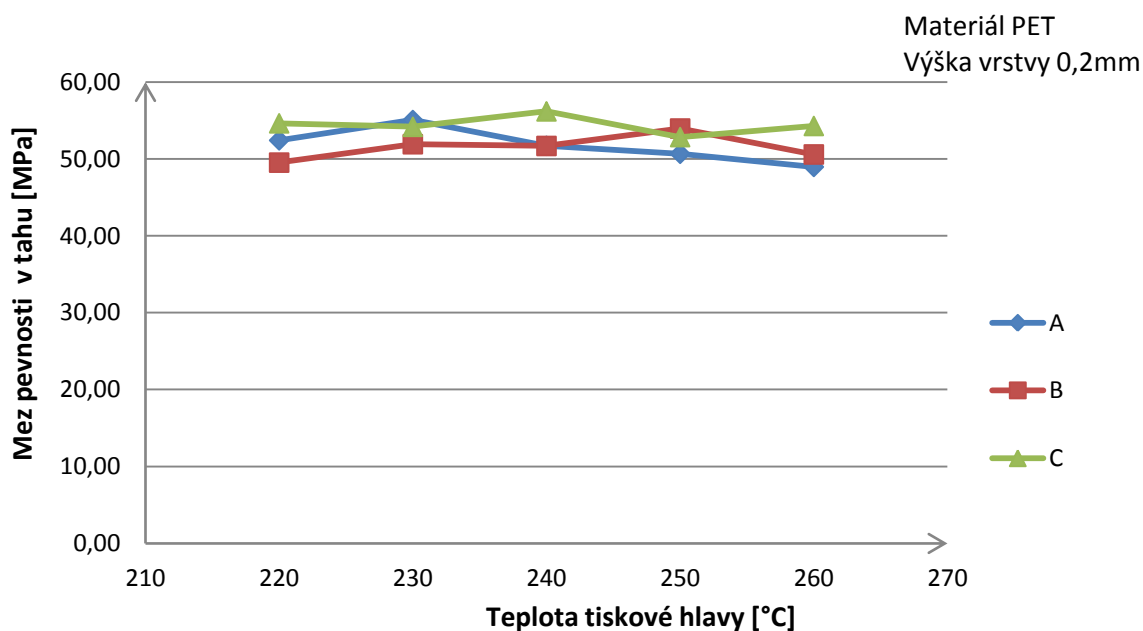
Obr. 33. Vliv teploty tisku na mez pevnosti v tahu.

Tab. 7 Poměr meze pevnosti vzorků A a B pro různé materiály.

	ABS			ABS A1			PET					PLA	
Teplota ->	230	240	250	230	240	250	220	230	240	250	260	220	230
R _m pro A	48,4	46,0	42,0	44,5	42,0	42,2	52,4	55,1	51,7	50,7	49,0	71,6	72,4
R _m pro B	40,1	39,0	38,6	41,6	40,4	40,4	49,5	51,9	51,7	54,0	50,6	67,6	66,4
B/A [%]	83	85	92	94	96	96	94	94	100	106	103	94	92

Bylo vyhodnoceno, že vzorky s vlákny orientovanými kolmo ve směru namáhání mají hodnotu R_m průměrně okolo 90% R_m vzorku s vlákny orientovanými rovnoběžně se směrem namáhání.

U materiálu PET je však situace mnohem komplikovanější. Jak vyplývá z DTA křivky pro materiál PET uvedené v rešeršní části této práce, nachází se teplota tavení materiálu (T_m) PET v hodnotách okolo 250 °C. Pokud porovnáme hodnoty R_m mezi jednotlivými typy vzorků. Dojdeme k zajímavému zjištění.

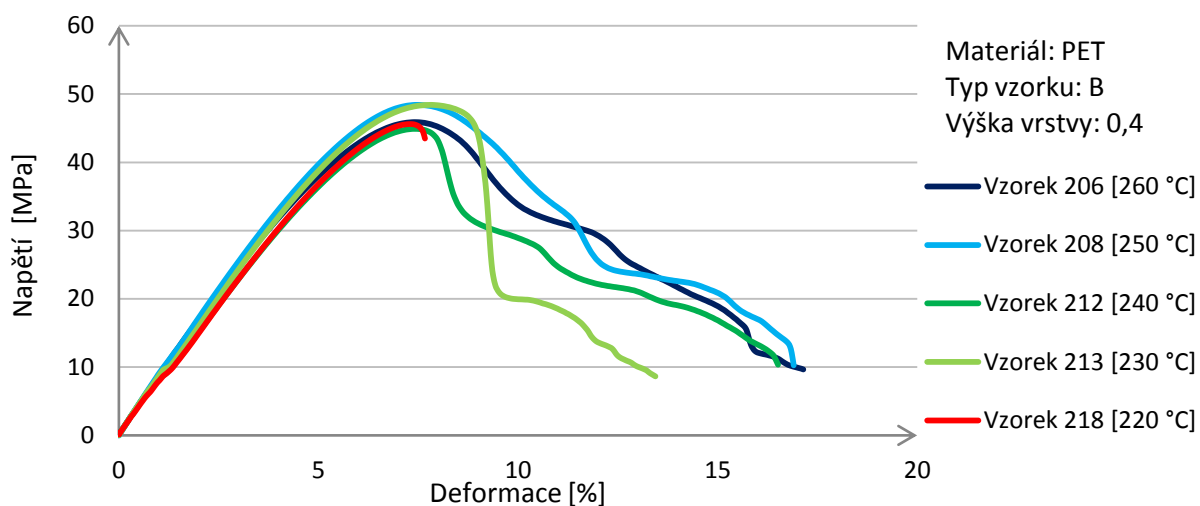


Obr. 34. Porovnání chování různých typů vzorků při rostoucí teplotě.

Lze pozorovat jev že roste R_m u křivky C za teplot nad bodem T_m , zatímco křivky B a A se vždy nacházejí v pod touto křivkou. Ten to jev lze zdůvodnit tím, že při chladnutí materiálu z teplot nad T_m dochází k tvorbě nových krystalů. Vyšší hodnoty R_m u vzorků typu C při teplotách tisku nad 250, může mít také způsobena vyšší anizotropií vláken, které se za těchto teplot lépe spojí.

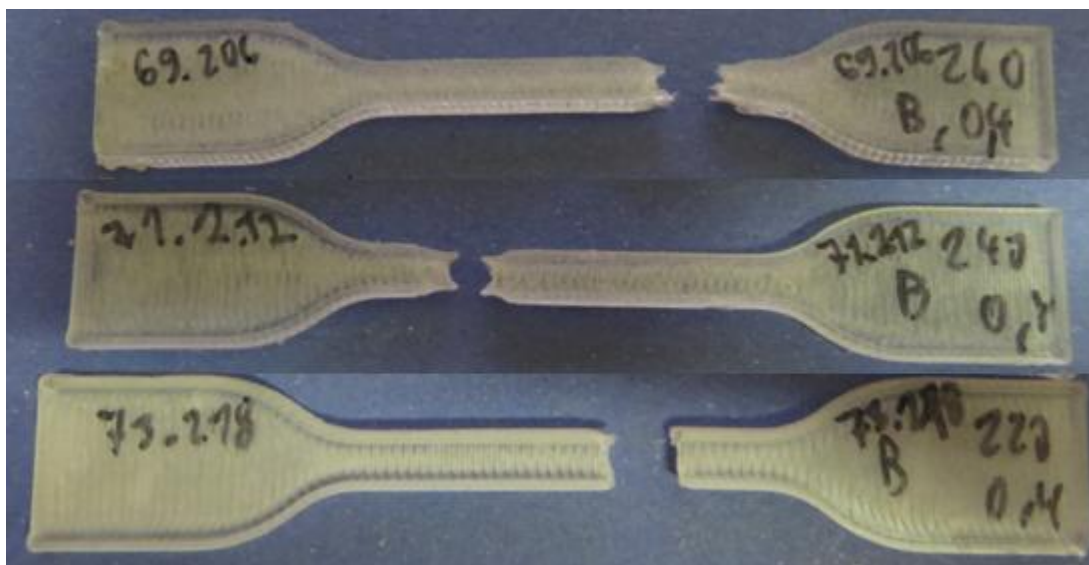
6.1.3 Podíl tvárného a křehkého lomu

U vzorků typu B, lze pozorovat, na lomové ploše, nárůst tvárného lomu se zvyšující se teplotou. Tento jev je patrný i z průběhu tahových křivek.



Obr. 35. Průběh tahové zkoušky pro vzorky 206, 208, 212, 213 a 218.

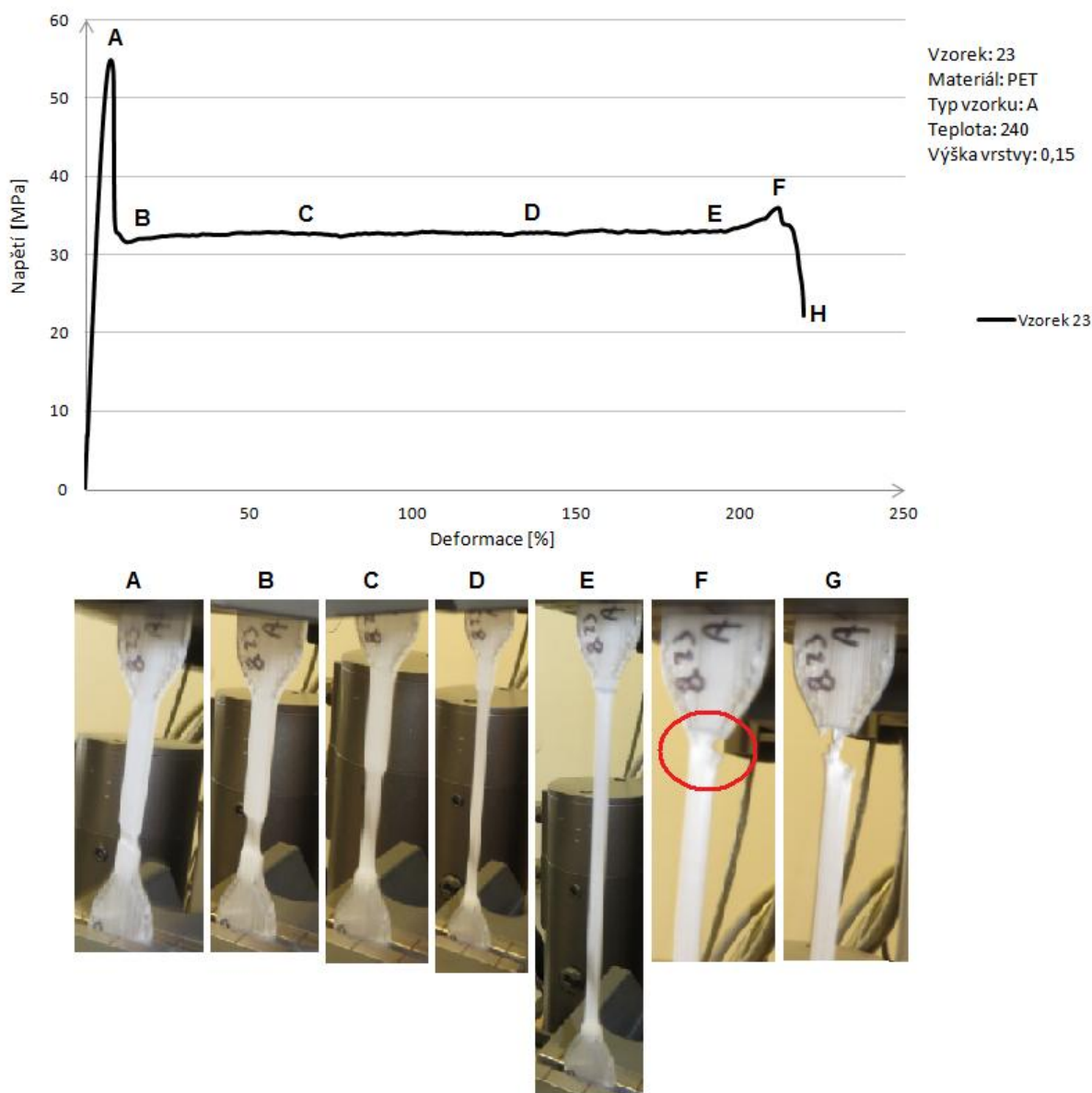
Zatímco za teplot 220 °C dochází ke křehkému lomu, od teplot 230 °C a vyšších převládá tvárný lom.



Obr. 36. Znázornění nárůstu tvárního lomu s zvyšující se teplotou na skutečných vzorcích.

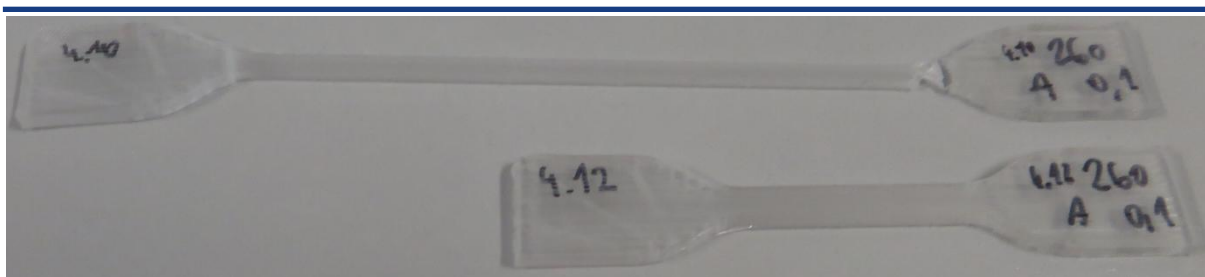
6.2 Tažnost

Materiál PET může dle literatury u vstřikovaných a tvářených těles dosahovat tažnosti až 300%. Některé vzorky dosahovali opravdu vysokých hodnot tažnosti (až 255 %). Ideální průběh tahového diagramu vzorků s vysokou tažností je vidět na následujícím grafu.

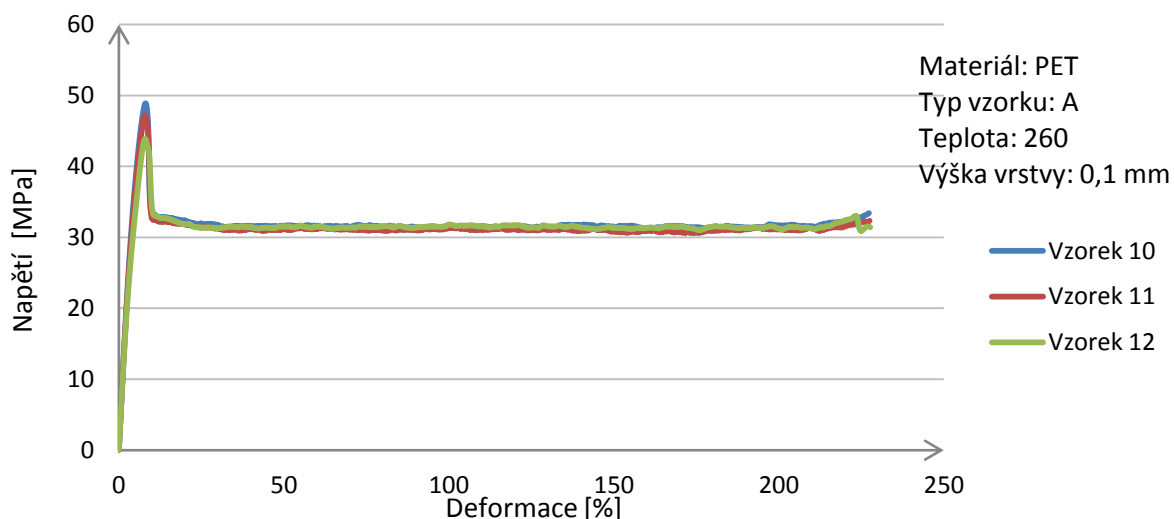


Obr. 37. Průběh tahové zkoušky u velmi tažného vzorku.

Poměr původního a nataženého vzorku lze vidět na následujícím obrázku 38. Z tahových křivek na obrázku 39 lze vyčíst, že vzorek 12 byl následně vytažen také na hodnotu přesahující 230 %.

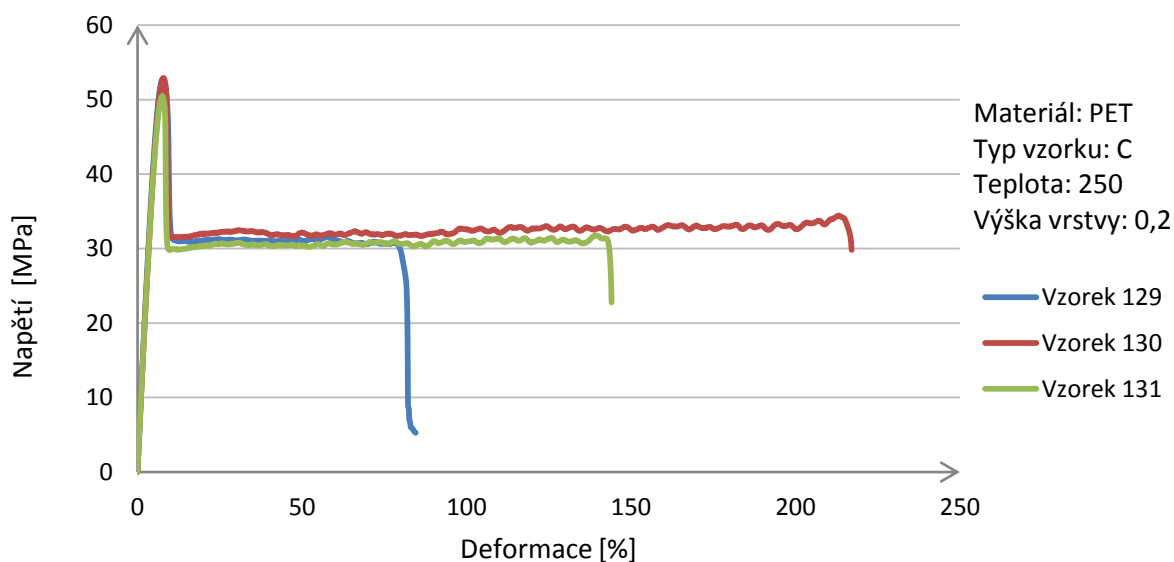


Obr. 38. Vzorek 10 po tahové zkoušce a jeho srovnání s vzorkem 12.



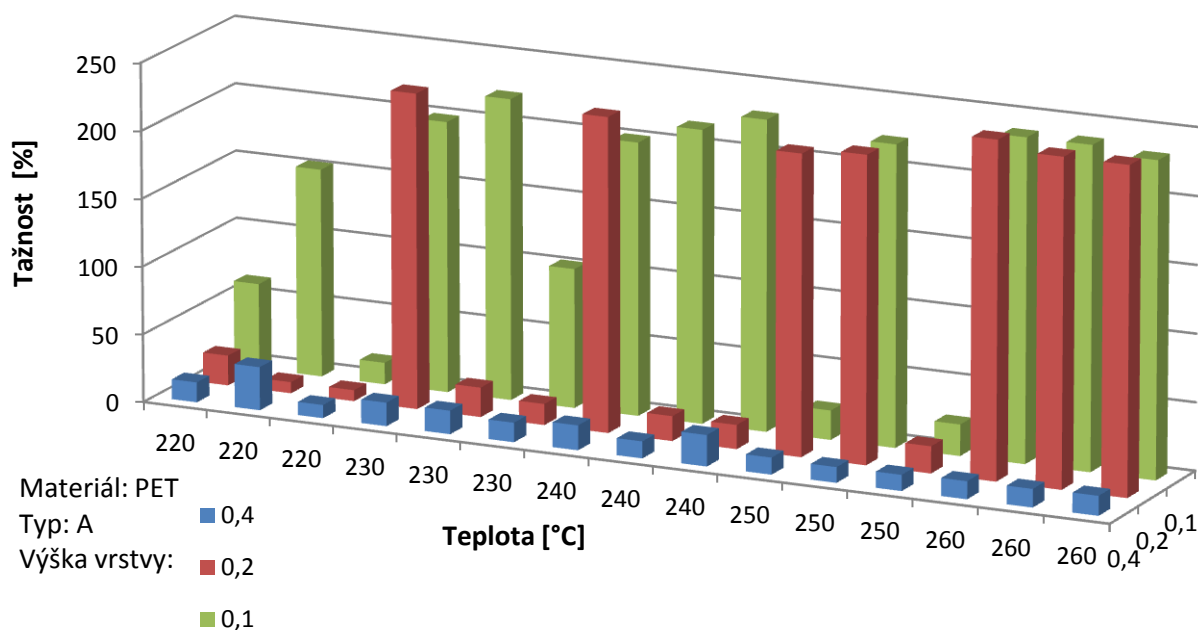
Obr. 39. Průběh tahové zkoušky pro vzorky 10, 11, 12.

V některých případech však došlo u jedné skupiny vzorků, k velmi rozdílným hodnotám v tažnosti..



Obr. 40. Průběh tahové zkoušky pro vzorky 129, 130, 131.

Uvedení průměrných hodnot, pro jednotlivé skupiny vzorků by nemělo příliš velký smysl. Proto jsou výsledky tažnosti shrnuty v následujících prostorových grafech.



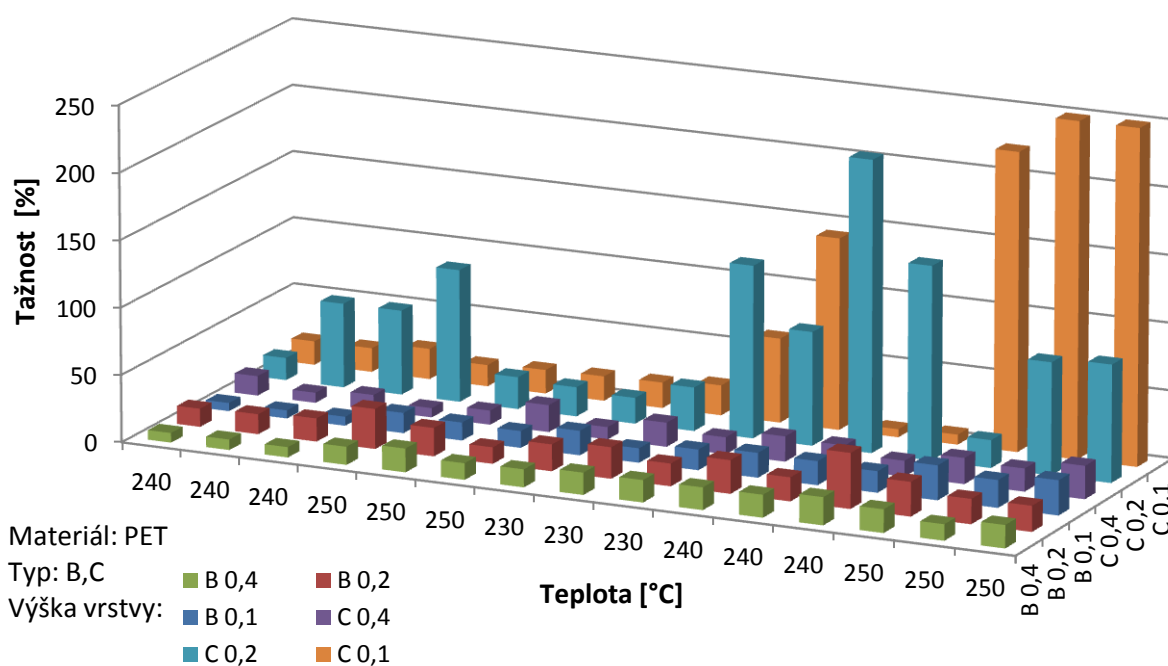
Obr. 41. Graf tažnost skupiny A pro materiál PET.

Experimentálně bylo zjištěno, že se zmenšující se výškou vrstvy a zvyšující se tažností roste pravděpodobnost, že vzorek projeví vysokou tažnost.

Tab. 8 Hodnoty tažnosti skupiny A pro materiál PET.

PET A		Teplota														
		220	220	220	230	230	230	240	240	240	250	250	250	260	260	260
0,1	Poř. č.	56	57	58	59	60	61	26	27	28	62	63	64	10	11	12
	Tažnost [%]	63	153	16	200	222	103	201	216	229	22	222	23	238	238	233
0,2	Poř. č.	53	54	55	50	51	52	20	21	22	47	48	49	7	8	9
	Tažnost [%]	22	8	8	232	22	16	232	18	18	222	226	20	248	241	241
0,4	Poř. č.	44	45	46	41	42	43	35	36	37	38	39	40	4	5	6
	Tažnost [%]	15	32	10	17	17	14	18	12	23	12	12	12	13	14	15

Tento trend platí i pro vzorky typu C. Vzorky typu B byly taženy maximálně na 30 %, průměrně hodnota se však pohybovala kolem 18 %. Žádný vzorek A, B, C pro materiál PET, který byl vytištěn při výšce vrstvy 0,4 mm nepřesáhl 32 %.



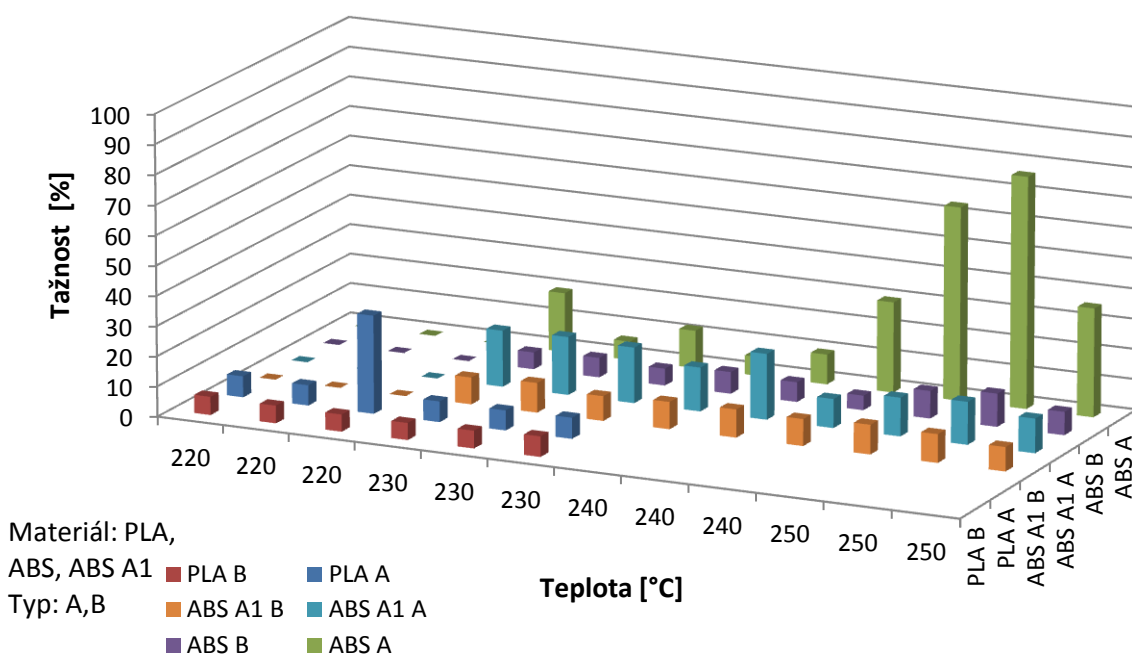
Obr. 42. Graf tažnost skupiny B a C pro materiál PET.

Tab. 9 Hodnoty tažnosti skupiny B a C pro materiál PET.

PET		Teplota														
		220	220	220	230	230	230	240	240	240	250	250	250	260	260	260
0,1	Poř. č.	91	92	93	88	89	90	85	86	87	82	83	84	79	80	81
	Tažnost [%]	6	6	7	15	13	12	18	11	15	18	18	16	26	21	26
0,2	Poř. č.	73	74	75	76	77	78	70	71	72	67	68	69	64	65	66
	Tažnost [%]	14	15	17	30	21	12	20	23	17	25	18	41	26	19	19
0,4	Poř. č.	216	217	218	213	214	215	210	211	212	207	208	209	204	205	206
	Tažnost [%]	7	8	8	13	18	12	13	16	17	17	17	21	17	12	17
PET C																
0,1	Poř. č.	153	154	155	150	151	152	147	148	149	144	145	146	141	142	143
	Tažnost [%]	18	18	23	16	18	18	19	22	63	143	6	7	222	255	252
0,2	Poř. č.	138	139	140	135	136	137	132	133	134	129	130	131	126	127	128
	Tažnost [%]	17	63	63	99	24	22	19	32	128	85	217	144	21	84	87
0,4	Poř. č.	123	124	125	120	121	122	117	118	119	114	115	116	111	112	113
	Tažnost [%]	15	8	11	7	11	20	9	18	13	19	18	12	19	17	25

6.2.1 Srovnání tažnosti s PLA, ABS, ABS A1

Jednotlivé naměřené hodnoty jsou shrnuty do následujícího grafu. Protože se naměřené hodnoty A pohybovaly řádově v nižších hodnotách než u materiálu PET, byla omezena výška osy tažnosti do 100%.



Obr. 43. Graf tažnosti.

Tab. 10 Hodnoty tažnosti skupiny A a B pro materiál PLA, ABS, ABS A1.

		Teplota											
PLA 0,2 mm		220	220	220	230	230	230	240	240	240	250	250	250
A	Poř. č.	195	196	197	192	193	194	-	-	-	-	-	-
	Tažnost [%]	7	7	33	7	7	7	-	-	-	-	-	-
B	Poř. č.	201	202	203	198	199	200	-	-	-	-	-	-
	Tažnost [%]	6	6	6	6	6	7	-	-	-	-	-	-
ABS A1 0,2 mm													
A	Poř. č.	-	-	-	180	181	182	177	178	179	174	175	176
	Tažnost [%]	-	-	-	19	19	18	15	22	10	13	14	11
B	Poř. č.	-	-	-	189	190	191	186	187	188	183	184	185
	Tažnost [%]	-	-	-	9	10	8	(1) 9	9	9	10	9	8
ABS 0,2 mm													
A	Poř. č.	-	-	-	162	163	164	159	160	161	156	157	158
	Tažnost [%]	-	-	-	20	6	12	6	10	30	64	77	36
B	Poř. č.	-	-	-	171	172	173	168	169	170	165	166	167
	Tažnost [%]	-	-	-	6	7	6	7	7	5	9	11	8

Žádný vzorek typu B neprojevil výraznou tažnost. U materiálu PLA došlo k ulomení všech vzorků křehkým lomem. Pouze 1 z 12 vzorků se táhnul na 32 %. Hodnoty tažnosti ABS A1 se pohybovaly stabilně mezi 8-22 %. U ABS lze pozorovat nárůst tažnosti se zvyšující se teplotou.

DISKUZE

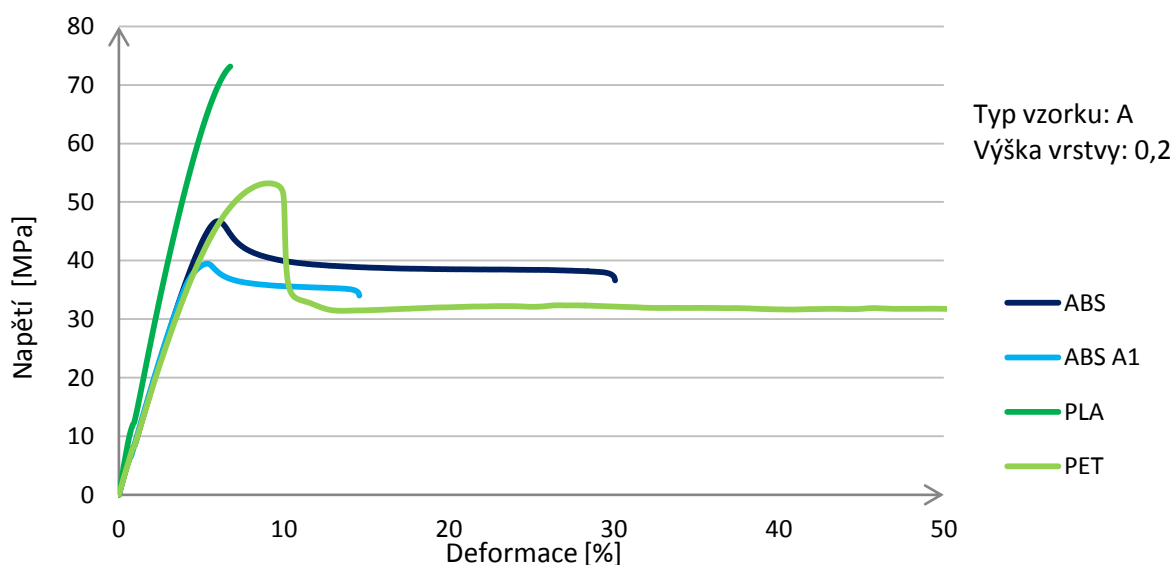
Zhodnocení závislosti parametrů tisku na mechanické vlastnosti

U materiálu PET bylo prokázáno, že se s rostoucí výškou tištěné vrstvy klesá mez pevnosti v tahu. Tento vliv je znázorněn na obr. 33. Je vidět, že pokles může být až 20 % R_m .

Byla prokázána spojitost mezi pravděpodobnostmi, že vzorek z materiálu PET projeví tažné chování, v závislosti na teplotě tisku a výšce vrstvy. Tyto závislosti vyplývají z obr. 42 a 43. Zásadní vliv má výška tištěné vrstvy. Vysoká výška tisku způsobuje, že se materiál téměř vždy utrhne křehkým lomem. Aby byl vzorek tažný, je nutné, aby byla převážná část vláken ve směru namáhání. Vlivem zvyšující se teplotou tiskové trysky při tisku se tažnost u materiálu PET zvyšuje.

Závislost meze pevnosti na tiskových teplotách u materiálu PET, se nepovedla jednoznačně určit. Tento experiment (závislost teploty/ R_m) probíhal při třech výškách vrstvy. Vynesené křivky se protínají v různých místech. Lze však pozorovat, že při 260°C má vzorek typu C vyšší mez pevnosti než vzorek typu A. To je pravděpodobně způsobeno vyšší anizotropií vláken, které se za těchto teplot lépe spojí.

Materiál PET byl také porovnán s materiálem PLA, ABS, a ABS A1. Typické průběhy tahových zkoušek znázorňuje následující graf.



Obr. 44. Průběh tahové zkoušky pro vzorky 161 (PLA), 177 (ABS A1), 196 (ABS), 20 (PET).

Nejvyšší mez Pevnosti byla naměřena u materiálu PLA až 75 MPa. Tento materiál se při dosažení maximální hodnoty R_m však vždy zlomil křehkým lomem. Materiál PET se projevoval velkou tažností a dobrou hodnotou R_m okolo 55 MPa. U materiálu ABS A1 byla naměřena nejmenší R_m okolo 40 MPa, ale tento materiál se lépe tiskl než běžné ABS, které mělo R_m lehce vyšší s hodnotami okolo 45 MPa.

Ekonomické zhodnocení provozu tiskárny

Výpočet ceny výtisku je mnohem složitější, než by se na první pohled mohlo zdát. Pro výpočet koncové ceny výtisku lze použít následujících vzorců.

Náklady na hodinu provozu tiskárny

$$N_{hs} = S_f + \frac{C_s + N_i + N_d - L}{Z \cdot F_{ef}} \text{ [kč]} \quad (9)$$

C_s - cena stroje [kč],

N_i - náklady na instalaci stroje [kč],

N_d - náklady na demontáž [kč],

L - likvidační hodnota [kč],

Z - doba životnosti [rok],

F_{ef} - efektivní časový fond stroje za rok [h],

S_f - fixní hodinová sazba (mzda obsluhy, energie) [kč · h⁻¹]

Jednotkový čas tiskárny

$$t_{mA} = t_{mA4} + t_{mA5} + t_{mA6} \text{ [min]} \quad (10)$$

t_{mA4} – jednotkový čas chodu tiskárny (doba tisku) [min]

t_{mA5} – jednotkový čas klidu tiskárny (odejímání vytisknutého objektu, zahřátí tiskárny) [min]

t_{mA6} – jednotkový čas interference tiskárny (čekání na pracovníka, při více strojové obsluze, při obsluze jednoho stroje $t_{mA6} = 0$) [min]

Dávkový čas tiskárny

$$t_{mB} = t_{mB4} + t_{mB5} \text{ [min]} \quad (11)$$

t_{mB4} – dávkový čas chodu tiskárny (seřízení tiskové podložky - leveling, odmaštění tiskové plochy, odladění programu)

t_{mB5} – dávkový čas klidu tiskárny (příprava programu)

Jednicové náklady provozu stroje

$$N_{Aps} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot t_{mA} + V \cdot C_m \cdot K_n \text{ [kč · ks}^{-1}\text{]} \quad (12)$$

V - materiál spotřebovaný strojem na 1ks

C_m - měrná cena

K_n - koeficient nezdaru (šrotovaný materiál, v případě neúspěšného tisku)

Dávkové náklady provozu stroje

$$N_{Bps} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot \frac{t_{mB}}{d_v} [\text{kč} \cdot \text{ks}^{-1}] \quad (13)$$

D_v – výrobní dávka [ks]

Režijní náklady na provoz stroje

$$N_{Rps} = (N_{Aps} + N_{Bps}) \cdot \frac{R}{100} [\text{kč} \cdot \text{ks}^{-1}] \quad (14)$$

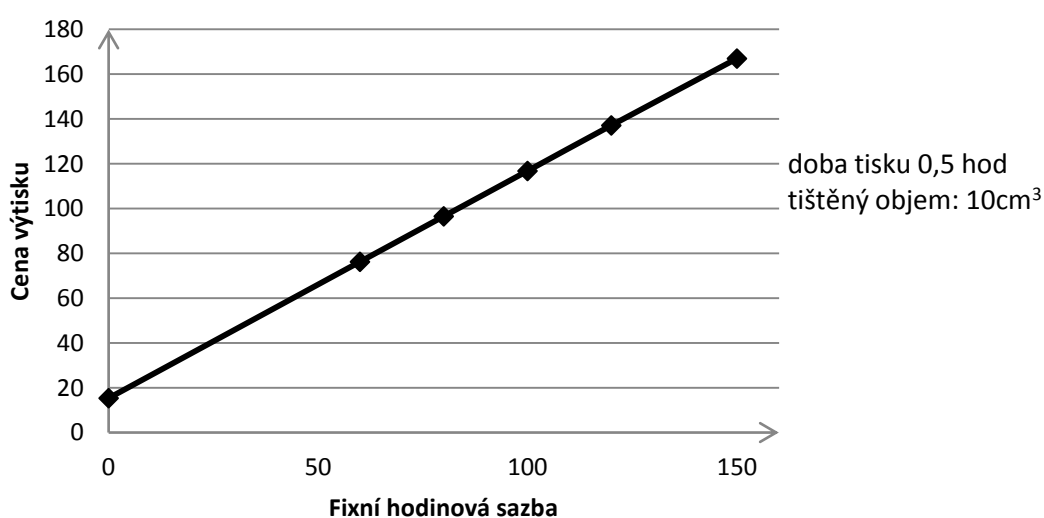
R – provozní režie v [%]

Operační náklady

$$N_{op} = N_{Aps} + N_{Bps} + N_{Rps} [\text{kč} \cdot \text{ks}^{-1}] \quad (15)$$

Mezi klíčové parametry ovlivňující finální cenu výrobku patří fixní hodinová sazba, efektivní časový fond stroje, jednotkový čas chodu tiskárny a množství vytištěného materiálu. Kompletní výpočet této úlohy je uveden v příloze 4.

U Fixní hodinové sazby záleží na konkrétním uživateli, k čemu tiskárnu má a používá. Pokud je tiskárna koupena za určením komerčního provozu a uživatel si nastaví vysokou S_f bude cena finálního výtisku velmi vysoká. Pokud však bude nastavena nízká fixní hodinová sazba, např. pro vlastní potřebu dostaneme následující závislost.



Obr. 45. Vliv fixní hodinové sazby na konečnou cenu výtisku.

Zhodnocení využitelnosti 3D tiskárny RepRap

V současné době jsou 3D tiskárny velmi populární téma v médiích. Je to způsobeno tím, že přestože aditivní technologie existují již téměř 30 let, nebylo o nich na veřejnosti příliš slyšet, protože byly využívány ve velmi specifických komerčních aplikacích. Během posledních několika let se s rozmachem domácího tisku, dostaly 3D tiskárny do hlubšího podvědomí veřejnosti a zájmu médií. Lze tak slyšet zprávy o tom, že 3D tiskárny staví domy, tisknou jídlo, nebo že za pár let budou v každé domácnosti...

V současné době se pro běžného uživatele cenově dostupné tiskárny, nenachází ve stádiu, kdy by bylo jejich ovládání na tolik intuitivní a jednoduché, že by byly opravdu pro každého. Momentálně jsou zaměřeny spíše na jednotlivce z řad domácích kutilů, kteří mají čas a nadšení pro provoz domácí tiskárny.

Z naměřených hodnot jsme bylo zjištěno, že díly vytištěné na 3D tiskárně mají při správně zvolených parametrech dostatečnou pevnost, proto, aby se daly považovat za funkce schopné. Stojí za to, se zamyslet, kolik skutečně využitelných výrobků se dá vytisknout na zařízení, které tiskne pouze plasty.

Doporučení autora

Materiál PET se pro 3D tisk velice osvědčil, ať už z hlediska mechanické pevnosti, tak i chování během tisku. Tento materiál má pouze pár nevýhod. Je o 40 % dražší než PLA a o 60 % vůči ABS. Je to dáno vyšší hustotou materiálu PET a pořizovací ceny cívky s tiskovou strunou. Druhou nevýhodou může být průhlednost materiálu, což nemusí být vždy žádoucí. Většina dalších materiálů pro 3D tisk se prodává v různých barevných provedeních.

Pro tisk lze doporučit tiskovou teplotu okolo 240 °C, při které ještě příliš nedochází k tažení vlásků. Teplota vyhřívané podložky byla zvolena na 70°C, a velice se osvědčila. Přilnavost materiálu k podložce byla natolik dobrá, že nemuselo být použito pomocných krajnic. Sundávání výtisku z podložky vyhřáté na 70°C je také bezproblémové. Vytištěný materiál není nutno během tisku ofukovat.

Návrhy pokračování řešení

Experimentální část této práce byla zaměřena na mechanické vlastnosti materiálů vytištěných na 3D tiskárně. Byl brán zřetel především na reálnou využitelnost nabytých výsledků z experimentů, pro potřeby dalšího tisku a odhadu únosnosti vytištěných součástí. Práce by se dala dále rozvíjet z materiálového nebo chemického hlediska, detailním zkoumáním struktur vytištěných polymerů.

ZÁVĚR

Předmětem této diplomové práce jsou 3D tiskárny RepRap. Rešeršní část této práce je zaměřena na FDM tisk, a popsané informace jsou směřovány k jejímu uplatnění na tiskárnách RepRap.

Experimentální část této práce je zaměřena na pozorování chování mechanických vlastností objektů vytištěných na 3D tiskárně RepRap, v závislosti na parametrech tisku. Mechanické vlastnosti jsou vyhodnocovány mezi pevností v tahu a tažností. Experiment byl zaměřen primárně na materiál PET, ale bylo provedeno i několik tahových zkoušek na vzorcích z materiálu ABS, ABS A1 a PLA.

Z praktických experimentů vyplynulo:

- U materiálu PET se rostoucí výškou tištěné vrstvy klesá mez pevnosti v tahu. Tento rozdíl může dosahovat až 20 % hodnoty R_m .
- Pravděpodobnost, že materiál PET projeví vysokou tažnost závisí na třech parametrech. Zásadní vliv má výška tištěné vrstvy. Vysoká výška tisku způsobuje, že se materiál téměř vždy utrhne křehkým lomem. Aby byl vzorek tažný, je nutné, aby byla převážná část vláken ve směru namáhání. Vlivem zvyšující se teplotou tiskové trysky při tisku se tažnost u materiálu PET zvyšuje. Kombinací těchto poznatků, lze u materiálu PET dosáhnout tažnosti až 250%.
- Srovnáním všech materiálu bylo zjištěno, že největší mez pevnosti v tahu při orientaci vláken ve směru namáhání projevil materiál PLA s hodnotou R_m až 75 MPa. Materiál PET se umístil na druhém místě s průměrnou hodnotou R_m okolo 55 MPa. Naměřené hodnoty pro materiál ABS se pohybovaly kolem 45 MPa a pro ABS A1 okolo 40 MPa.
- Vzorky s vlákny orientovanými kolmo ve směru namáhání mají hodnotu R_m průměrně okolo 90% R_m vzorku s vlákny orientovanými rovnoběžně se směrem namáhání. Vzorky s kolmými vlákny obsahovaly jednu obvodovou stěnu, pro snížení vlivu vrubů. Každá reálná aplikace 3D tisku však tuto obvodovou stěnu bude obsahovat, proto nebyly naměřené hodnoty nijak poměrně kráceny.
- Průměrná aritmetická úchylka profilu na kolmých obvodových stěnách se přímo úměrně zvyšuje s rostoucí výškou tištěné vrstvy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] WANG, Wego. Reverse engineering: technology of reinvention. 1 vyd. CRC Press, 2011. ISBN: 978-1-4398-0630-2
 - [2] NICHOLSON, John W. The Chemistry of Polymers. 3 vyd., Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2006. ISBN 0-85404-684-4
 - [3] MLEZIVA, JOSEF a Jaromír ŠŇUPÁREK. Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2 vyd. Praha: SOBOTÁLES, 2000. ISBN 80-85920-72-7
 - [4] STARÝ, Miroslav, Ivan POHL, Boris KAŠÍK a Bedřich ŠTEKNER. Termopolymery ABS, zpracování a použití. 1 vyd. Praha: SNTL, 1977.
 - [5] HORVATH, Joan. Mastering 3D Printing. 1 vyd. Apress, 2014. ISBN 978-1484200261
 - [6] Fused deposition modeling [online]. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, upraveno 6.5.2015, [cit.2015-5-25]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fused_deposition_modeling&oldid=61029019
 - [7] RepRap Project [online]. In: *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, upraveno 20. 5. 2015, [cit. 2015-5-21]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/RepRap_Project
 - [8] RepRapOneDarwin [online]. In: *RepRap*, upraveno 22. 5. 2015, [cit. 2015-5-25]. Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRapOneDarwin>
 - [9] Mendel [online]. In: *RepRap*, upraveno 28. 11. 2014, [cit. 2015-3-15] . Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/RepRapOneDarwin>
 - [10] Prusa i3 [online]. In: *RepRap*, upraveno 27. 2. 2015, [cit. 2015-3-10] . Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/I3>
 - [11] Rostock [online]. In: *RepRap*, upraveno 21. 1. 2015, [cit. 2015-5-22] . Dostupné z: <http://reprap.org/wiki/Rostock>
 - [12] DEMİREL Bilal a kol. Crystallization Behavior of PET Materials [online]. 2011 [cit. 2015-5-23]. Dostupné z: <http://fbe.balikesir.edu.tr/dergi/20111/BAUFBE2011-1-3.pdf>
 - [13] BQ Prusa i3 Hephestos [online]. bq.com.[cit. 2015-4-20]. Dostupné z: <http://www.bq.com/gb/prusa>
 - [14] 3D printer extruder [online]. In: *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, upraveno 26. 3. 2015, [cit. 2015-4-16]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/3D_printer_extruder
 - [15] What is bowden extruder? [online]. 10. 6. 2013, [cit. 2015-5-16]. Dostupné z: <http://start3dprinting.com/2013/07/what-is-a-bowden-extruder/>
-

-
- [16] Krokový motor [online]. In: *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, upraveno 24. 12. 2013, [cit. 2015-3-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Krokov%C3%BD_motor
- [17] RAMPS 1.4 [online]. In: RepRap, upraveno 20. 2. 2015, [cit. 2015-4-20]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4
- [18] Infills Patterns and Density [online]. slic3r.org [cit. 2015-5-23]. Dostupné z: <http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill>
- [19] STL (file format) [online]. In: *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, upraveno 18. 4. 2015, [cit. 2015-5-10]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/STL_%28file_format%29
- [20] HRONČOK, Miro. Slicery pro 3D tisk: Skeinforge [online] 4.4.2013, [cit. 2015-4-15]. Dostupné z: <http://fedora.cz/slicery-pro-3d-tisk-skeinforge/>
- [21] ISO 527-1. Plastics, General principles for the determination of tensile properties. 1996. 12s.
- [22] ISO 527-2. Determination of tensile properties of plastics, Test conditions for moulding and extrusion plastics. 1996. 8s.
- [23] Z010TH [online]. Zwick.com [cit. 2015-5-15]. Dostupné z: <http://www.zwick.com/en/news/testxpo/virtual-testxpo-2013/exhibits/plastics-composites/130-z010-th-allroundline-materials-testing-machine.html>
- [24] Pevnost a lom látek [online] cuni.cz [cit. 2015-5-10] Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_6
- [25] Erik's Bowden Extruder [online]. In: RepRap, upraveno 22. 2. 2015, [cit. 2015-5-20]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Erik%27s_Bowden_Extruder
- [26] Polyactic Acid Typical Properties [online]. Prospector, [cit. 2015-4-19]. Dostupné z: <http://plastics.ulprospector.com/generics/34/c/t/polylactic-acid-pla-properties-processing>
- [27] Vicat softening point [online]. In: *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, upraveno 2. 5. 2015, [cit. 2015-5-14]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Vicat_softening_point
- [28] ABS A1 drát pro 3D tisk 1,75 mm – 1 kg [online] at3d.cz [cit. 2015-5-25] Dostupné z: http://at3d.cz/index.php?id_product=58&controller=product&id_lang=2
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
3DP	Three dimensional printing
ABS	Akrylonitril-butadien-styren.
CAD	Computer Aided Design
FDM	Fused deposition modeling
HIPS	High Impact Polystyrene
PET	Polyethylentereftalát
PLA	Kyselina polymeléčná (PLA=polyactic acid)
PVA	polyvinylalkohol
RepRap	replicating rapid prototyper
RP	Rapid prototyping
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Datový formát Stereolitografie

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
A	%	Tažnost
$A_{\max}$	%	A maximální ve skupině
$A_{\min}$	%	A minimální ve skupině
A_p	%	A průměrná ve skupině
A_{p2+}	%	A průměrná lepší dva výsledky ve skupině
C_m	kč/cm ³	měrná cena
C_s	kč	cena stroje
Dv	ks	výrobní dávka
E	MPa	Modul pružnosti v tahu (Youngův modul)
E_i	N · m ⁻¹	Tuhost pružiny i
F_{ef}	h	efektivní časový fond stroje za rok
K_n	-	koeficient nezdaru
L	Mm	Délka vzorku po zkoušce
L	kč	likvidační hodnota
L_0	mm	Původní délka vzorku
N_d	kč	náklady na demontáž
N_i	kč	náklady na instalaci stroje
R	%	provozní režie

Seznam symbolů - pokračování

Symbol	Jednotka	Popis
R_m	MPa	Mez pevnosti v tahu
R_{mmax}	MPa	R_m maximální ve skupině
R_{mmin}	MPa	R_m minimální ve skupině
R_{mp}	MPa	R_m průměrná ve skupině
R_{mp2+}	MPa	R_m průměrná lepší dva výsledky ve skupině
S_f	$k\check{c} \cdot h^{-1}$	fixní hodinová sazba
T_g	$^{\circ}C$	Teplota skelného přechodu
T_m	$^{\circ}C$	Teplota tavení
V	cm^3	materiál spotřebovaný strojem na 1ks
Z	rok	doba životnosti
h	mm	Výška vrstvy
t_{mA4}	min	jednotkový čas chodu tiskárny
t_{mA5}	min	jednotkový čas klidu tiskárny
t_{mA6}	min	jednotkový čas interference tiskárny
t_{mB4}	min	dávkový čas chodu tiskárny
t_{mB5}	min	dávkový čas klidu tiskárny
ΔA	%	Rozdíl maxima a minima hodnot A ve skupině
ΔR_m	MPa	Rozdíl maxima a minima R_m ve skupině
γ	$m \cdot s^{-2}$	Smyková rychlost
ε	-	Deformace
η_i	$m_2 \cdot s^{-1}$	Viskozita tlumiče i
μ	$N \cdot s \cdot m^{-2}$	Dynamická viskozita
τ	MPa	Smykovém napětí

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Tabulka naměřených hodnot	6 str.
Příloha 2	Protokoly z drsnoměru	1 str.
Příloha 3	Návod k programu na generování grafů	2 str.
Příloha 4	Výpočet operačních nákladů	2 str

Vzorek	Skupina	Materiál	Typ	Teplota	Tloušťka vrstvy μ	Šířka vzorku b	Výška vzorku a	Modul průžnosti E	Mez pevnosti v tahu Rm	Tažnost A	Rm (skupiny)					Tažnost A (skupiny)					
											Rmp	Rmp2+	Rmmax	Rmmin	rozdlil ΔRm	Ap	Ap2+	Amax	Amin	rozdlil ΔA	
[-]	[-]	[-]	[-]	[°C]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
162	55	ABS	A	230	0,2	4,34	2,3	1069	49,06	19,74	47,68	48,38	49,06	46,27	2,79	12,80	16,12	19,74	6,16	13,58	13,58
163	55	ABS	A	230	0,2	4,14	2,24	1078	46,27	6,16	47,68	48,38	49,06	46,27	2,79	12,80	16,12	19,74	6,16	13,58	13,58
164	55	ABS	A	230	0,2	4,2	2,3	1038	47,7	12,49	47,68	48,38	49,06	46,27	2,79	12,80	16,12	19,74	6,16	13,58	13,58
159	54	ABS	A	240	0,2	4,2	2,4	1045	45,34	6,34	43,01	46,04	46,74	36,94	9,80	15,45	20,00	30,06	6,34	23,72	23,72
160	54	ABS	A	240	0,2	4,38	2,28	846	36,94	9,94	43,01	46,04	46,74	36,94	9,80	15,45	20,00	30,06	6,34	23,72	23,72
161	54	ABS	A	240	0,2	4,25	2,35	1045	46,74	30,06	43,01	46,04	46,74	36,94	9,80	15,45	20,00	30,06	6,34	23,72	23,72
156	53	ABS	A	250	0,2	4,44	2,53	906	41,27	64,19	41,72	42,03	42,79	41,11	1,68	59,06	70,56	76,92	36,07	40,85	40,85
157	53	ABS	A	250	0,2	4,44	2,45	912	42,79	76,92	41,72	42,03	42,79	41,11	1,68	59,06	70,56	76,92	36,07	40,85	40,85
158	53	ABS	A	250	0,2	4,44	2,59	931	41,11	36,07	41,72	42,03	42,79	41,11	1,68	59,06	70,56	76,92	36,07	40,85	40,85
171	58	ABS	B	230	0,2	4,3	2,5	980	39,61	5,62	39,71	40,14	40,66	38,86	1,80	5,92	6,07	6,51	5,62	0,89	0,89
172	58	ABS	B	230	0,2	4,4	2,5	977	38,86	6,51	39,71	40,14	40,66	38,86	1,80	5,92	6,07	6,51	5,62	0,89	0,89
173	58	ABS	B	230	0,2	4,32	2,45	1018	40,66	5,62	39,71	40,14	40,66	38,86	1,80	5,92	6,07	6,51	5,62	0,89	0,89
168	57	ABS	B	240	0,2	4,45	2,45	937	38,48	7,22	37,68	38,98	39,47	35,10	4,37	6,21	6,89	7,22	4,84	2,38	2,38
169	57	ABS	B	240	0,2	4,38	2,45	972	39,47	6,56	37,68	38,98	39,47	35,10	4,37	6,21	6,89	7,22	4,84	2,38	2,38
170	57	ABS	B	240	0,2	4,32	2,45	968	35,1	4,84	37,68	38,98	39,47	35,10	4,37	6,21	6,89	7,22	4,84	2,38	2,38
165	56	ABS	B	250	0,2	4,4	2,6	933	36,84	9,14	38,00	38,58	38,82	36,84	1,98	9,28	10,07	10,99	7,72	3,27	3,27
166	56	ABS	B	250	0,2	4,34	2,55	945	38,33	10,99	38,00	38,58	38,82	36,84	1,98	9,28	10,07	10,99	7,72	3,27	3,27
167	56	ABS	B	250	0,2	4,38	2,64	944	38,82	7,72	38,00	38,58	38,82	36,84	1,98	9,28	10,07	10,99	7,72	3,27	3,27
180	61	ABS A1	A	230	0,2	4,6	2,4	1112	39,93	18,7	42,94	44,45	44,82	39,93	4,89	18,82	18,99	19,27	18,48	0,79	0,79
181	61	ABS A1	A	230	0,2	4,45	2,4	1164	44,82	19,27	42,94	44,45	44,82	39,93	4,89	18,82	18,99	19,27	18,48	0,79	0,79
182	61	ABS A1	A	230	0,2	4,5	2,4	1156	44,08	18,48	42,94	44,45	44,82	39,93	4,89	18,82	18,99	19,27	18,48	0,79	0,79
177	60	ABS A1	A	240	0,2	4,6	2,4	1110	39,45	14,57	41,16	42,02	43,58	39,45	4,13	15,33	18,19	21,81	9,62	12,19	12,19
178	60	ABS A1	A	240	0,2	4,6	2,4	1131	40,45	21,81	41,16	42,02	43,58	39,45	4,13	15,33	18,19	21,81	9,62	12,19	12,19
179	60	ABS A1	A	240	0,2	4,6	2,4	1176	43,58	9,62	41,16	42,02	43,58	39,45	4,13	15,33	18,19	21,81	9,62	12,19	12,19
174	59	ABS A1	A	250	0,2	4,6	2,4	1153	42,78	12,8	41,80	42,18	42,78	41,05	1,73	12,80	13,49	14,18	11,42	2,76	2,76
175	59	ABS A1	A	250	0,2	4,6	2,4	1133	41,57	14,18	41,80	42,18	42,78	41,05	1,73	12,80	13,49	14,18	11,42	2,76	2,76
176	59	ABS A1	A	250	0,2	4,5	2,5	1121	41,05	11,42	41,80	42,18	42,78	41,05	1,73	12,80	13,49	14,18	11,42	2,76	2,76
189	64	ABS A1	B	230	0,2	4,54	2,5	1200	40,57	8,93	41,28	41,63	41,79	40,57	1,22	9,00	9,39	9,85	8,21	1,64	1,64
190	64	ABS A1	B	230	0,2	4,5	2,5	1208	41,47	9,85	41,28	41,63	41,79	40,57	1,22	9,00	9,39	9,85	8,21	1,64	1,64
191	64	ABS A1	B	230	0,2	4,45	2,5	1234	41,79	8,21	41,28	41,63	41,79	40,57	1,22	9,00	9,39	9,85	8,21	1,64	1,64
186	63	ABS A1	B	240	0,2	4,45	2,6	1127	36,72	9,04	39,18	40,41	40,45	36,72	3,73	9,09	9,18	9,31	8,91	0,40	0,40
187	63	ABS A1	B	240	0,2	4,45	2,6	1174	40,37	9,31	39,18	40,41	40,45	36,72	3,73	9,09	9,18	9,31	8,91	0,40	0,40
188	63	ABS A1	B	240	0,2	4,45	2,6	1169	40,45	8,91	39,18	40,41	40,45	36,72	3,73	9,09	9,18	9,31	8,91	0,40	0,40
183	62	ABS A1	B	250	0,2	4,4	2,5	1245	41,81	9,79	39,71	40,39	41,81	38,34	3,47	9,10	9,63	9,79	8,03	1,76	1,76
184	62	ABS A1	B	250	0,2	4,5	2,6	1148	38,34	9,47	39,71	40,39	41,81	38,34	3,47	9,10	9,63	9,79	8,03	1,76	1,76
185	62	ABS A1	B	250	0,2	4,5	2,6	1180	38,97	8,03	39,71	40,39	41,81	38,34	3,47	9,10	9,63	9,79	8,03	1,76	1,76

Vzorek	Skupina	Materiál	Typ	Teplota	Tloušťka vrstvy μ	Šířka vzorku b	Výška vzorku a	Modul pružnosti E	Mez pevnosti v tahu Rm	Tažnost A	Rm (skupiny)				Tažnost A (skupiny)					
											Rmp	Rmp2+	Rmmax	Rmmin	rozdlil ΔRm	Ap	Ap2+	Amax	Amin	rozdlil ΔA
[-]	[-]	[-]	[-]	[°C]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
29	10	PET	A	240	0,05	4,05	2,09	977	49,31	198,62	55,92	59,23	59,80	49,31	10,49	180,46	191,35	198,62	158,68	39,94
30	10	PET	A	240	0,05	4	2	922	59,8	184,07	55,92	59,23	59,80	49,31	10,49	180,46	191,35	198,62	158,68	39,94
31	10	PET	A	240	0,05	4,05	2	1032	58,66	158,68	55,92	59,23	59,80	49,31	10,49	180,46	191,35	198,62	158,68	39,94
56	19	PET	A	220	0,1	3,9	1,98	1025	48,04	62,9	53,39	56,07	56,44	48,04	8,40	77,41	108,17	153,43	15,89	137,54
57	19	PET	A	220	0,1	3,92	2,03	1043	55,7	153,43	53,39	56,07	56,44	48,04	8,40	77,41	108,17	153,43	15,89	137,54
58	19	PET	A	220	0,1	3,75	1,98	1052	56,44	15,89	53,39	56,07	56,44	48,04	8,40	77,41	108,17	153,43	15,89	137,54
59	20	PET	A	230	0,1	4	2,1	1043	57,2	199,63	56,74	57,77	58,33	54,68	3,65	174,72	210,80	221,97	102,56	119,41
60	20	PET	A	230	0,1	3,98	2,1	1050	58,33	221,97	56,74	57,77	58,33	54,68	3,65	174,72	210,80	221,97	102,56	119,41
61	20	PET	A	230	0,1	3,97	2,05	1015	54,68	102,56	56,74	57,77	58,33	54,68	3,65	174,72	210,80	221,97	102,56	119,41
26	9	PET	A	240	0,1	4,1	2,1	900	56,75	201,14	52,59	55,08	56,75	47,61	9,14	215,31	222,40	228,87	201,14	27,73
27	9	PET	A	240	0,1	4,1	2,2	963	53,41	215,93	52,59	55,08	56,75	47,61	9,14	215,31	222,40	228,87	201,14	27,73
28	9	PET	A	240	0,1	4,13	2,2	987	47,61	228,87	52,59	55,08	56,75	47,61	9,14	215,31	222,40	228,87	201,14	27,73
62	21	PET	A	250	0,1	4,13	2,11	1023	58,9	21,63	58,06	58,52	58,90	57,16	1,74	88,90	122,54	221,92	21,63	200,29
63	21	PET	A	250	0,1	4,14	2,04	1004	57,16	221,92	58,06	58,52	58,90	57,16	1,74	88,90	122,54	221,92	21,63	200,29
64	21	PET	A	250	0,1	4,14	2,12	1088	58,13	23,15	58,06	58,52	58,90	57,16	1,74	88,90	122,54	221,92	21,63	200,29
10	4	PET	A	260	0,1	4,1	2,18	962	48,89	238,08	46,65	48,04	48,89	43,87	5,02	236,28	238,11	238,13	232,63	5,50
11	4	PET	A	260	0,1	4,2	2,18	927	47,19	238,13	46,65	48,04	48,89	43,87	5,02	236,28	238,11	238,13	232,63	5,50
12	4	PET	A	260	0,1	4,22	2,12	919	43,87	232,63	46,65	48,04	48,89	43,87	5,02	236,28	238,11	238,13	232,63	5,50
23	8	PET	A	240	0,15	4,17	2	1066	54,91	219,43	54,91	55,10	55,28	54,54	0,74	87,71	120,70	219,43	21,74	197,69
24	8	PET	A	240	0,15	4,2	2	1027	55,28	21,74	54,91	55,10	55,28	54,54	0,74	87,71	120,70	219,43	21,74	197,69
25	8	PET	A	240	0,15	4,18	1,97	915	54,54	21,96	54,91	55,10	55,28	54,54	0,74	87,71	120,70	219,43	21,74	197,69
53	18	PET	A	220	0,2	3,98	2,22	1013	53,14	22,1	52,08	52,42	53,14	51,41	1,73	12,82	15,17	22,10	8,13	13,97
54	18	PET	A	220	0,2	4,03	2,18	999	51,41	8,24	52,08	52,42	53,14	51,41	1,73	12,82	15,17	22,10	8,13	13,97
55	18	PET	A	220	0,2	4	2,13	987	51,7	8,13	52,08	52,42	53,14	51,41	1,73	12,82	15,17	22,10	8,13	13,97
50	17	PET	A	230	0,2	4,1	2,28	1008	55,43	232,33	53,44	55,06	55,43	50,21	5,22	89,86	127,03	232,33	15,52	216,81
51	17	PET	A	230	0,2	4,08	2,28	990	54,69	21,72	53,44	55,06	55,43	50,21	5,22	89,86	127,03	232,33	15,52	216,81
52	17	PET	A	230	0,2	4,05	2,3	975	50,21	15,52	53,44	55,06	55,43	50,21	5,22	89,86	127,03	232,33	15,52	216,81
20	7	PET	A	240	0,2	4,11	2,33	1013	53,2	231,61	50,33	51,72	53,20	47,57	5,63	89,23	124,96	231,61	17,77	213,84
21	7	PET	A	240	0,2	4,13	2,3	992	50,23	18,31	50,33	51,72	53,20	47,57	5,63	89,23	124,96	231,61	17,77	213,84
22	7	PET	A	240	0,2	4,12	2,4	937	47,57	17,77	50,33	51,72	53,20	47,57	5,63	89,23	124,96	231,61	17,77	213,84
47	16	PET	A	250	0,2	4,17	2,3	827	51,76	221,58	49,81	50,68	51,76	48,07	3,69	155,90	223,91	226,24	19,88	206,36
48	16	PET	A	250	0,2	4,2	2,3	1004	49,59	226,24	49,81	50,68	51,76	48,07	3,69	155,90	223,91	226,24	19,88	206,36
49	16	PET	A	250	0,2	4,23	2,23	970	48,07	19,88	49,81	50,68	51,76	48,07	3,69	155,90	223,91	226,24	19,88	206,36
7	3	PET	A	260	0,2	4,26	2,36	925	42,99	248,24	46,97	48,97	50,11	42,99	7,12	243,60	244,85	248,24	241,11	7,13
8	3	PET	A	260	0,2	4,23	2,32	1002	47,82	241,46	46,97	48,97	50,11	42,99	7,12	243,60	244,85	248,24	241,11	7,13
9	3	PET	A	260	0,2	4,23	2,32	1002	50,11	241,11	46,97	48,97	50,11	42,99	7,12	243,60	244,85	248,24	241,11	7,13

Vzorek	Skupina	Materiál	Typ	Teplota	Tloušťka vrstvy τ	Šířka vzorku b	Výška vzorku a	Modul pružnosti E	Mez pevnosti v tahu Rm	Tažnost A	Rm (skupiny)					Tažnost A (skupiny)				
											Rmp	Rmp2+	Rmmax	Rmmin	rozdíl ΔRm	Ap	Ap2+	Amax	Amin	rozdíl ΔA
[-]	[-]	[-]	[-]	[°C]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
16	6	PET	A	240	0,25	4	2,02	784	48,44	16,81	49,48	50,07	51,70	48,29	3,41	16,69	16,75	16,81	16,56	0,25
17	6	PET	A	240	0,25	4	1,96	779	48,29	16,56	49,48	50,07	51,70	48,29	3,41	16,69	16,75	16,81	16,56	0,25
19	6	PET	A	240	0,25	4	2,05	984	51,7	16,69	49,48	50,07	51,70	48,29	3,41	16,69	16,75	16,81	16,56	0,25
13	5	PET	A	240	0,3	4,15	2,31	973	46,25	16,32	45,21	46,06	46,25	43,51	2,74	17,63	18,28	18,41	16,32	2,09
14	5	PET	A	240	0,3	4,17	2,31	801	43,51	18,15	45,21	46,06	46,25	43,51	2,74	17,63	18,28	18,41	16,32	2,09
15	5	PET	A	240	0,3	4,1	2,28	869	45,86	18,41	45,21	46,06	46,25	43,51	2,74	17,63	18,28	18,41	16,32	2,09
32	11	PET	A	240	0,35	4,11	2,28	791	46,31	14,44	46,36	46,45	46,59	46,17	0,42	18,20	20,09	20,65	14,44	6,21
33	11	PET	A	240	0,35	4,1	2,28	863	46,59	20,65	46,36	46,45	46,59	46,17	0,42	18,20	20,09	20,65	14,44	6,21
34	11	PET	A	240	0,35	4,1	2,28	909	46,17	19,52	46,36	46,45	46,59	46,17	0,42	18,20	20,09	20,65	14,44	6,21
44	15	PET	A	220	0,4	3,8	2,07	657	40,43	14,72	39,87	40,45	40,47	38,70	1,77	18,76	23,27	31,82	9,73	22,09
45	15	PET	A	220	0,4	3,94	1,97	796	38,7	31,82	39,87	40,45	40,47	38,70	1,77	18,76	23,27	31,82	9,73	22,09
46	15	PET	A	220	0,4	3,73	2,05	736	40,47	9,73	39,87	40,45	40,47	38,70	1,77	18,76	23,27	31,82	9,73	22,09
41	14	PET	A	230	0,4	3,75	2,13	872	47,1	17,34	45,53	46,12	47,10	44,36	2,74	16,33	17,32	17,34	14,34	3,00
42	14	PET	A	230	0,4	3,75	2,12	897	45,14	17,3	45,53	46,12	47,10	44,36	2,74	16,33	17,32	17,34	14,34	3,00
43	14	PET	A	230	0,4	3,75	2,14	838	44,36	14,34	45,53	46,12	47,10	44,36	2,74	16,33	17,32	17,34	14,34	3,00
35	12	PET	A	240	0,4	3,78	2,16	803	44,75	18,26	46,26	47,02	47,52	44,75	2,77	17,92	20,65	23,03	12,47	10,56
36	12	PET	A	240	0,4	3,81	2,21	788	46,51	12,47	46,26	47,02	47,52	44,75	2,77	17,92	20,65	23,03	12,47	10,56
37	12	PET	A	240	0,4	3,81	2,21	863	47,52	23,03	46,26	47,02	47,52	44,75	2,77	17,92	20,65	23,03	12,47	10,56
38	13	PET	A	250	0,4	4	2,1	886	44,39	12,49	43,69	44,46	44,53	42,16	2,37	11,94	12,16	12,49	11,50	0,99
39	13	PET	A	250	0,4	3,91	2,19	846	42,16	11,5	43,69	44,46	44,53	42,16	2,37	11,94	12,16	12,49	11,50	0,99
40	13	PET	A	250	0,4	3,9	2,25	899	44,53	11,82	43,69	44,46	44,53	42,16	2,37	11,94	12,16	12,49	11,50	0,99
4	2	PET	A	260	0,4	3,93	2,21	984	46	13,143	45,20	45,67	46,00	44,26	1,74	13,73	14,03	14,51	13,14	1,37
5	2	PET	A	260	0,4	4,1	2,15	954	44,26	13,54	45,20	45,67	46,00	44,26	1,74	13,73	14,03	14,51	13,14	1,37
6	2	PET	A	260	0,4	3,9	2,23	1003	45,33	14,51	45,20	45,67	46,00	44,26	1,74	13,73	14,03	14,51	13,14	1,37
91	31	PET	B	220	0,1	4	2,23	1072	49,53	6,1	50,11	50,91	52,29	48,52	3,77	6,30	6,43	6,75	6,04	0,71
92	31	PET	B	220	0,1	4,02	2,2	1031	48,52	6,04	50,11	50,91	52,29	48,52	3,77	6,30	6,43	6,75	6,04	0,71
93	31	PET	B	220	0,1	4,02	2,2	1046	52,29	6,75	50,11	50,91	52,29	48,52	3,77	6,30	6,43	6,75	6,04	0,71
88	30	PET	B	230	0,1	4,11	2,23	1065	53,39	15,06	54,64	55,26	56,55	53,39	3,16	13,64	14,22	15,06	12,49	2,57
89	30	PET	B	230	0,1	4,11	2,28	1020	53,97	13,37	54,64	55,26	56,55	53,39	3,16	13,64	14,22	15,06	12,49	2,57
90	30	PET	B	230	0,1	4,08	2,26	1089	56,55	12,49	54,64	55,26	56,55	53,39	3,16	13,64	14,22	15,06	12,49	2,57
85	29	PET	B	240	0,1	4,26	2,37	1043	52,27	18,19	52,99	53,36	53,57	52,27	1,30	14,73	16,75	18,19	10,71	7,48
86	29	PET	B	240	0,1	4,24	2,38	1016	53,57	10,71	52,99	53,36	53,57	52,27	1,30	14,73	16,75	18,19	10,71	7,48
87	29	PET	B	240	0,1	4,26	2,37	1039	53,14	15,3	52,99	53,36	53,57	52,27	1,30	14,73	16,75	18,19	10,71	7,48
82	28	PET	B	250	0,1	4,28	2,39	1005	51,62	18,36	53,03	53,74	53,91	51,62	2,29	17,35	18,08	18,36	15,90	2,46
83	28	PET	B	250	0,1	4,31	2,41	1027	53,91	17,79	53,03	53,74	53,91	51,62	2,29	17,35	18,08	18,36	15,90	2,46
84	28	PET	B	250	0,1	4,3	2,45	999	53,56	15,9	53,03	53,74	53,91	51,62	2,29	17,35	18,08	18,36	15,90	2,46

Vzorek	Skupina	Materiál	Typ	Teplota	Tloušťka vrstvy	Šířka vzorku b	Výška vzorku a	Modul pružnosti E	Mez pevnosti v tahu Rm	Tažnost A	Rm (skupiny)					Tažnost A (skupiny)				
											Rmp	Rmp2+	Rmmax	Rmmin	rozdíl ΔRm	Ap	Ap2+	Amax	Amin	rozdíl ΔA
[-]	[-]	[-]	[-]	[°C]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
79	27	PET	B	260	0,1	4,36	2,45	991	52,96	25,75	50,98	52,33	52,96	48,28	4,68	24,06	25,84	25,93	20,51	5,42
80	27	PET	B	260	0,1	4,37	2,47	981	51,7	20,506	50,98	52,33	52,96	48,28	4,68	24,06	25,84	25,93	20,51	5,42
81	27	PET	B	260	0,1	4,33	2,45	981	48,28	25,93	50,98	52,33	52,96	48,28	4,68	24,06	25,84	25,93	20,51	5,42
73	25	PET	B	220	0,2	4,25	2,3	977	49,87	13,54	49,02	49,53	49,87	48,01	1,86	15,21	16,05	17,23	13,54	3,69
74	25	PET	B	220	0,2	4,24	2,35	980	49,18	14,87	49,02	49,53	49,87	48,01	1,86	15,21	16,05	17,23	13,54	3,69
75	25	PET	B	220	0,2	4,25	2,34	968	48,01	17,23	49,02	49,53	49,87	48,01	1,86	15,21	16,05	17,23	13,54	3,69
76	26	PET	B	230	0,2	4,3	2,32	996	51,59	29,75	51,77	51,92	52,25	51,48	0,77	21,03	25,42	29,75	12,24	17,51
77	26	PET	B	230	0,2	4,31	2,36	982	51,48	21,09	51,77	51,92	52,25	51,48	0,77	21,03	25,42	29,75	12,24	17,51
78	26	PET	B	230	0,2	4,3	2,32	1002	52,25	12,24	51,77	51,92	52,25	51,48	0,77	21,03	25,42	29,75	12,24	17,51
70	24	PET	B	240	0,2	4,31	2,38	1006	51,46	19,91	51,31	51,69	51,92	50,56	1,36	20,02	21,62	23,32	16,82	6,50
71	24	PET	B	240	0,2	4,27	2,41	1002	51,92	23,32	51,31	51,69	51,92	50,56	1,36	20,02	21,62	23,32	16,82	6,50
72	24	PET	B	240	0,2	4,33	2,46	979	50,56	16,82	51,31	51,69	51,92	50,56	1,36	20,02	21,62	23,32	16,82	6,50
67	23	PET	B	250	0,2	4,35	2,35	1020	53,86	24,84	53,22	53,96	54,06	51,75	2,31	27,95	33,04	41,24	17,76	23,48
68	23	PET	B	250	0,2	4,37	2,35	1037	54,06	17,76	53,22	53,96	54,06	51,75	2,31	27,95	33,04	41,24	17,76	23,48
69	23	PET	B	250	0,2	4,37	2,42	997	51,75	41,24	53,22	53,96	54,06	51,75	2,31	27,95	33,04	41,24	17,76	23,48
64	22	PET	B	260	0,2	4,37	2,44	1012	50,09	25,54	49,54	50,59	51,08	47,45	3,63	21,11	22,36	25,54	18,62	6,92
65	22	PET	B	260	0,2	4,37	2,47	964	47,45	18,62	49,54	50,59	51,08	47,45	3,63	21,11	22,36	25,54	18,62	6,92
66	22	PET	B	260	0,2	4,37	2,48	978	51,08	19,17	49,54	50,59	51,08	47,45	3,63	21,11	22,36	25,54	18,62	6,92
216	73	PET	B	220	0,4	4,1	2,3	763	40,47	7,16	44,16	46,01	46,41	40,47	5,94	7,54	7,74	7,81	7,16	0,65
217	73	PET	B	220	0,4	4,2	2,2	878	46,41	7,81	44,16	46,01	46,41	40,47	5,94	7,54	7,74	7,81	7,16	0,65
218	73	PET	B	220	0,4	4,3	2,3	840	45,6	7,66	44,16	46,01	46,41	40,47	5,94	7,54	7,74	7,81	7,16	0,65
213	72	PET	B	230	0,4	4,2	2,31	939	48,43	13,44	48,36	49,20	49,96	46,69	3,27	14,46	15,54	17,64	12,31	5,33
214	72	PET	B	230	0,4	4,05	2,39	887	46,69	17,64	48,36	49,20	49,96	46,69	3,27	14,46	15,54	17,64	12,31	5,33
215	72	PET	B	230	0,4	4,05	2,35	937	49,96	12,31	48,36	49,20	49,96	46,69	3,27	14,46	15,54	17,64	12,31	5,33
210	71	PET	B	240	0,4	4,27	2,4	871	45,08	13,33	46,15	46,79	48,50	44,88	3,62	15,42	16,47	16,51	13,33	3,18
211	71	PET	B	240	0,4	4,2	2,34	973	48,5	16,43	46,15	46,79	48,50	44,88	3,62	15,42	16,47	16,51	13,33	3,18
212	71	PET	B	240	0,4	4,24	2,32	873	44,88	16,51	46,15	46,79	48,50	44,88	3,62	15,42	16,47	16,51	13,33	3,18
207	70	PET	B	250	0,4	4,26	2,37	971	49,51	16,71	48,20	48,95	49,51	46,71	2,80	18,10	18,80	20,70	16,71	3,99
208	70	PET	B	250	0,4	4,36	2,43	946	48,39	16,9	48,20	48,95	49,51	46,71	2,80	18,10	18,80	20,70	16,71	3,99
209	70	PET	B	250	0,4	4,33	2,5	888	46,71	20,7	48,20	48,95	49,51	46,71	2,80	18,10	18,80	20,70	16,71	3,99
204	69	PET	B	260	0,4	4,35	2,5	855	46,63	17,41	45,28	46,27	46,63	43,29	3,34	15,54	17,28	17,41	12,08	5,33
205	69	PET	B	260	0,4	4,35	2,5	821	43,29	12,08	45,28	46,27	46,63	43,29	3,34	15,54	17,28	17,41	12,08	5,33
206	69	PET	B	260	0,4	4,35	2,5	894	45,91	17,14	45,28	46,27	46,63	43,29	3,34	15,54	17,28	17,41	12,08	5,33
153	52	PET	C	220	0,1	4	2,07	1093	57,21	17,68	56,79	57,08	57,21	56,23	0,98	19,44	20,32	22,76	17,68	5,08
154	52	PET	C	220	0,1	4	2,03	1075	56,23	17,87	56,79	57,08	57,21	56,23	0,98	19,44	20,32	22,76	17,68	5,08
155	52	PET	C	220	0,1	4	2,1	1098	56,94	22,76	56,79	57,08	57,21	56,23	0,98	19,44	20,32	22,76	17,68	5,08

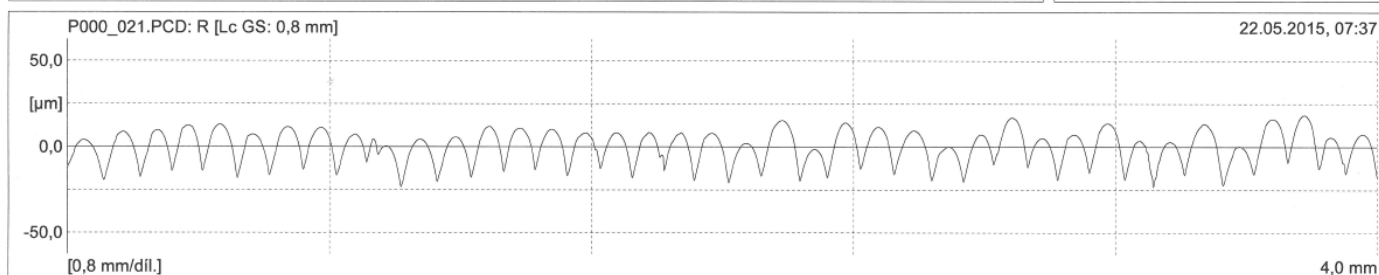
Vzorek	Skupina	Materiál	Typ	Teplota	Tloušťka vrstvy μ	Šířka vzorku b	Výška vzorku a	Modul pružnosti E	Mez pevnosti v tahu Rm	Tažnost A	Rm (skupiny)					Tažnost A (skupiny)				
											Rmp	Rmp2+	Rmmax	Rmmin	rozdlil ΔRm	Ap	Ap2+	Amax	Amin	rozdlil ΔA
[-]	[-]	[-]	[-]	[°C]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
150	51	PET	C	230	0,1	4	2,28	1051	54,04	15,95	54,38	54,87	55,70	53,41	2,29	17,29	17,96	18,27	15,95	2,32
151	51	PET	C	230	0,1	4,04	2,25	1058	53,41	17,64	54,38	54,87	55,70	53,41	2,29	17,29	17,96	18,27	15,95	2,32
152	51	PET	C	230	0,1	4,05	2,28	1069	55,7	18,27	54,38	54,87	55,70	53,41	2,29	17,29	17,96	18,27	15,95	2,32
147	50	PET	C	240	0,1	4,11	2,17	1067	54,14	19,05	53,94	54,54	54,93	52,74	2,19	34,72	42,56	62,73	19,05	43,68
148	50	PET	C	240	0,1	4,12	2,18	1052	52,74	22,39	53,94	54,54	54,93	52,74	2,19	34,72	42,56	62,73	19,05	43,68
149	50	PET	C	240	0,1	4,1	2,12	1068	54,93	62,73	53,94	54,54	54,93	52,74	2,19	34,72	42,56	62,73	19,05	43,68
144	49	PET	C	250	0,1	4,13	2,24	1050	54,13	142,63	55,05	55,51	56,16	54,13	2,03	52,03	75,05	142,63	6,00	136,63
145	49	PET	C	250	0,1	4,15	2,24	1051	54,86	6	55,05	55,51	56,16	54,13	2,03	52,03	75,05	142,63	6,00	136,63
146	49	PET	C	250	0,1	4,16	2,25	1059	56,16	7,47	55,05	55,51	56,16	54,13	2,03	52,03	75,05	142,63	6,00	136,63
141	48	PET	C	260	0,1	4,19	2,18	1089	56,05	222,2	57,19	57,76	58,58	56,05	2,53	243,18	253,67	255,07	222,20	32,87
142	48	PET	C	260	0,1	4,13	2,21	1093	56,93	255,07	57,19	57,76	58,58	56,05	2,53	243,18	253,67	255,07	222,20	32,87
143	48	PET	C	260	0,1	4,18	2,13	1102	58,58	252,27	57,19	57,76	58,58	56,05	2,53	243,18	253,67	255,07	222,20	32,87
138	47	PET	C	220	0,2	4,1	2,19	1021	52,29	16,66	53,85	54,64	55,11	52,29	2,82	47,48	62,90	62,95	16,66	46,29
139	47	PET	C	220	0,2	4,1	2,1	1049	55,11	62,84	53,85	54,64	55,11	52,29	2,82	47,48	62,90	62,95	16,66	46,29
140	47	PET	C	220	0,2	4,1	2,13	1054	54,16	62,95	53,85	54,64	55,11	52,29	2,82	47,48	62,90	62,95	16,66	46,29
135	46	PET	C	230	0,2	4,2	2,25	969	51,78	98,65	53,38	54,18	54,49	51,78	2,71	48,08	61,25	98,65	21,76	76,89
136	46	PET	C	230	0,2	4,2	2,25	975	54,49	23,84	53,38	54,18	54,49	51,78	2,71	48,08	61,25	98,65	21,76	76,89
137	46	PET	C	230	0,2	4,2	2,2	1031	53,87	21,76	53,38	54,18	54,49	51,78	2,71	48,08	61,25	98,65	21,76	76,89
132	45	PET	C	240	0,2	4,25	2,26	985	56,71	19,24	55,86	56,19	56,71	55,21	1,50	60,01	80,40	128,36	19,24	109,12
133	45	PET	C	240	0,2	4,25	2,2	993	55,21	32,43	55,86	56,19	56,71	55,21	1,50	60,01	80,40	128,36	19,24	109,12
134	45	PET	C	240	0,2	4,24	2,2	973	55,67	128,36	55,86	56,19	56,71	55,21	1,50	60,01	80,40	128,36	19,24	109,12
129	44	PET	C	250	0,2	4,31	2,33	967	52,78	84,52	52,05	52,85	52,91	50,47	2,44	148,59	180,62	217,12	84,52	132,60
130	44	PET	C	250	0,2	4,31	2,31	966	52,91	217,12	52,05	52,85	52,91	50,47	2,44	148,59	180,62	217,12	84,52	132,60
131	44	PET	C	250	0,2	4,31	2,31	949	50,47	144,12	52,05	52,85	52,91	50,47	2,44	148,59	180,62	217,12	84,52	132,60
126	43	PET	C	260	0,2	4,37	2,27	980	54,86	20,681	53,31	54,29	54,86	51,36	3,50	63,92	85,55	87,40	20,68	66,72
127	43	PET	C	260	0,2	4,4	2,36	912	51,36	83,69	53,31	54,29	54,86	51,36	3,50	63,92	85,55	87,40	20,68	66,72
128	43	PET	C	260	0,2	4,35	2,31	975	53,72	87,4	53,31	54,29	54,86	51,36	3,50	63,92	85,55	87,40	20,68	66,72
123	42	PET	C	220	0,4	4	2,12	892	48,89	14,58	47,81	48,54	48,89	46,37	2,52	11,15	12,95	14,58	7,54	7,04
124	42	PET	C	220	0,4	4	2,15	707	46,37	7,54	47,81	48,54	48,89	46,37	2,52	11,15	12,95	14,58	7,54	7,04
125	42	PET	C	220	0,4	4,05	2,15	867	48,18	11,32	47,81	48,54	48,89	46,37	2,52	11,15	12,95	14,58	7,54	7,04
120	41	PET	C	230	0,4	4,05	2,17	973	49,86	6,94	49,36	49,66	49,86	48,77	1,09	12,52	15,31	20,07	6,94	13,13
121	41	PET	C	230	0,4	4,1	2,18	933	49,46	10,55	49,36	49,66	49,86	48,77	1,09	12,52	15,31	20,07	6,94	13,13
122	41	PET	C	230	0,4	4,13	2,2	936	48,77	20,07	49,36	49,66	49,86	48,77	1,09	12,52	15,31	20,07	6,94	13,13
117	40	PET	C	240	0,4	4,15	2,31	861	47,59	9,19	48,07	49,06	50,53	46,09	4,44	13,25	15,28	17,96	9,19	8,77
118	40	PET	C	240	0,4	4,15	2,21	845	50,53	17,96	48,07	49,06	50,53	46,09	4,44	13,25	15,28	17,96	9,19	8,77
119	40	PET	C	240	0,4	4,24	2,17	938	46,09	12,59	48,07	49,06	50,53	46,09	4,44	13,25	15,28	17,96	9,19	8,77

Vzorek	Skupina	Materiál	Typ	Teplota	Tloušťka τ	Šířka vzorku b	Výška vzorku a	Modul pružnosti E	Mez pevnosti v tahu Rm	Tažnost A	Rm (skupiny)					Tažnost A (skupiny)				
											Rmp	Rmp2+	Rmmax	Rmin	rozdlil ΔRm	Ap	Ap2+	Amax	Amin	rozdlil ΔA
[-]	[-]	[-]	[-]	[°C]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
114	39	PET	C	250	0,4	4,2	2,2	892	48,33	18,78	49,28	49,75	49,76	48,33	1,43	16,04	18,19	18,78	11,75	7,03
115	39	PET	C	250	0,4	4,17	2,21	848	49,74	17,6	49,28	49,75	49,76	48,33	1,43	16,04	18,19	18,78	11,75	7,03
116	39	PET	C	250	0,4	4,21	2,24	860	49,76	11,75	49,28	49,75	49,76	48,33	1,43	16,04	18,19	18,78	11,75	7,03
111	38	PET	C	260	0,4	4,21	2,25	882	48,07	19,32	47,95	48,55	49,03	46,75	2,28	20,36	21,98	24,63	17,12	7,51
112	38	PET	C	260	0,4	4,23	2,22	783	49,03	17,12	47,95	48,55	49,03	46,75	2,28	20,36	21,98	24,63	17,12	7,51
113	38	PET	C	260	0,4	4,28	2,23	779	46,75	24,63	47,95	48,55	49,03	46,75	2,28	20,36	21,98	24,63	17,12	7,51
195	66	PLA	A	220	0,2	4,35	2,3	1634	67,67	6,98	70,27	71,57	73,18	67,67	5,51	15,43	19,77	32,55	6,75	25,80
196	66	PLA	A	220	0,2	4,33	2,3	1693	73,18	6,75	70,27	71,57	73,18	67,67	5,51	15,43	19,77	32,55	6,75	25,80
197	66	PLA	A	220	0,2	4,3	2,4	1586	69,95	32,55	70,27	71,57	73,18	67,67	5,51	15,43	19,77	32,55	6,75	25,80
192	65	PLA	A	230	0,2	4,28	2,3	1704	72,27	6,86	70,58	72,44	72,61	66,87	5,74	6,82	6,92	6,97	6,64	0,33
193	65	PLA	A	230	0,2	4,3	2,4	1626	72,61	6,64	70,58	72,44	72,61	66,87	5,74	6,82	6,92	6,97	6,64	0,33
194	65	PLA	A	230	0,2	4,34	2,4	1588	66,87	6,97	70,58	72,44	72,61	66,87	5,74	6,82	6,92	6,97	6,64	0,33
201	68	PLA	B	220	0,2	4,4	2,31	1718	67,72	6,04	67,31	67,63	67,72	66,67	1,05	5,87	5,96	6,04	5,70	0,34
202	68	PLA	B	220	0,2	4,45	2,3	1723	66,67	5,87	67,31	67,63	67,72	66,67	1,05	5,87	5,96	6,04	5,70	0,34
203	68	PLA	B	220	0,2	4,45	2,3	1737	67,53	5,7	67,31	67,63	67,72	66,67	1,05	5,87	5,96	6,04	5,70	0,34
198	67	PLA	B	230	0,2	4,5	2,35	1599	62,33	5,65	65,04	66,40	67,31	62,33	4,98	6,10	6,32	6,77	5,65	1,12
199	67	PLA	B	230	0,2	4,35	2,4	1711	67,31	5,87	65,04	66,40	67,31	62,33	4,98	6,10	6,32	6,77	5,65	1,12
200	67	PLA	B	230	0,2	4,45	2,35	1690	65,49	6,77	65,04	66,40	67,31	62,33	4,98	6,10	6,32	6,77	5,65	1,12

Příloha 2

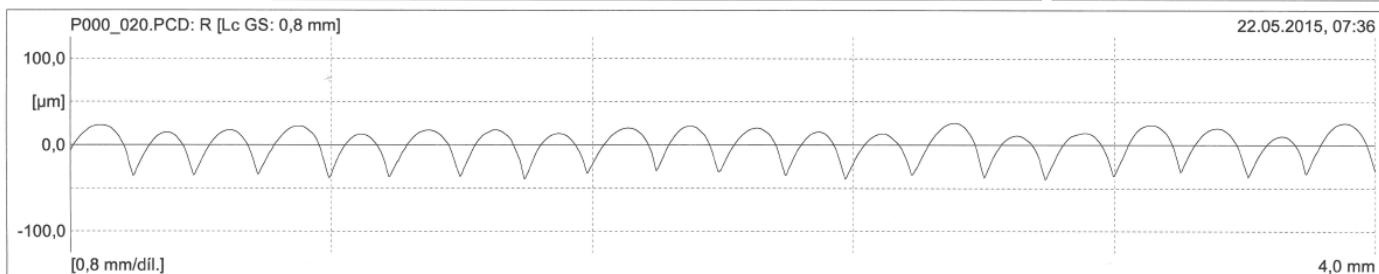
	Mahr GmbH	
		M300 Explorer [v1.20-07]

Objekt: Materiál PET, výška vrstvy 0,1mm, teplota 240°C Číslo: Komentář:	Lt: 5,60 mm Ls: 2,5 µm VB: 350 µm Vt: 0,50 mm/s Body: 11200 Snímač: Pxx-350
---	--



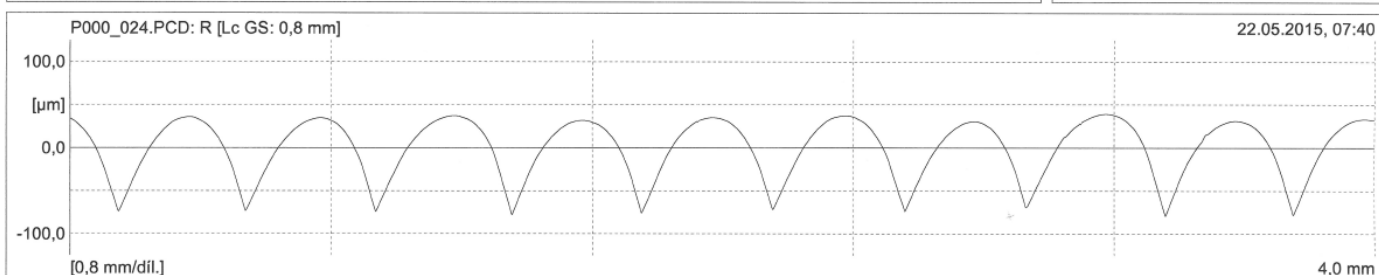
Ra	7,352 µm	Rz	36,70 µm	Rmax	41,94 µm
RSm	118 µm				

Objekt: Materiál PET, výška vrstvy 0,2mm, teplota 240°C Číslo: Komentář:	Lt: 5,60 mm Ls: 2,5 µm VB: 350 µm Vt: 0,50 mm/s Body: 11200 Snímač: Pxx-350
---	--



Ra	14,200 µm	Rz	61,45 µm	Rmax	65,37 µm
RSm	201 µm				

Objekt: Materiál PET, výška vrstvy 0,4mm, teplota 240°C Číslo: Komentář:	Lt: 5,60 mm Ls: 2,5 µm VB: 350 µm Vt: 0,50 mm/s Body: 11200 Snímač: Pxx-350
---	--



Ra	28,370 µm	Rz	113,90 µm	Rmax	117,20 µm
RSm	400 µm				

Příloha 3 – str. 1

Návod k programu na generování grafů

Součástí elektronické verze této práce jsou data naměřená z tahové zkoušky. Protože experiment proběhl na 198 vzorcích, bylo by grafické zhodnocení jednotlivých průběhů tahových zkoušek v tištěné podobě velice obsáhlé.

Alternativním řešením je tedy použití příslušného generátoru pro daný počet grafů.

Počet křivek je určen názvem programu:

GRAFIX V1	1 křivka
GRAFIX V3	3 křivky (vhodné pro skupiny)
GRAFIX V4	4 křivky (vhodné pro srovnání materiálů)
GRAFIX V5	5 křivek (vhodné pro porovnání teplot u materiálu PET)

Do zvoleného programu stačí nakopírovat celý vybraný sloupec s požadovanými hodnotami ze souboru „Procenta-MPa“

Ukázka:

Chceme graf o 3 křivkách pro porovnání průběhů skupiny 3.

- 1) Ve souboru „Procenta-MPa“ označím 3 celé sloupce a vykopíruji je (Ctrl + C)

Kliknu a táhnu

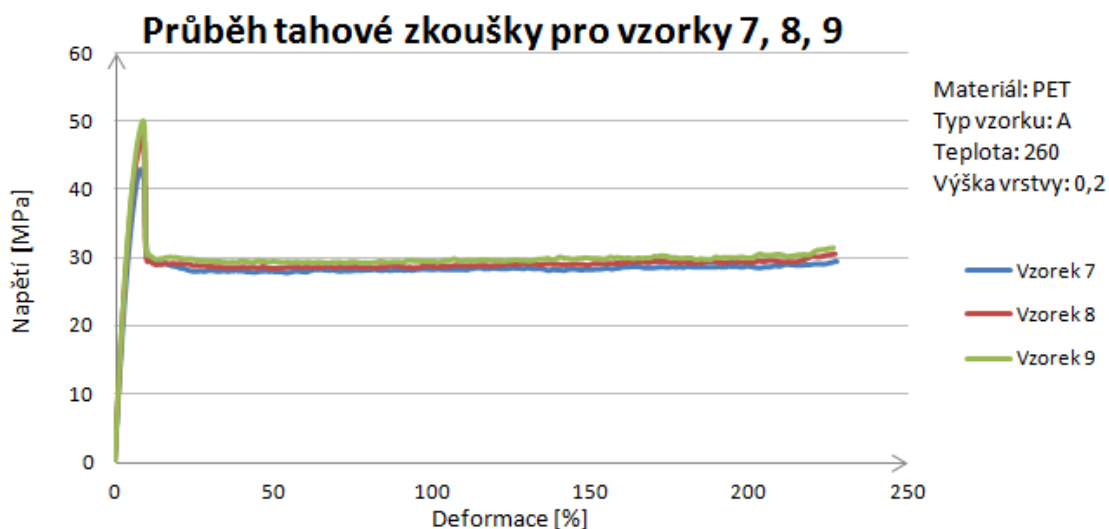
	A	B	F	G	H
1		Nr	7	8	9
2	Skupina		3	3	3
3	Materiál		PET	PET	PET
4	Typ		A	A	A
5	Teplota		260	260	260
6	Tloušťka vrstvy		0,2	0,2	0,2
7	Šířka vzorku b0	mm	4,26	4,23	4,23
8	Tloušťka vzorku a0	mm	2,36	2,32	2,32
9	Modul pružnosti v tahu E	MPa	925	1002,14	1002,4
10	Mez pevnosti v tahu Rm	MPa	42,99	47,82	50,11
11	ϵ_{Fmax}	%	8,04	8,93	8,95
12	ϵ_{Break}	%	248,24	241,46	241,11
13	Program		Slic3r	Slic3r	Slic3r
14					
15			7	8	9
16			Strain;"Standard force"	Strain;"Standard force"	Strain;"Standard force"
17			%; "MPa"	%; "MPa"	%; "MPa"
18			-0,00149808;0,056584	-0,000271;-0,038658	0,000182619;0,0842929
19			0,00498462;0,0874401	0,0083726;-0,00704732	0,00570492;0,107123
20			0,00978662;0,140581	0,0138949;0,0614426	0,0109871;0,166832
21			0,0148287;0,183437	0,0186969;0,107103	0,0165094;0,228297
22			0,0196307;0,231435	0,0242192;0,159787	0,0208312;0,270445
23			0,0249129;0,291433	0,0283009;0,205447	0,025153;0,314349

2) V souboru „GRAFIX V3“ vložíš sloupce do buňky A1

↓ Vložit sem

	A	B	C
1	7	8	9
2	3	3	3
3	PET	PET	PET
4	A	A	A
5	260	260	260
6	0,2	0,2	0,2
7	4,26	4,23	4,23
8	2,36	2,32	2,32
9	925	1002,14	1002,4
10	42,99	47,82	50,11
11	8,04	8,93	8,95
12	248,24	241,46	241,11
13	Slic3r	Slic3r	Slic3r
14			
15	7	8	9
16	Strain;"Standard force"	Strain;"Standard force"	Strain;"Standard force"
17	%;"MPa"	%;"MPa"	%;"MPa"
18	-0,00149808;0,056584	-0,000271;-0,038658	0,000182619;0,0842929
19	0,00498462;0,0874401	0,0083726;-0,00704732	0,00570492;0,107123
20	0,00978662;0,140581	0,0138949;0,0614426	0,0109871;0,166832
21	0,0148287;0,183437	0,0186969;0,107103	0,0165094;0,228297

3) V souboru „GRAFIX V3“ získám vygenerovaný příslušný průběh tahové zkoušky pro skupinu vzorků 3.



Náklady na hodinu provozu tiskárny

$$N_{hs} = S_f + \frac{C_s + N_i + N_d - L}{Z \cdot F_{ef}} \text{ [kč]}$$

$$N_{hs} = 107,877 \text{ Kč}$$

$C_s =$	13500 Kč	cena stroje
$N_i =$	2500 Kč	náklady na instalaci stroje
$N_d =$	500 Kč	Náklady na demontáž
$L =$	5000 Kč	likvidační hodnota
$Z =$	2 roky	doba životnosti
$F_{ef0} =$	2 h	denní efektivní časový fond stroje
$F_{ef} =$	730 h	efektivní časový fond stroje za rok
$S_f =$	100 Kč . h-1	fixní hodinová sazba

Jednotkový čas tiskárny

$$t_{mA} = t_{mA4} + t_{mA5} + t_{mA6} \text{ [min]}$$

$$t_{mA} = 33 \text{ min}$$

$t_{mA4} =$	30 min	jednotkový čas chodu tiskárny (doba tisku)
$t_{mA5} =$	3 min	jednotkový čas klidu tiskárny (odejímání vytisknutého objektu, zahřátí trysky)
$t_{mA6} =$	0 min	jednotkový čas interference tiskárny (čekání na pracovníka, při více strojové obsluze, při obsluze jednoho stroje $t_{mA6} = 0$)

Dávkový čas tiskárny

$$t_{mB} = t_{mB4} + t_{mB5} \text{ [min]}$$

$$t_{mB} = 25 \text{ min}$$

$t_{mB4} =$	10 min	dávkový čas chodu tiskárny (seřízení tiskové podložky - leveling, odmaštění tiskové plochy, odladění programu, zahřátí podložky)
$t_{mB5} =$	15 min	dávkový čas klidu tiskárny (příprava programu)

Jednicové náklady provozu stroje

$$N_{Aps} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot t_{mA} + V \cdot C_m \cdot K_n \text{ [kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$$

$$N_{Aps} = 66,3322 \text{ Kč/ks}$$

$V =$	10	cm ³	materiál spotřebovaný strojem na 1ks
$C_m =$	0,56	kč/cm ³	měrná cena
$K_n =$	1,25	-	koefficient nezdaru (šrotovaný materiál, v případě neúspěšného tisku)

Dávkové náklady provozu stroje

$$N_{Bps} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot \frac{t_{mA}}{d_v} \text{ [kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$$

$$N_{Bps} = 44,9486 \text{ Kč/ks}$$

$d_v =$	1	ks	výrobní dávka [ks]
---------	--------------------------------	----	--------------------

Režijní náklady na provoz stroje

$$N_{Rps} = (N_{Aps} + N_{Bps}) \cdot \frac{R}{100} \text{ [kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$$

$$N_{Rps} = 5,56404 \text{ Kč/ks}$$

$R =$	5	%	provozní režie
-------	--------------------------------	---	----------------

Operační náklady

$$N_{op} = N_{Aps} + N_{Bps} + N_{Rps} \text{ [kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$$

$$N_{op} = 116,845 \text{ Kč/ks}$$