



Stanovení základních mechanických vlastností odlehčených dílů z technologie FFF

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000/0 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Jakub Macháček**
Vedoucí práce: Ing. Jiří Šafka, Ph.D.





Evaluation of basic mechanical properties for lightweight parts produced with use of the FFF technology

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000/0 – Mechanical Engineering
Author: **Jakub Macháček**
Supervisor: Ing. Jiří Šafka, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Macháček**
Osobní číslo: **S15000119**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Stanovení základních mechanických vlastností odlehčených dílů z technologie FFF**
Zadávací katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

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

Cílem práce je zjistit mechanické vlastnosti (tah, vrub a ohyb) vytištěných dílů s vnitřní definovanou strukturou. Testovaným materiálem na technologii FFF (Fused filament fabrication) bude ABS (Akrylonitrilbutadienstyren). Práce bude obsahovat rozbor problematiky, naplánování a provedení testů a vyhodnocení naměřených dat.

1. Seznámit se s technologií FFF a stavbou dílů s definovanou vnitřní strukturou.
2. Naplánovat postup testů pro zkoušku tahem, vrubové houževnatosti a zkoušku ohybem.
3. Provést potřebné zkoušky včetně potřebného vyhodnocení.
4. Zhodnotit výsledky, závěr.

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

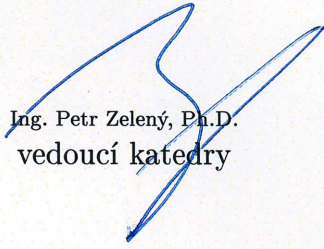
- [1] GIBSON, I., D.W. ROSEN and B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. ISBN 9781493921126.
[2] LIU, D., V. VALENCIA and A.B. BADIRU. Additive manufacturing handbook. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2017. ISBN 9781482264081.
[3] BRYDSON, J. A. Plastics materials. Boston: Butterworths, 1989. ISBN 0408007214.
[4] Příslušné mezinárodní normy.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Šafka, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Michal Ackermann, Ph.D.**
Ostatní konzultanti: **Ing. Petr Henyš, Ph.D.**
Katedra technologií a struktur
Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2017**
Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2019**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

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

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

Datum: 26. 6. 2018

Podpis: 

Abstrakt

Bakalářská práce se věnuje problematice aditivní výroby dílů s odlehčenou vnitřní strukturou a jejich mechanickému testování. K vytvoření vzorků byla použita technologie FFF a materiál ABS. Vnější geometrie vzorků vychází z normy ČSN EN ISO 527-2. Pro porovnání byly použity dvě geometricky rozdílné struktury výplně (rectilinear a honeycomb) a pět procentuálních faktorů vyplnění (0 %, 25 %, 50 %, 75 % a 100 %). Jako srovnávací kritéria byly použity základní mechanické vlastnosti získané ze zkoušek tahem, ohybem a rázem. Další hodnocené faktory jsou tiskový čas a hmotnost jednotlivých vzorků. Z výsledků praktických zkoušek vychází jako nejvýhodnější struktura typu rectilinear. Tento typ struktury vykazuje vyšší hodnoty pevnosti než typ honeycomb. Rectilinear také vykazuje jistou linearitu mechanických vlastností při změně faktoru vyplnění.

Klíčová slova: Fused Deposition Modeling, FDM, Fused Filament Fabrication, FFF, odlehčení, struktura, mechanické vlastnosti

Abstract

This bachelor thesis deals with topic of additive manufacturing of parts with inner lightweight structure and their mechanical testing. Technology FFF and ABS material were used for fabrication of tested samples. Outer geometry of the specimens corresponds to CSN EN ISO 527-2 standard. For direct comparison, two geometrically different lightweight structures – Rectilinear and Honeycomb – were used. For each of these two types of structures, five different factors of infill percentage (0 %, 25 %, 50 %, 75 % and 100 %) were tested. Comparison between the two structures was done thanks to the basic mechanical properties which were evaluated from tensile, bending and impact tests of given specimens. With respect to the evaluated data, rectilinear structure was considered to be more useful for further use. This type of structure exhibits higher values of strength than the other tested type. Moreover, rectilinear structure changes its mechanical properties approximately linearly with change of the factor of infill percentage.

Keywords: Fused Deposition Modeling, FDM, Fused Filament Fabrication, FFF, lightweight, structure, mechanical properties

Poděkování

Velice rád bych touto cestou poděkoval všem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě této práce a své rodině za podporu při studiu. Jmenovitě děkuji panu Ing. Jiřímu Šafkovi Ph.D. za vedení práce a jeho cenné rady a zkušenosti v oblasti 3D tisku. Panu Ing. Luboši Běhálkovi Ph.D. za pomoc s provedením mechanických testů. A v neposlední řadě panu Ing. Michalu Ackermannovi Ph.D. za pomoc s vyhodnocením měřených mechanických vlastností.

Obsah

Seznam zkratek	11
1 Úvod	12
1.1 Fused Deposition Modeling	13
1.2 Fused Filament Fabrication	14
1.3 Struktura tištěných dílů technologie FDM a FFF	15
1.3.1 Odlehčení jádra dílů	16
2 Použitá tiskárna a řídicí software	18
2.1 3D Tiskárna Felix Tec4	18
2.2 Software Simplify3D	19
3 Zkoušky mechanických vlastností	22
3.1 Stanovení tahových vlastností	22
3.2 Stanovení ohybových vlastností	24
3.3 Stanovení rázové houževnatosti	24
4 Zkušební tělesa	26
4.1 3D CAD model zkušebních těles	26
4.2 Použitá odlehčovací struktura	27
4.3 Příprava zkušebních těles	28
4.4 Sady zkušebních těles	28
5 Vyhodnocení testů a měření	31
5.1 Časová náročnost	31
5.2 Materiálová náročnost	32
5.3 Tahové vlastnosti	34
5.4 Ohybové vlastnosti	39
5.5 Rázová houževnatost	39
6 Zhodnocení výsledků měření	42
7 Závěr	44
A Měřené hodnoty	46
B Box-plot grafy	59

Seznam obrázků

1.1	Schéma technologie FDM	13
1.2	Model vytištěný na tiskárně Dimension SST 768 (technologie FDM)	14
1.3	3D tiskárna: Original Prusa i3 MK2S [7]	15
1.4	Struktura FDM modelu	16
1.5	Vybrané výplňové struktury	17
2.1	Tiskárna Felix Tec4[5]	18
2.2	Výplňové struktury softwaru Simplify3D	20
2.3	Odchylky u shodných těles při zpracování v Simplify3D	21
3.1	Schéma pracovního prostoru pro tahovou zkoušku	23
3.2	Schéma pracovního prostoru pro ohybovou zkoušku	24
3.3	Schéma pracovního prostoru pro rázovou zkoušku	25
4.1	Těleso 1 norma: ČSN EN ISO 179-1	26
4.2	Těleso 1B norma: ČSN EN ISO 527-2	27
4.3	Ukázka řídicího G-kódu	29
4.4	Jedna kompletní série zkušebních těles	30
5.1	Hmotnost zkušebního tělesa výplň rectilinear	33
5.2	Hmotnost zkušebního tělesa výplň honeycomb	34
5.3	Těleso číslo 1 rectilinear 100 % rozdrčená upínací část	35
5.4	Modul pružnosti E [MPa] struktur Rectilinear	36
5.5	Modul pružnosti E [MPa] struktur Honeycomb	36
5.6	Smluvní napětí na mezi pevnosti R_m [MPa] struktur Rectilinear	37
5.7	Smluvní napětí na mezi pevnosti R_m [MPa] struktur Honeycomb	37
5.8	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti ϵ_m [MPa] struktur Rectilinear	38
5.9	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti ϵ_m [MPa] struktur Honeycomb	38
5.10	Napětí na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} [MPa] struktur Rectilinear	40
5.11	Napětí na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} [MPa] struktur Honeycomb	40
5.12	Rázová houževnatost a_{cU} [kJm^{-2}] struktur Rectilinear	41
5.13	Rázová houževnatost a_{cU} [kJm^{-2}] struktur Honeycomb	41
B.1	Box-plot graf modulu pružnosti E [MPa] struktur Rectilinear	60
B.2	Box-plot graf modulu pružnosti E [MPa] struktur Honeycomb	60
B.3	Box-plot graf smluvní napětí na mezi pevnosti R_m [MPa] struktur Rectilinear	61

B.4	Box-plot graf smluvní napětí na mezi pevnosti R_m [MPa] struktur Honeycomb	61
B.5	Box-plot graf poměrné prodloužení na mezi pevnosti ϵ_m [MPa] struktur Rectilinear	62
B.6	Box-plot graf poměrné prodloužení na mezi pevnosti ϵ_m [MPa] struktur Honeycomb	62
B.7	Box-plot graf napětí na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} [MPa] struktur Rectilinear	63
B.8	Box-plot graf napětí na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} [MPa] struktur Honeycomb	63
B.9	Box-plot graf rázová houževnatost a_{cU} [kJm^{-2}] struktur Rectilinear .	64
B.10	Box-plot graf rázová houževnatost a_{cU} [kJm^{-2}] struktur Honeycomb	64

Seznam tabulek

2.1	Tecnická data tiskárny Felix Tec4	18
2.2	Tiskové parametry pro tisk zkušebních těles	19
4.1	Tabulka hodnot vyplnění zkušebních těles	27
4.2	Softwarově spočítaná náročnost tisku zkušebních těles	28
5.1	Časová náročnost výroby zkušebních těles	31
5.2	Teoretická materiálová úspora	32
5.3	Skutečná materiálová úspora	32
5.4	Porovnání hmotnosti výpočet s výtiskem	33
5.5	Tahové vlastnosti výplňových struktur	35
5.6	Rázové a ohybové vlastnosti výplňových struktur	39
A.1	Tahové vlastnosti vzorků Rectilinear 0 %	47
A.2	Tahové vlastnosti vzorků Rectilinear 25 %	47
A.3	Tahové vlastnosti vzorků Rectilinear 50%	48
A.4	Tahové vlastnosti vzorků Rectilinear 75 %	48
A.5	Tahové vlastnosti vzorků Rectilinear 100 %	49
A.6	Tahové vlastnosti vzorků Honeycomb 25 %	49
A.7	Tahové vlastnosti vzorků Honeycomb 50 %	50
A.8	Tahové vlastnosti vzorků Honeycomb 75 %	50
A.9	Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Rectilinear 0 %	51
A.10	Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Rectilinear 25 %	52
A.11	Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Rectilinear 50 %	53
A.12	Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Rectilinear 75 %	54
A.13	Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Rectilinear 100%	55
A.14	Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Honeycomb 25 %	56
A.15	Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Honeycomb 50 %	57
A.16	Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Honeycomb 75 %	58

Seznam zkratek

2D	Two-dimensional - Dvourozměrné
3D	Three-dimensional - Třírozměrné
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
AM	Additive Manufacturing - Aditivní výroba
ASA	Acrylonitrilestyreneacrylate
Box-Plot graf	Krabicový graf
CAD	Computer Aided Design - Počítačem podporované projektování
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
PC	Polycarbonate
PET	Polyethylene terephthalate
PLA	Polylactic acid
PVA	Polyvinyl alcohol
RepRap	Self-replicating machine - Samo replikující se zařízení
UV	Ultraviolet - Ultrafialové

1 Úvod

3D tisk je ve světě převážně znám pod pojmem Additive Manufacturing (AM). Jedná se o soubor aditivních technologií, které mají počátek již v osmdesátých letech dvacátého století. Iniciativa Průmyslu 4.0 plánuje využití těchto zmíněných technologií 3D tisku, jako jednu ze stěžejních výrobních technologií pro další století. V současné době existuje mnoho technologií a principů 3D tisku, pracujících s rozličnými materiály. Používané materiály u 3D tisku mohou být termoplastické a fotocitlivé polymery, vosky, práškové materiály (termoplasty, kovy, písek, sklo, keramika) a další. Jednotlivé technologie využívají různé principy fyzikálně-chemických procesů. Základními postupy výroby jsou: nanášení taveniny, vytvrzování tenké vrstvy foto-polymeru, lokální tavení či spékání prášku, lepení prášku pojivem a další možné kombinace [11, 6].

Hlavní doménou 3D tisku je oblast prototypové výroby dílů. Důvodem je, že jednotkové výrobní časy pomocí 3D tisku mohou být delší než vlastní výrobní čas stejného dílce s využitím konvenčních technologií (vstřikování, obrábění, tlakové lití, tváření, atd.). Hlavní předností aditivních technologií je nezávislost na geometrii vyráběného modelu a to jak vnitřní, tak vnější. Další neméně významnou výhodou je minimalizace přípravných operací a vlastních materiálových nároků oproti konvenčním technologiím. V současné době se tyto technologie začínají objevovat i pro malosériové aplikace cca do 1000 ks/rok. Při výrobě těchto množství jsou hlavním kritériem výsledné mechanické vlastnosti daného modelu a pak až cena a doba tisku. Z tohoto důvodu se hledají cesty, jak snížit materiálovou a časovou náročnost výroby dílů s cílenou geometrií modelu, která je vhodná pro AM [6].

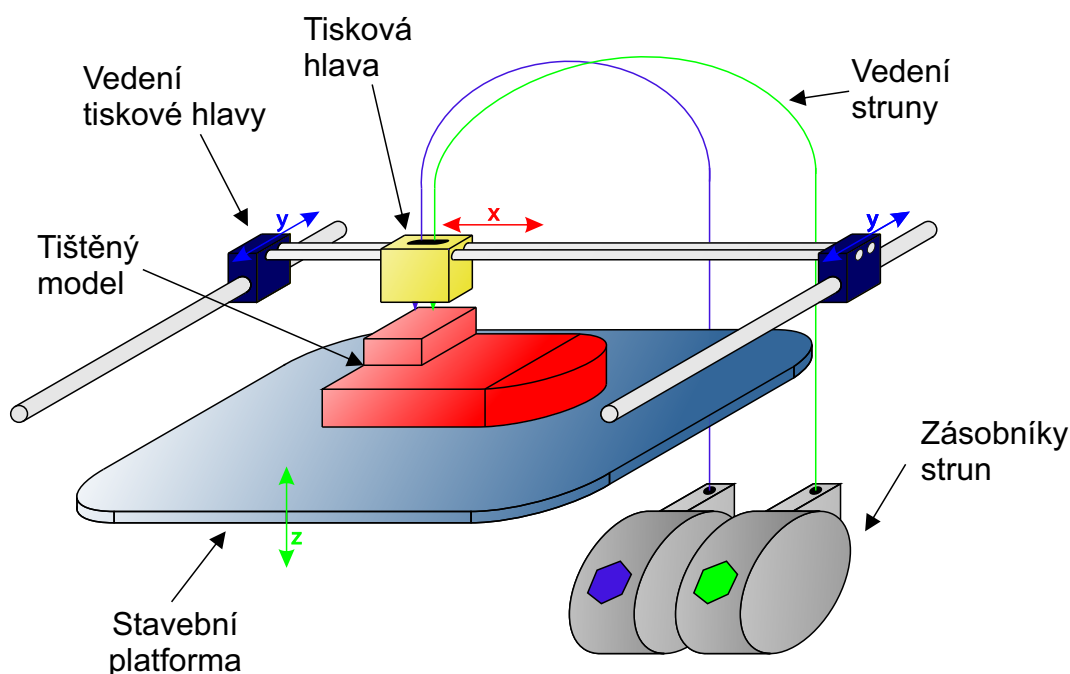
První variantou získání dílu s cílenou geometrií je geometrická optimalizace, někdy také známa pod pojmem topologická optimalizace. Druhou variantou je možnost odlehčení modelu – jádra dílu, a to pomocí tvorby skořepin s vnitřní odlehčenou strukturou.

Tato bakalářská práce se zabývá druhým přístupem – vnitřním odlehčením dílů s ohledem na hmotnost, čas tisku a výsledné mechanické vlastnosti. Testovaným materiálem je ABS (Akrylonitrilbutadienstyren), zpracovaný technologií Fused Filament Fabrication (FFF). Zkoumané mechanické vlastnosti jsou:

- Pevnost v tahu
- Modul pružnosti v tahu
- Pevnost v ohybu
- Rázová houževnatost

1.1 Fused Deposition Modeling

Technologie Fused Deposition Modeling (FDM) patří do skupiny Additive Manufacturing (AM). FDM má původ v 90. letech minulého století. FDM je založena na principu postupné stavby modelu vrstvu po vrstvě. Od svého vzniku zaznamenala značný rozvoj, jak v oblasti různých typů konstrukcí zařízení, tak ve variabilitě používaných termoplastických materiálů. Využívanými materiály jsou u této technologie termoplastické polymerní materiály, upravené do podoby struny o přesně zadaném průměru. Tyto struny jsou navinuty na speciálních cívkách, které jsou uzavřeny a chráněny před okolním prostředím. Důvodem uzavřených obalů je využívání rychle navlhavých termoplastických materiálů jako je např. PC a PC-ABS. V současné době je možné využít k tisku různé materiály např. ABS, ASA, PC, PC-ABS, ULTEM a mnoho dalších. FDM je využívána pro výrobu prototypů, ale také pro mechanicky odolné sériové díly, které se vyrábějí v malých objemech výroby [1, 10, 3].

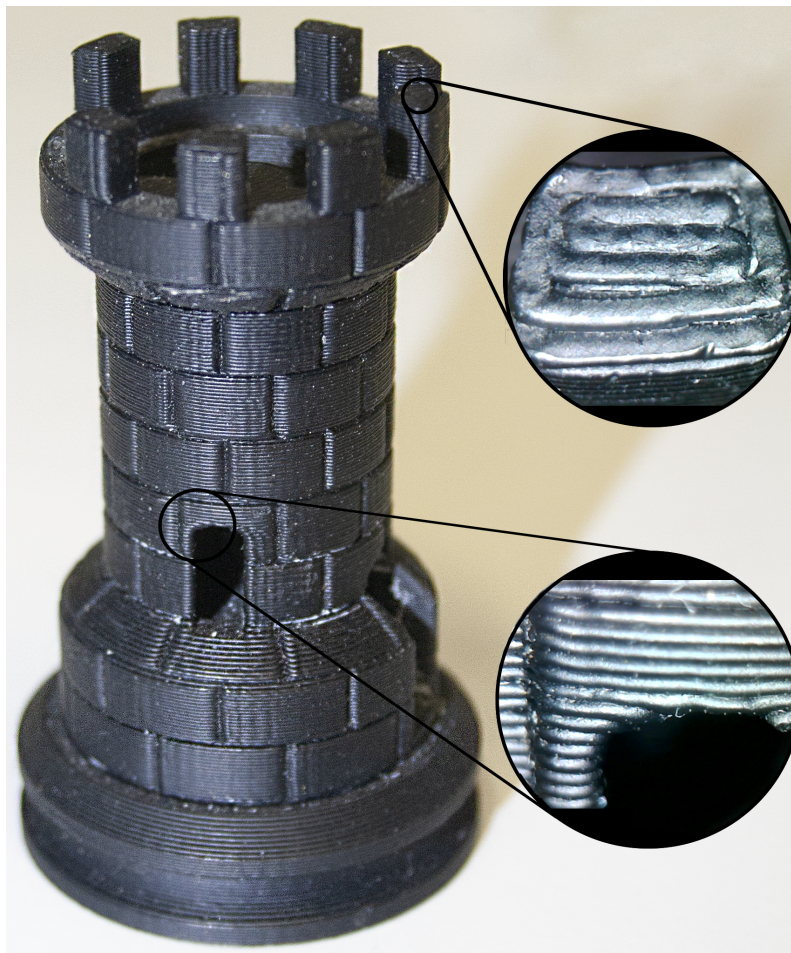


Obrázek 1.1: Schéma technologie FDM

Princip FDM (obrázek 1.1) spočívá v extruzi termoplastického vlákna skrz tiskovou hlavu. V trysce, která je umístěna na vnější části tiskové hlavy, dochází k natavení termoplastického vlákna a vytlačení taveniny výstupním otvorem trysky. Výsledkem je tenké vlákno, které je umístěno na přesně řízené modelovací místo. Vytlačené vlákno je nanášeno pohybem hlavy v horizontálních osách X-Y na předchozí vrstvy modelu. V případě první vrstvy tisku na stavební platformu stroje. Pohyb v ose Z je zajištěn polohováním tiskového stolu stroje. Během nanesení vlákna na předchozí vrstvu modelu dochází k natavení kontaktního povrchu předchozí vrstvy. Tímto způsobem dojde ke vzniku pevného spojení nové vrstvy tisku s předchozí

vrstvou. Vlastní proces se opakuje, až do dokončení celého modelu. Celý výrobní proces probíhá v uzavřeném prostředí s řízenou teplotou. Výsledkem je lepší stabilizace modelu během tisku a také rovnoměrné chladnutí vrstev, oproti otevřenému systému s neřízenou teplotou. Ve vyhříváné stavební komoře je nastavena nižší pracovní teplota než teplota tavení vlákna na trysce a tím dochází ke kontinuálnímu ochlazování tisknutého modelu [3].

Pro modely vyrobené technologií FDM je typický vzhled povrchu a to díky obvodovým vláknům na bocích modelu a viditelným vláknům na plochách modelu. Detail modelu vyrobeného technologií FDM je znázorněn na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2: Model vytištěný na tiskárně Dimension SST 768 (technologie FDM)

1.2 Fused Filament Fabrication

Technologie Fused Filament Fabrication (FFF) je ve svém základním principu shodná s technologií FDM. Název technologie FFF byl vytvořen komunitou RepRap s cílem využívat tuto otevřenou platformu bez případných právních postihů. Hlavním důvodem je ochranná známka společnosti Stratasys Inc. na pojem Fused Deposition Modeling (FDM). Technologie FFF nevyužívá platná patentovaná řešení příslušící

k technologii FDM od společnosti Stratasys Inc. Tato společnost má patentově chráněno několik typů konstrukčních řešení tiskových hlav, systémů polohování tiskových hlav a další. Mezi nejvýznamnější rozdíl běžných tiskáren FFF patří absence vyhřívaného pracovního prostoru tiskárny. Patent na vyhřívaný pracovní prostor vypršel firmě Stratasys Inc. v druhé polovině roku 2017. Díky tomu se začínají objevovat na trhu FFF tiskárny využívající řízenou teplotu pracovního prostředí tiskárny. Nejvýznamnějším představitelem cenově dostupných FFF tiskáren bez uzavřeného vyhřívaného pracovního prostoru je v současné době tiskárna s Českým původem Prusa i3 (obrázek 1.3) [8].



Obrázek 1.3: 3D tiskárna: Original Prusa i3 MK2S [7]

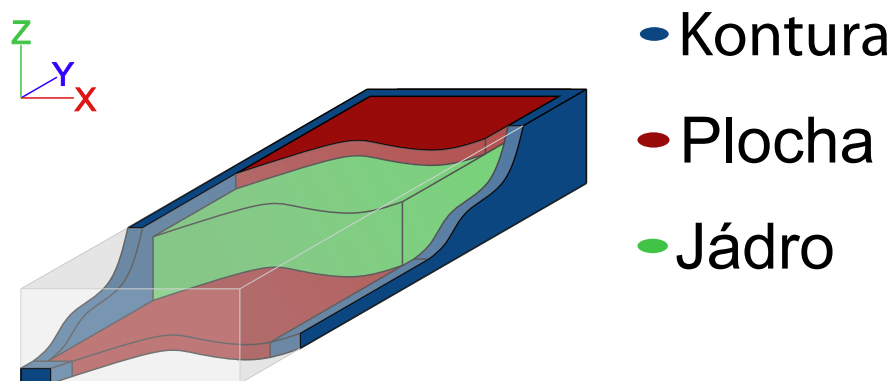
1.3 Struktura tištěných dílů technologie FDM a FFF

Pomocí definovaných drah tiskové hlavy je řízen vlastní tisk dílů. K vytištění dílu jsou použity tři základní strategie pohybu tiskové hlavy. Díky těmto strategiím, lze vytištěný model rozdělit do oblastí ve kterých jsou dané strategie použity. Oblasti a strategie lze nazvat Kontura, Plocha a Jádru. Rozdělení tisknutého modelu do zmíněných oblastí je znázorněno na obrázku 1.4 [4, 9].

Kontura kopíruje obvod modelu v jednotlivých vrstvách a tvoří tak vnější hranici modelu. Kontura je, pokud to geometrie modelu umožňuje, spojitě vlákno, popřípadě více soustředných vláken v těsné blízkosti.

Plochy vyplňují prostor uvnitř kontury v místech, kde tyto plochy jsou viditelné na výsledném modelu. Tyto plochy jsou vyplňovány většinou přímými vlákny v těsné blízkosti. Pro vytvoření celistvé a pevné plochy se používá více na sebe kolmých směrů orientace vlákna v navazujících vrstvách.

Kontury a plochy společně vytvářejí celistvou skořepinu modelu a jejich vlastnosti mají tedy zásadní vliv na geometrický rozměr a povrchovou kvalitu dílů. Jádro modelu vyplňuje prostor uvnitř skořepiny modelu. Struktura a styl vytváření jádra nejsou navenek jednoznačně viditelné. Jádro může být v zásadě dvojího typu a to plné, nebo odlehčené. Plné jádro se většinou vytváří stejným způsobem jako pohledové plochy modelu. Odlehčená jádra nabízejí značné možnosti různých stylů vyplnění.



Obrázek 1.4: Struktura FDM modelu

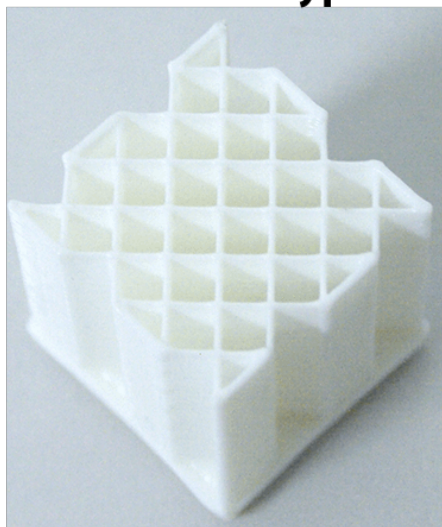
1.3.1 Odlehčení jádra dílů

Jádra modelu lze optimalizovat výplňovými strukturami. Struktura je určena pro odlehčení modelu, nikoliv však k záměrné změně mechanických vlastností. Změna mechanických vlastností je důsledkem vlastního odlehčení jádra. Vnitřní odlehčenou strukturou lze tak dosáhnout nižší hmotnosti dílu, ale také snížení spotřeby materiálu a v neposlední řadě i času potřebného na tisk modelu. Výplňové struktury se vytvářejí opakováním dílčích vzorů (buněk) struktury. Výplňový vzor, tzv. pattern, je určen svým tvarem a procentuálním zaplněním jádra modelu, případně velikostí jednotlivých elementů buněk. Možnosti vytvářených patternů se liší, dle použitých technologií a softwarových řešení přípravy dat. Pro Technologie FDM a FFF jsou typické patterny 2D (plošné) a pro technologie práškového tisku patterny ve 3D (prostorové).

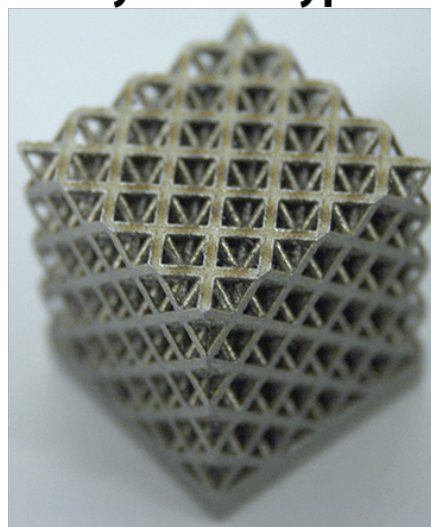
2D Struktura je tvořená z plošných buněk 2D patternu. Buňky leží v rovině vrstvy a procházejí tak celým jádrem dílu. 2D výplňové struktury jsou nejčastěji vytvářeny během přípravy dat pro 3D tisk technologiemi FDM a FFF a není tak přímou součástí geometrických dat 3D modelu. Nejčastějším případem 2D struktur jsou čtverce a šestiúhelníky (Honeycomb). Příklady struktur jsou zobrazeny na obrázku 1.5.

3D Struktura je složena z prostorových buněk. Složením prostorových buněk vzniká komplexnější 3D struktura. Takto vytvořené výplňové struktury se používají zejména u metod 3D tisku z práškových materiálů. 3D struktury mohou být během tisku samonosné, popřípadě jsou podpořeny nevyužitým práškovým materiálem. Struktura je většinou tvořena jako součást vlastní geometrie modelu ve fázi přípravy 3D modelu. Používanou strukturou je například prostorový honeycomb, Gyroid struktura, krychlové buňky. Vybrané struktury jsou zobrazeny na obrázku 1.5

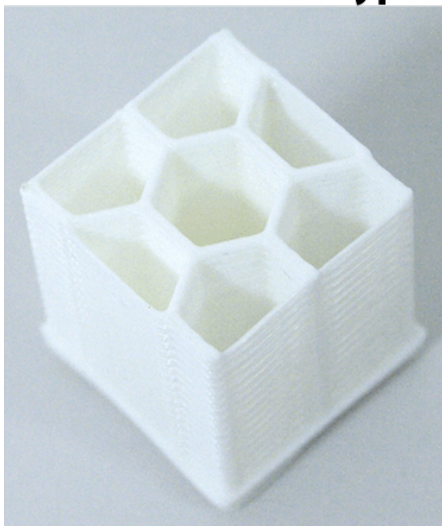
Čtvercová výplň



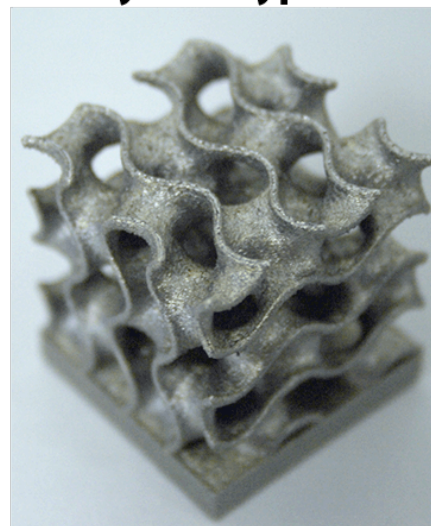
Krychlová výplň



Šestiúhelníková výplň



Gyroid výplň



Obrázek 1.5: Vybrané výplňové struktury

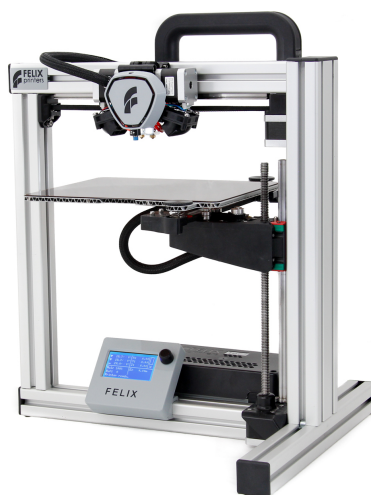
2 Použitá tiskárna a řídicí software

2.1 3D Tiskárna Felix Tec4

K výrobě testovacích těles byla použita 3D tiskárna využívající technologii FFF značky FELIXprinters, model Felix Tec4 (obrázek 2.1). Technické specifikace tiskárny Felix Tec4 jsou uvedeny v tabulce 2.1. Při tisku testovacích těles byla použita konfigurace tiskárny s tryskou o malém průměru 0,35 mm. Pro tisk byla využita jedna ze dvou tiskových hlav tiskárny, druhá hlava tiskárny zůstala nečinná z důvodu nevyužití dalšího materiálu [5].

Tabulka 2.1: Technická data tiskárny Felix Tec4

Tiskové hlavy:	2× max. 275 °C
Průměr materiálu:	1,75 mm ± 0,15
Stavební prostor:	237×244×235 mm
Tisková vrstva:	0,05 - 0,25 mm
Průměr trysky:	0,25; 0,35 ;0,5; 0,7 mm
Tiskový stůl:	Vyhřívaný max. 95 °C
Materiál:	PLA, PET, ABS, PVA, Flex, Wood, Glass
Software:	Repetier Host, Simplify3D



Obrázek 2.1: Fotografie tiskárny Felix Tec4 od společnosti FELIXprinters [5]

2.2 Software Simplify3D

K přípravě dat a pro vlastní řízení 3D tiskárny Felix Tec4 byl použit software Simplify3D. Software Simplify3D nabízí rozsáhlé možnosti nastavení tiskových parametrů. Tiskové parametry k tisku testovacích těles vycházejí z parametrů dodávaných společností FELIXprinters pro tiskárny Felix Tec4. Základní parametry tiskového profilu jsou vypsané v tabulce 2.2. Pro tisk byla zvolena tisková vrstva 0,25 mm a teplotní parametry byly nastaveny pro práci s materiálem ABS.

Tabulka 2.2: Tiskové parametry pro tisk zkušebních těles

Tisková vrstva:	0,25 mm
Horní plné vrstvy:	3
Spodní plné vrstvy:	3
Kontury:	3
Přesah výplně do kontury:	30 %
Tisková teplota hlavy:	220 °C
Tisková teplota podložky:	70 °C
Výchozí tisková rychlost:	2500 mm/min
Rychlost vnější:	50 % výchozí rychlosti
Rychlost plných vrstev:	50 % výchozí rychlosti

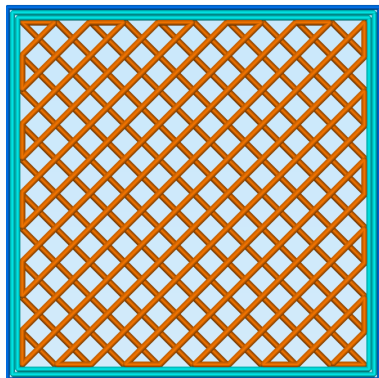
Simplify3D nabízí 6 vnitřních výplňových vzorů (Rectilinear, Grid, Triangular, Wiggle, Fast Honeycomb, Full Honeycomb). Každý z těchto vzorů výplně umožňuje procentuální nastavení zaplnění tištěného modelu. Výplňové vzory jsou tištěny v jedné vrstvě nebo jako sekvence po sobě jdoucích vrstev, které jsou také zobrazeny v příslušném obrázku 2.2. Tyto zobrazené sekvence vytváří výsledný celkový vzor vnitřní výplně.

Simplify3D při přípravě řídicího kódu rozděljuje model, případně modely na čtyři základní prvky. Rozložení těchto prvků na modelu vychází ze základního rozdělení modelu u technologií FDM a FFF na oblast plocha, kontura a jádro.

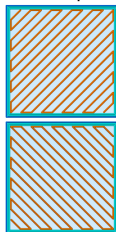
- Spodní plocha (Plocha)
- Horní plocha (Plocha)
- Kontury (Kontura)
- Vnitřní výplň (Jádro)

Všechny čtyři prvky jsou generovány pro každé těleso individuálně vzhledem k jeho poloze na tiskové ploše. Díky tomu dvě tělesa se shodnou vnější geometrií nemusí mít shodně vytvořené dráhy tisku. Při generování tedy dochází k drobným odlišnostem v dráhách (např. začátek dráhy na tělese), případně dochází k posunutí vzoru vnitřních i vnějších výplní tělesa. Posunutí drah jsou zobrazeno na obrázku 2.3. V důsledku výše popsaného posunutí drah v softwaru, je nutné provést úpravu v postupu tisku. Pokud chceme tisknout více těles se zcela shodnou vnitřní geometrií, je nutné těleso tisknout opakovaně ze stejného řídicího kódu.

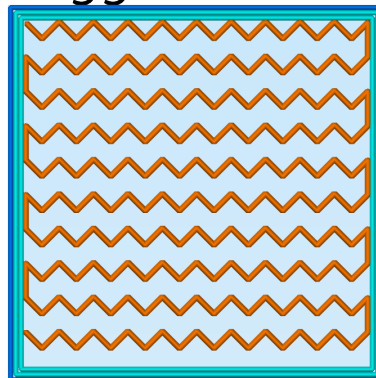
Rectilinear



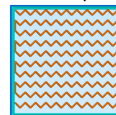
Posloupnost



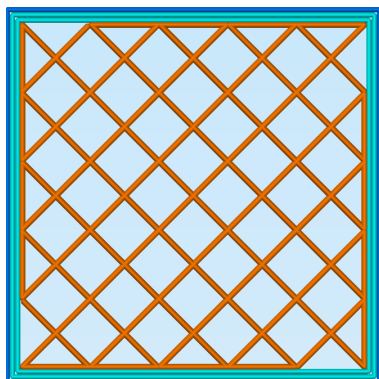
Wiggle



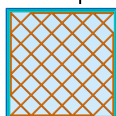
Posloupnost



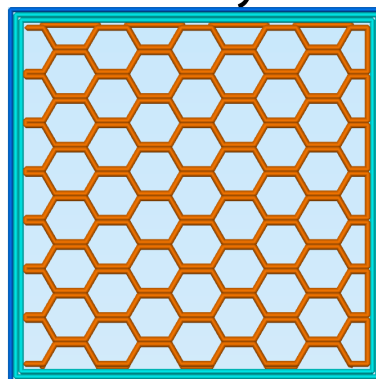
Grid



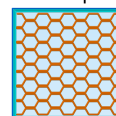
Posloupnost



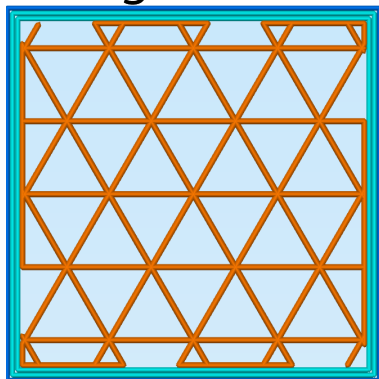
Fast Honeycomb



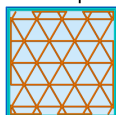
Posloupnost



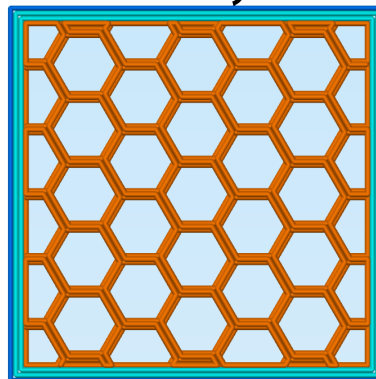
Triangular



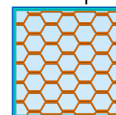
Posloupnost



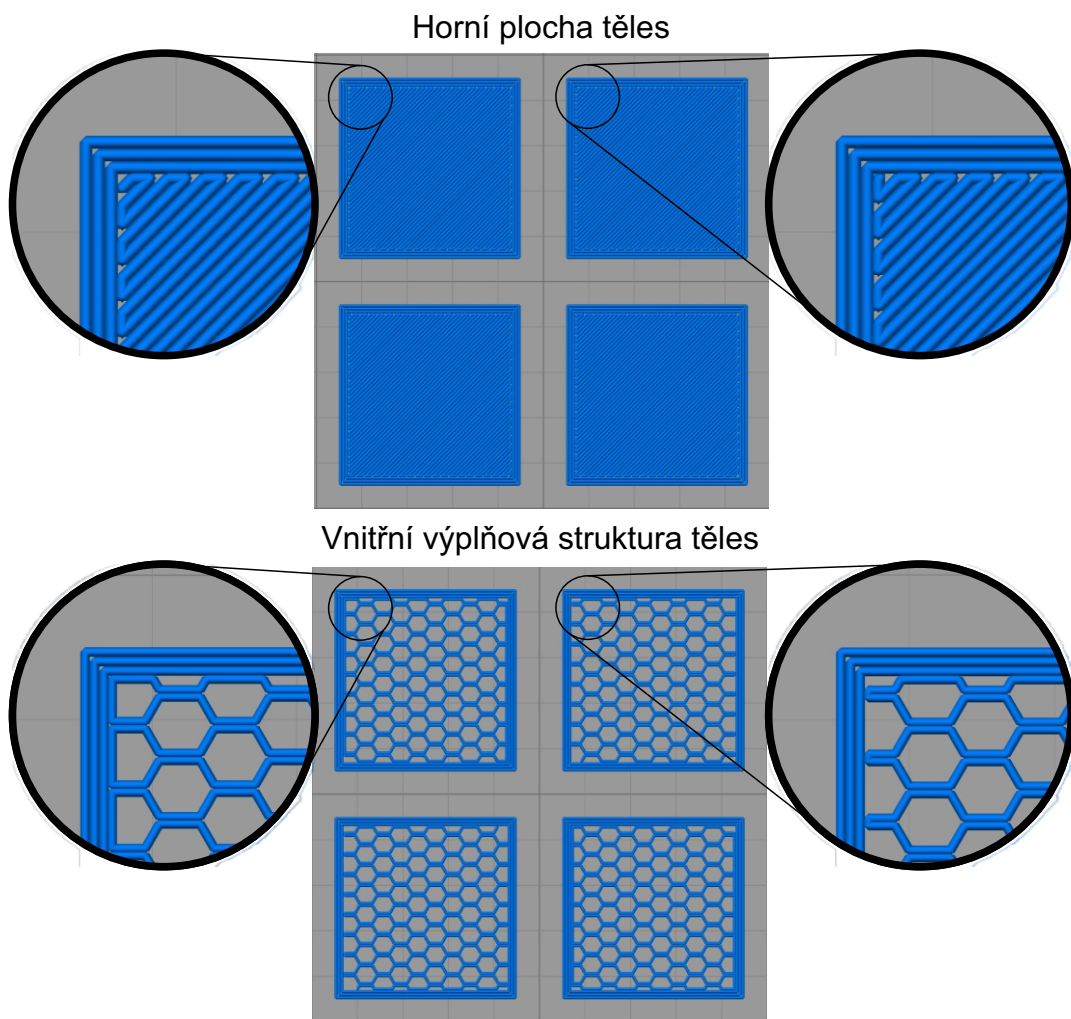
Full Honeycomb



Posloupnost



Obrázek 2.2: Výplňové struktury softwaru Simplify3D



Obrázek 2.3: Odchyly u shodných těles při zpracování v Simplyfy3D

3 Zkoušky mechanických vlastností

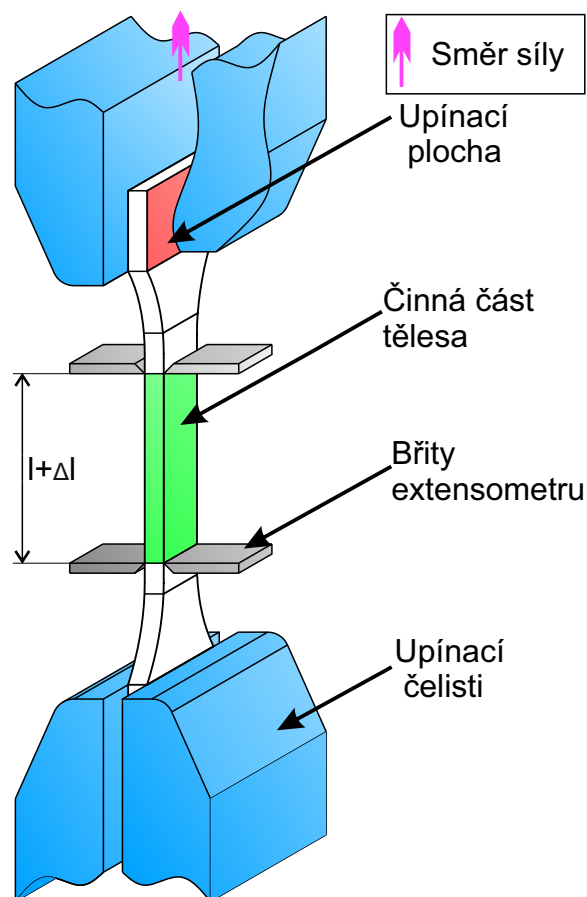
U každého materiálu lze pomocí standardizovaných zkoušek stanovit jeho mechanické vlastnosti. Ty popisují chování materiálu při vnějším silovém zatěžování a jsou velice důležité při porovnání jednotlivých materiálů. K mechanickým vlastnostem patří pevnost, pružnost, plasticita a houževnatost. Tyto zmíněné vlastnosti popisují mechanické charakteristiky svými číselnými hodnotami. Mechanické charakteristiky materiálu nejsou konstantní za všech podmínek, ale jsou závislé na mnoha faktorech. Pro termoplasty jsou nejzásadnější faktory teplota a vlhkost. Dalšími ovlivňujícími parametry jsou stáří materiálu, expozice UV záření a zpracovatelská technologie (vstřikování, 3D tisk, tváření za tepla či studena). Mezi nejzákladnější charakteristiky materiálu patří jeho tahové vlastnosti, které zjišťujeme statickou zkouškou tahem. Výsledkem tahové zkoušky jsou hodnoty napětí a příslušné deformace [2].

Testy mechanických vlastností (Mechanických charakteristik materiálu) jsou stanoveny Českou národní resp. Evropskou normou. Norma určuje postup, metodiku testů a dále definují prioritní tvar zkušebních těles, podmínky a procesní parametry zkoušky.

Pro tělesa s vnitřní odlehčenou strukturou, která jsou zpracována pomocí aditivní technologie výroby, nejsou zavedené žádné vhodné normy, standardy k jejich testování a vyhodnocení. Testování vzorků a vyhodnocení dat v této práci bylo provedeno s využitím norem pro materiály zpracovávané pomocí technologie vstřikování plastů. V následující části práce jsou popsány zkoušky mechanických vlastností, které byly provedeny na testovaných tělesech.

3.1 Stanovení tahových vlastností

Zkouška tahových vlastností je definována jako zkouška se zvyšujícím se zatížením, až do přetržení zkušebního tělesa, nebo splnění ukončovacích podmínek. Zkušební těleso je silou zatěžováno ve směru hlavní osy tělesa a tak zde vzniká pouze jednoosá napjatost. Při zkoušce se kontinuálně zaznamenávají hodnoty zatěžující síly a deformace tělesa. U standardních testů je normou předepsán i standardní tvar a rozměr zkušebního tělesa, který je zvolen, dle typu materiálu a technologie výroby. Deformace tělesa jsou měřeny na předem určené části tělesa s výchozí délkou v nezatíženém, nebo předpjatém stavu. Podmínky a provedení měření tahových vlastností upravuje norma ČSN EN ISO 527 (Plasty – Stanovení tahových vlastností). Základní schéma měření ukazuje obrázek 3.1.



Obrázek 3.1: Schéma pracovního prostoru pro tahovou zkoušku

Testy těles v této práci vychází z normy ČSN EN ISO 527-1 (Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy) a ČSN EN ISO 527-2 (Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty). Pro testy bylo vybráno těleso standardního typu 1B, dle normy ČSN EN ISO 527-2. Rozměry tělesa a jeho tvar je popsán v části 4.1. Počet zkušebních těles v jedné testovací sérii byl 15 kusů oproti minimálnímu požadavku 5 kusů, dle normy ČSN EN ISO 527-1. Měření bylo rozděleno na dvě části: v první části byl měřen modul pružnosti, druhá část byla věnována měření napětí a poměrné deformaci na mezi pevnosti.

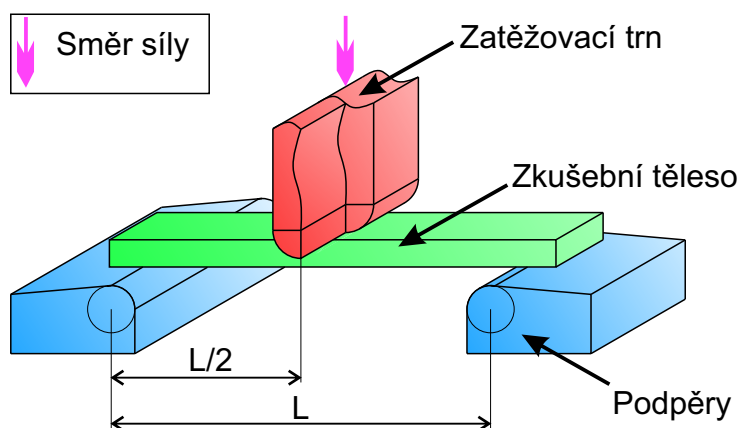
Měření modulu pružnosti bylo provedeno na všech 15 zkušebních tělesech. Jelikož se jedná o zkoušku nedestruktivní, bylo možné tělesa následně znovu použít pro druhé měření. K praktickým testům byl použit univerzální trhací stroj TiraTest s 10 kN snímací hlavou a extensometrem Epsilon 3542-010M-025-ST. Zkouška byla prováděna se zatěžovací rychlostí 1 mm/min.

Druhá zkouška stanovení napětí na mezi pevnosti byla již destruktivní. Byla opět provedena na všech 15 tělesech v dané sérii. Měření bylo opět prováděno na stejném měřicím zařízení. Univerzálním trhacím stroji TiraTest s 10 kN snímací hlavou a extensometrem MFN-A. Zkouška byla prováděna se zatěžovací rychlostí 50 mm/min.

3.2 Stanovení ohybových vlastností

Zkouška v ohybu probíhala rovněž jako zkouška se zvyšujícím se zatížením, až do porušení zkušební tělesa. Během zkoušky byl kontinuálně zaznamenáván průběh silového zatížení a deformace (průhyb) zkušební tělesa. Těleso bylo zatěžováno na svém středu při uložení na dvou podpěrách. Vznikl tak standardní tříbodový ohyb. Na obrázku 3.2 je znázorněno uložení tělesa během zkoušky. Pro standardní testy je opět jako v případě zkoušky tahem předepsáno zkušební těleso příslušnou normou. Norma definuje tvar a rozměry zkušební tělesa. Tělesa bývají jednoduchého tvaru kvádrů o standardizovaných rozměrech. Pro zvolené testy předepisuje tyto údaje norma ČSN EN ISO 178 (Plasty – Stanovení ohybových vlastností).

Dle normy ČSN EN ISO 178 je voleno standardní těleso s rozměry 80x10x4 mm. Zkouška je provedena s rozpětím mezi podpěrami $L=64$ mm, toto rozpětí určuje norma pro zvolené zkušební těleso. Během zkoušky je zaznamenáván průhyb tělesa z posuvu příčnicku univerzálního trhacího stroje Hounsfield H10KT. Zatěžující síla byla zaznamenávána s použitím 500 N snímací hlavy. Jako testovací série není volen minimální požadavek 5 těles, dle ČSN EN ISO 178, ale je zde zvoleno 10 zkušebních těles. Ze zkoušky je vyhodnoceno napětí na mezi pevnosti v ohybu. Jako zatěžovací rychlost pro zkoušku je použita rychlost 2 mm/min.

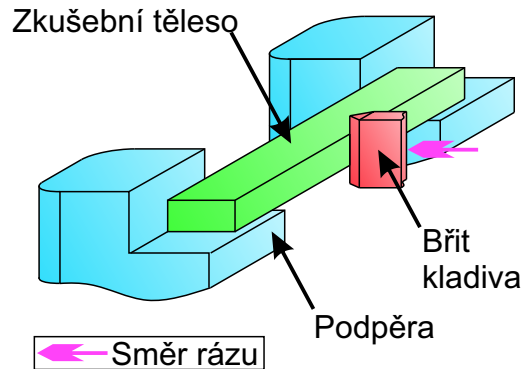


Obrázek 3.2: Schéma pracovního prostoru pro ohybovou zkoušku

3.3 Stanovení rázové houževnatosti

Pro stanovení rázové houževnatosti je použita testovací metoda Charpy. Rázová zkouška je zkouškou dynamickou se skokovým nárůstem síly. Pro stanovení rázové houževnatosti je prováděna zkouška na celistvém zkušebním tělese. Případně lze provést zkoušku na tělese s vrubem, v tomto případě získáváme hodnotu vrubové houževnatosti. Pro test s vrubem je vrub definovaného tvaru vytvořen do zkušebních tělesa. Obě varianty zkoušky určené pro houževnaté plasty specifikuje norma ČSN EN ISO 179-1 (Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy -

Část1: Neinstrumentovaná zkouška). Zkouška se provádí na Charpyho kladivu s předepsanou rázovou energií a měřena je tzv. ztrátová energie, která je zmařena během přeražení tělesa. Pro tuto zkoušku je nutnou podmínkou, aby rázová energie kladiva byla vyšší nežli energie ztrátová. V opačném případě nedochází k destrukci tělesa a zkouška je neplatná. Schéma rázové zkoušky (obrázek 3.3) ukazuje umístění zkušebního tělesa během zkoušky.



Obrázek 3.3: Schéma pracovního prostoru pro rázovou zkoušku

Pro testy bylo zvoleno testovací těleso typu 1, dle normy ČSN EN ISO 179-1. Parametry tělesa jsou uvedeny v části 4.1. Pro test jsou zvoleny série vzorků po 10 kusech. Zkouška je provedena na tělesech bez vrubu, a to kvůli odlehčené vnitřní struktuře. Zhotovením vrubu do tělesa by mohlo dojít k porušení (narušení) vnitřní odlehčené struktury. Pro zkoušku bylo využito rázové kladivo Resil Ceast 5.5 s energií kladiva 5 J. Ráz je veden na užší hranu vzorku (Edgewise Impact), dle normy ČSN EN ISO 179-1.

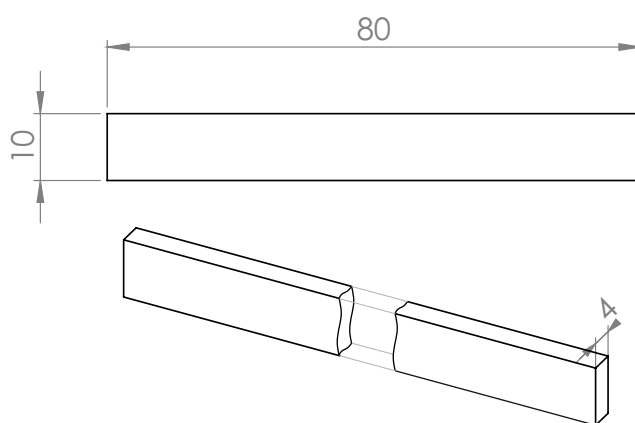
4 Zkušební tělesa

Pro zkoušky mechanických vlastností byla vyrobena zkušební tělesa. Normy vyžadují pro každou zkoušku minimálně 5 testovacích těles ze shodné série. Na testy byla volena série o větším objemu těles, pro získání vyšší preciznosti zkoušky a možnosti statistického vyřazení odlehlých hodnot měření. Vzhledem k vnitřní výplňové struktuře je očekáván značný rozptyl měřených hodnot. V této práci bylo pro zkoušky vytvořeno 15 těles pro tah, 10 těles pro ohyb a 10 těles pro ráz. Zkouška tahem je považována za základní zkoušku mechanických vlastností a z tohoto důvodu je volen nejvyšší počet těles pro tuto zkoušku.

4.1 3D CAD model zkušebních těles

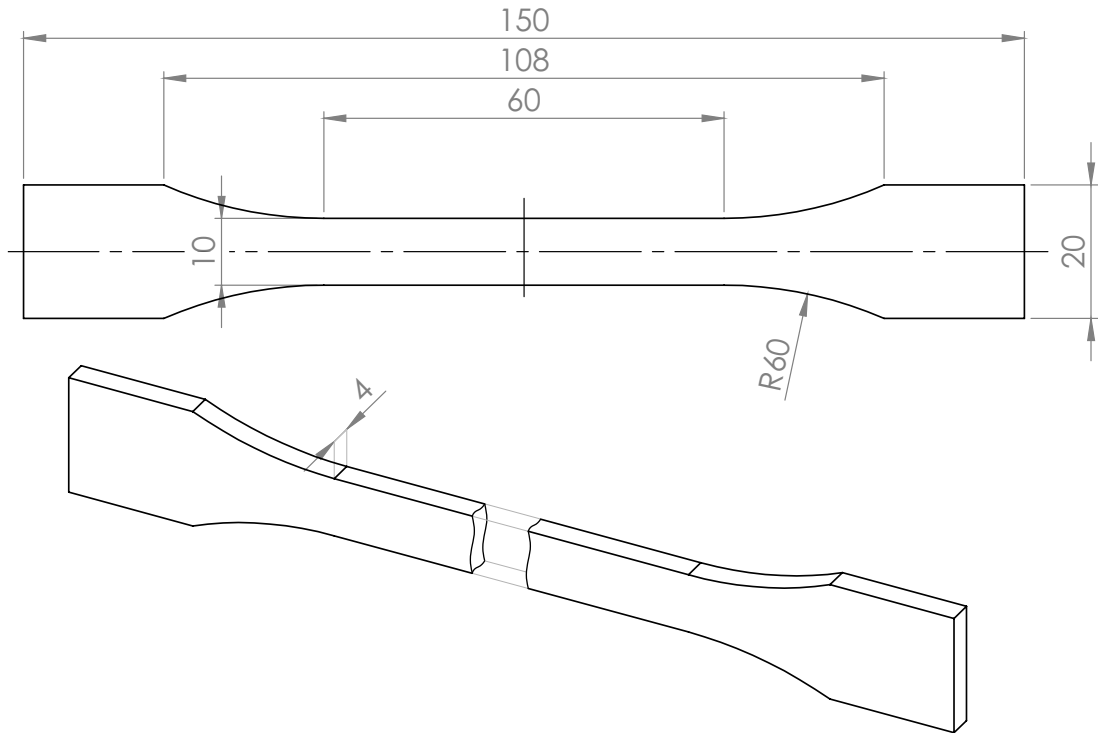
Pro možnost výroby vzorků prostřednictvím technologie FFF je nutný 3D CAD model zkušebního tělesa. Podoba zkušebních těles je vytvořena, dle normy pro zkoušku tahem ČSN EN ISO 527-2, ohybem ČSN EN ISO 178 a rázem ČSN EN ISO 179-1. Pro tisk jsou tedy zvoleny dvě geometrie tělesa. Tělesa pro zkoušku tahem a tělesa pro zkoušku ohybem a rázem.

Těleso pro zkoušku ohybem a rázem je, dle normy ČSN EN ISO 179-1 typ tělesa 1. Těleso má tvar a rozměrové parametry, dle obrázku 4.1



Obrázek 4.1: Těleso 1 norma: ČSN EN ISO 179-1

Těleso pro zkoušku tahem je, dle normy ČSN EN ISO 527-2 typ tělesa 1B pro jeho kompaktnější rozměry oproti typu 1A. Tvar a rozměry tělesa jsou zobrazeny na obrázku 4.2. 3D modely těles jsou přiloženy k práci jako digitální příloha na CD ve formátech .Step a .Stl.



Obrázek 4.2: Těleso 1B norma: ČSN EN ISO 527-2

4.2 Použitá odlehčovací struktura

K testování mechanických vlastností odlehčených těles byly zvoleny dvě základní struktury vnitřního vyplnění. Tyto struktury jsou běžně používané u FFF procesu tisku. První zvolenou strukturou je profil "kříž" (Rectilinear) a druhou je profil "šestiúhelník" (Full Honeycomb). Náhled těchto struktur je na obrázku 2.2.

Vlastní generování struktur bylo prováděno v softwaru Simplify3D 4.0, a to během přípravy řídicího kódu pro tisk. U definovaných struktur je zadán jejich profil a procentuální hodnota vyplnění vnitřního prostoru daného testovacího tělesa. U tisků byly hodnoty jednotlivých parametrů zadány, dle následující tabulky 4.1.

Tabulka 4.1: Tabulka hodnot vyplnění zkušebních těles

Profil výplně	Hodnota vyplnění				
	100 %	75 %	50 %	25 %	0 %
Rectilinear	100 %	75 %	50 %	25 %	0 %
Honeycomb		75 %	50 %	25 %	

4.3 Příprava zkušebních těles

Výroba zkušebních těles proběhla na 3D tiskárně Felix Tec4, která je blíže specifikována v části 2.1. Pro přípravu drah k řízení tiskárny byl použit software Simplify3D, jež je základně popsán v části 2.2. Pro výrobu každé sady zkušebních těles (15 těles tah, 10 těles ohyb, 10 těles ráz) byly vždy vygenerovány dva řídicí kódy. Jeden kód pro tělesa na tah a druhý kód pro tělesa na ohyb a ráz. Kód byl vždy vytvořen pro tisk jednoho tělesa. Tisk tělesa z vygenerovaného kódu se opakoval, až do vytištění příslušného počtu kusů těles. Veškeré použité řídicí kódy jsou přiloženy jako digitální příloha na CD. Ukázka kódu včetně jeho vizualizace je na obrázku 4.3.

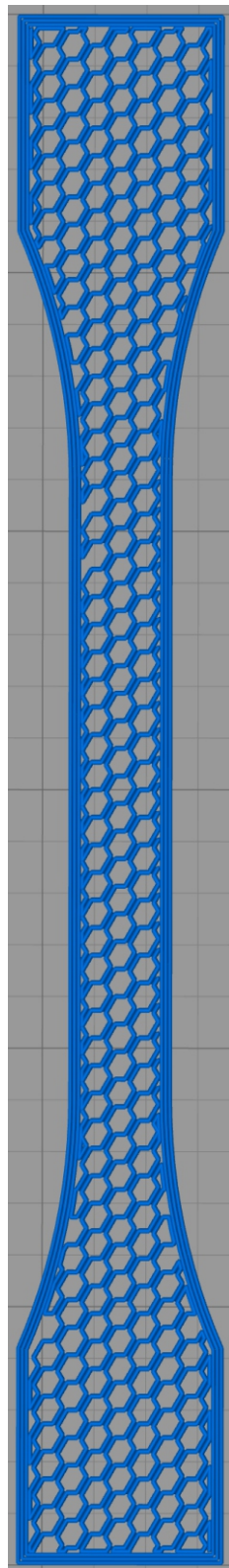
Z připraveného kódu je možné vypočítat odhad doby tisku a materiálovou náročnost. V tabulce 4.2 jsou uvedeny odhady doby tisku a spotřeba materiálu pro tahová zkušební tělesa. Výpočet je proveden během přípravy kódu softwarem Simplify3D.

Tabulka 4.2: Softwarově spočítaná náročnost tisku zkušebních těles pro zkoušku tahem (těleso typ 1B, dle normy ČSN EN ISO 527-2)

Vyplnění [%]	Hmotnost [g]	Tiskový čas [min]
Rectilinear 100	9,0	57
Rectilinear 75	8,0	54
Rectilinear 50	6,9	51
Rectilinear 25	5,9	47
Rectilinear 0	4,6	43
Honeycomb 75	7,5	53
Honeycomb 50	6,7	51
Honeycomb 25	5,9	48

4.4 Sady zkušebních těles

Pro testování bylo zkompletováno celkem 8 sad zkušebních těles. Každá sada představuje 15 tahových těles a 20 těles na ohyb a vrub. Příprava jedné sady těles zabere průměrně 21 hodin tisku. V tomto čase není započtena doba přípravy tiskárny a stabilizace dílu po tisku. Každé těleso v sadě je očíslováno, změřeno a zváženo. Vytištěná tělesa jsou uložena v uzavíratelném sáčku spolu s jedním sáčkem silikagelu pro udržení minimální vlhkosti v sáčku, až do provedení testů. Tělesa se skladovala v laboratoři s teplotou udržovanou v rozmezí 20–25 °C. Kompletní sada zkušebních těles je vyfotografována na obrázku 4.4. Rozměry a hmotnosti jednotlivých těles, rozdělených dle vnitřní, struktury jsou v příloze A.



G1 X118.830 Y45.018 E19.1152
G1 X119.658 Y43.583 E19.1996
G1 X119.177 Y42.749 E19.2486
G1 X120.092 Y41.166 E19.3417
G1 X121.054 Y41.166 E19.3907
G1 X121.968 Y39.583 E19.4839
G1 X121.487 Y38.749 E19.5329
G1 X122.401 Y37.166 E19.6260
G1 X123.363 Y37.166 E19.6750
G1 X124.277 Y35.583 E19.7681
G1 X123.796 Y34.749 E19.8171
G1 X124.710 Y33.166 E19.9102
G1 X125.673 Y33.166 E19.9592
G1 X126.587 Y31.583 E20.0523
G1 X126.106 Y30.749 E20.1013
G1 X127.020 Y29.166 E20.1945
G1 X127.982 Y29.166 E20.2435
G1 X128.176 Y28.830 E20.2632
G1 X126.537 Y28.830 E20.3467
G1 X126.587 Y28.916 E20.3517
G1 X125.673 Y30.499 E20.4448
G1 X124.710 Y30.499 E20.4939
G1 X123.796 Y32.083 E20.5870
G1 X124.277 Y32.916 E20.6360
G1 X123.363 Y34.499 E20.7291
G1 X122.401 Y34.499 E20.7781
G1 X121.487 Y36.083 E20.8712
G1 X121.968 Y36.916 E20.9202
G1 X121.054 Y38.499 E21.0133
G1 X120.092 Y38.499 E21.0623
G1 X119.177 Y40.083 E21.1555
G1 X119.658 Y40.916 E21.2045
G1 X118.830 Y42.351 E21.2888
G1 X118.830 Y39.684 E21.4247
G1 X119.659 Y38.249 E21.5090
G1 X119.177 Y37.416 E21.5581
G1 X120.092 Y35.833 E21.6512
G1 X121.054 Y35.833 E21.7002
G1 X121.968 Y34.249 E21.7933
G1 X121.487 Y33.416 E21.8423
G1 X122.401 Y31.833 E21.9354
G1 X123.363 Y31.833 E21.9844
G1 X124.277 Y30.249 E22.0775
G1 X123.796 Y29.416 E22.1265
G1 X124.135 Y28.830 E22.1610
G1 X123.557 Y28.830 E22.1904
G1 X123.363 Y29.166 E22.2102
G1 X122.401 Y29.166 E22.2592
G1 X121.487 Y30.749 E22.3523
G1 X121.968 Y31.583 E22.4013
G1 X121.054 Y33.166 E22.4944
G1 X120.092 Y33.166 E22.5434
G1 X119.177 Y34.749 E22.6365

Obrázek 4.3: Ukázka řídicího G-kódu



Obrázek 4.4: Jedna kompletní série zkušebních těles

5 Vyhodnocení testů a měření

Tato část práce se věnuje výsledkům z měření, jejich interpretaci a porovnání. Před vlastním porovnáním je provedeno statistické vyhodnocení dat za použití box-plot grafů. Pomocí těchto grafů je zjišťován a znázorněn rozptyl hodnot měření a jsou nalezeny odlehlé hodnoty. Odlehlé hodnoty následně nejsou zahrnuty do konečného vyhodnocení testů. Jako konečné vyhodnocení testů jsou voleny střední hodnoty a směrodatné odchylky dané veličiny.

Pro stanovení průřezových charakteristik zkušebních těles jsou brány pouze vnější rozměry těles. Vyhodnocení napjatostí je tedy prováděno bez ohledu na vnitřní strukturu.

5.1 Časová náročnost

Na úsporu času při výrobě je možné nahlížet z hlediska absolutního a relativního. Absolutní úspora je přímá časová úspora při výrobě dílu s odlehčením na rozdíl od plného dílu. Relativní časová úspora převádí úsporu do procent uspořenému času vůči plnému tělesu. Časové úspory jsou zobrazeny v tabulce: 5.1. Vyhodnoceny jsou pouze časy pro výrobu zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku (těleso typ 1B, dle normy ČSN EN ISO 527-2)

Tabulka 5.1: Časová náročnost výroby a úspora času odlehčením u zkušebních těles pro zkoušku tahem (těleso typ 1B, dle normy ČSN EN ISO 527-2)

Vyplnění [%]	Čas tisku [min]	Úspora času oproti Rectilinear 100%	
		Absolutní [min]	Relativní [%]
Rectilinear 100	57	0	0,00
Rectilinear 75	54	3	5,26
Rectilinear 50	51	6	10,53
Rectilinear 25	47	10	17,54
Rectilinear 0	4	14	24,56
Honeycomb 75	53	4	7,02
Honeycomb 50	51	6	10,53
Honeycomb 25	48	9	15,79

5.2 Materiálová náročnost

Na úsporu materiálu při výrobě je taktéž možné nahlížet z hlediska absolutního a relativního. Opět se úspora vyjádří jako rozdíl potřebného materiálu na tisk v porovnání s potřebným materiálem pro tisk plného tělesa. Materiálovou úsporu můžeme vyjádřit teoretickou (z vypočtených hodnot) a skutečnou (střední hodnota příslušných vyrobených těles). Teoretická úspora je zobrazena v tabulce 5.2, skutečná v tabulce 5.3. Vývoj hmotnosti u tělesa 1B, dle normy ČSN EN ISO 527-2 je zobrazen na obrázku 5.1 pro výplň typu rectilinear a na obrázku 5.2 pro výplň typu honeycomb. Dále je v tabulce 5.4 porovnána přesnost vypočtené a skutečné hmotnosti těles.

Tabulka 5.2: Teoretická úspora materiálu u zkušebních těles pro zkoušku tahem (těleso typ 1B, dle normy ČSN EN ISO 527-2)

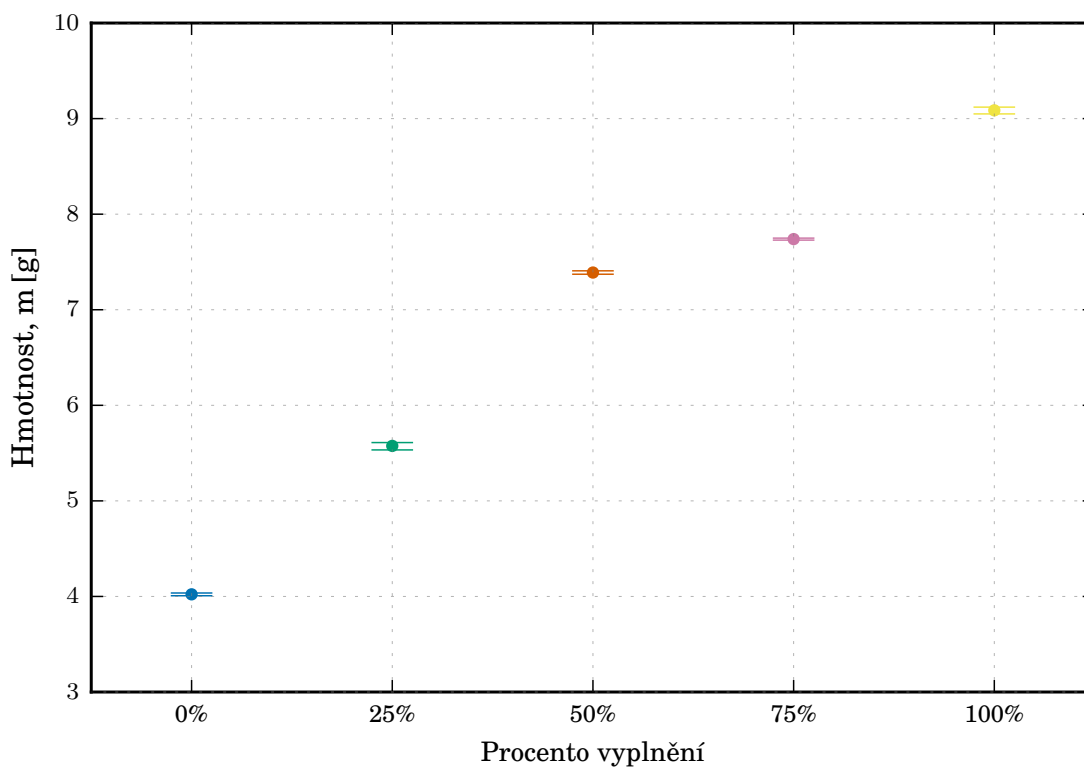
Vyplnění [%]	Hmotnost výpočet [g]	Úspora materiálu oproti Rectilinear 100 %	
		Absolutní [g]	Relativní [%]
Rectilinear 100	9,0	0,0	0,000
Rectilinear 75	8,0	1,0	11,111
Rectilinear 50	6,9	2,1	23,333
Rectilinear 25	5,9	3,1	34,444
Rectilinear 0	4,6	4,4	48,889
Honeycomb 75	7,5	1,5	16,667
Honeycomb 50	6,7	2,3	25,556
Honeycomb 25	5,9	3,1	34,444

Tabulka 5.3: Skutečná úspora materiálu u zkušebních těles pro zkoušku tahem (těleso typ 1B, dle normy ČSN EN ISO 527-2)

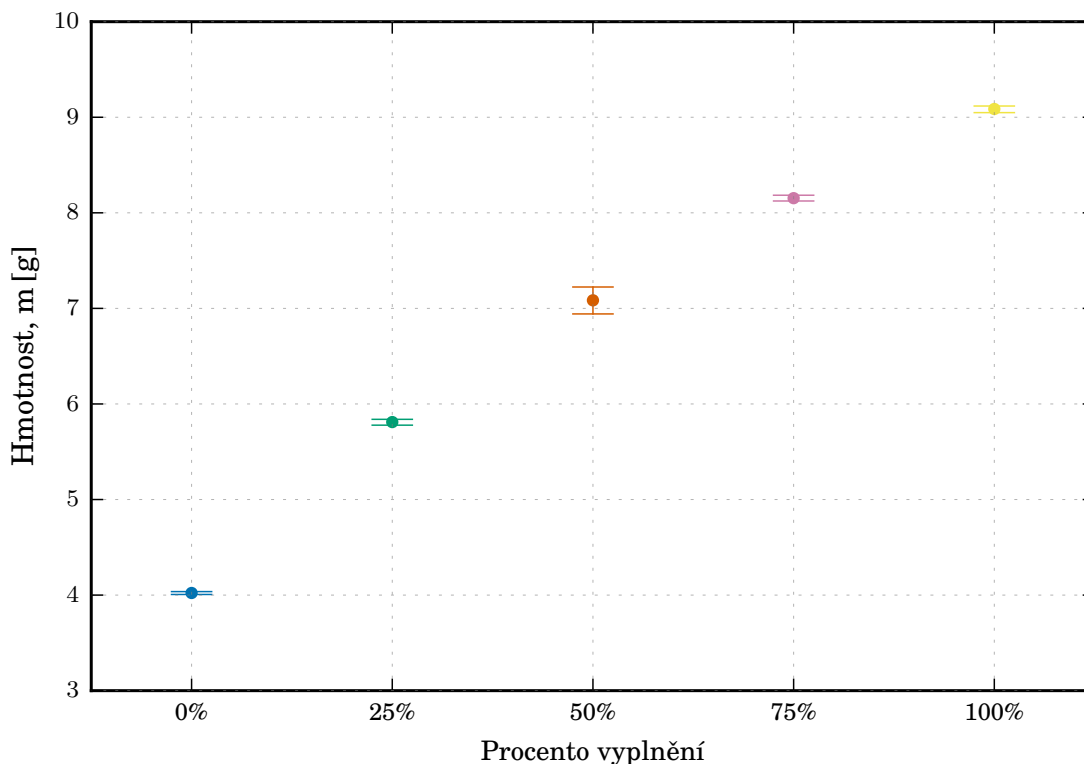
Vyplnění [%]	Hmotnost skutečná [g]	Úspora materiálu oproti Rectilinear 100 %	
		Absolutní [g]	Relativní [%]
Rectilinear 100	9,057	0,000	0,000
Rectilinear 75	7,739	1,318	14,552
Rectilinear 50	7,355	1,702	18,792
Rectilinear 25	5,575	3,482	38,445
Rectilinear 0	4,022	5,035	55,592
Honeycomb 75	8,112	0,945	10,434
Honeycomb 50	7,085	1,972	21,773
Honeycomb 25	5,810	3,247	35,851

Tabulka 5.4: Srovnání výpočtu hmotnosti s výtiskem u zkušebních těles pro zkoušku tahem (těleso typ 1B, dle normy ČSN EN ISO 527-2)

Vyplnění [%]	Hmotnost		Chyba výpočtu	
	Skutečná [g]	Výpočet [g]	[g]	[%]
Rectilinear 100	9,057	9	-0,057	-0,633
Rectilinear 75	7,739	8	0,261	3,263
Rectilinear 50	7,355	6,9	-0,455	-6,594
Rectilinear 25	5,575	5,9	0,325	5,508
Rectilinear 0	4,022	4,6	0,578	12,565
Honeycomb 75	8,112	7,5	-0,612	-8,160
Honeycomb 50	7,064	6,7	-0,364	-5,433
Honeycomb 25	5,81	5,9	0,090	1,525
Průměrná hodnota			0,343	5,460



Obrázek 5.1: Hmotnost zkušebního tělesa 1B, dle normy ČSN EN ISO 527-2 s výplní rectilinear



Obrázek 5.2: Hmotnost zkušební tělesa 1B, dle normy ČSN EN ISO 527-2 s výplní honeycomb, Hodnota 100 % zobrazuje Rectilinear 100 %

5.3 Tahové vlastnosti

Tahovou zkouškou byly zjišťovány základní vlastnosti v tahu:

- Modul pružnosti v tahu (E)
- Mez pevnosti v tahu (σ)
- Deformaci na mezi pevnosti (ϵ).

Měření modulu pružnosti probíhalo v elastické oblasti chování materiálu. Během měření nebyl zničen žádný ze vzorků, všechna data jsou tedy korektní a lze je zpracovávat. Vyhodnocení modulu pružnosti proběhlo v rámci samotného měření na univerzálním trhacím stroji. Data z měření jsou uvedena v příloze A.

Během měření meze pevnosti a příslušné deformace se u 2 z celkem 120 měřených vzorků vyskytla chyba. Vzorek Rectilinear 100 % číslo 1 byl v důsledku přílišné upínací síly rozdrčen v upínací oblasti (obrázek 5.3). Toto měření bylo nutné vyloučit z konečného vyhodnocení. Vzorek Honeycomb 25 % číslo 1 během měření vyklouzl ze sevření extensometru a měření tak bylo ukončeno s chybou. V důsledku přetržení vzorku během chybného měření nebylo možné měření opakovat a vzorek byl z vyhodnocení také vyloučen. Zbývajících 118 vzorků bylo naměřeno korektně a jsou vyhodnoceny. Výsledky měření jednotlivých vzorků jsou uvedeny v příloze A.



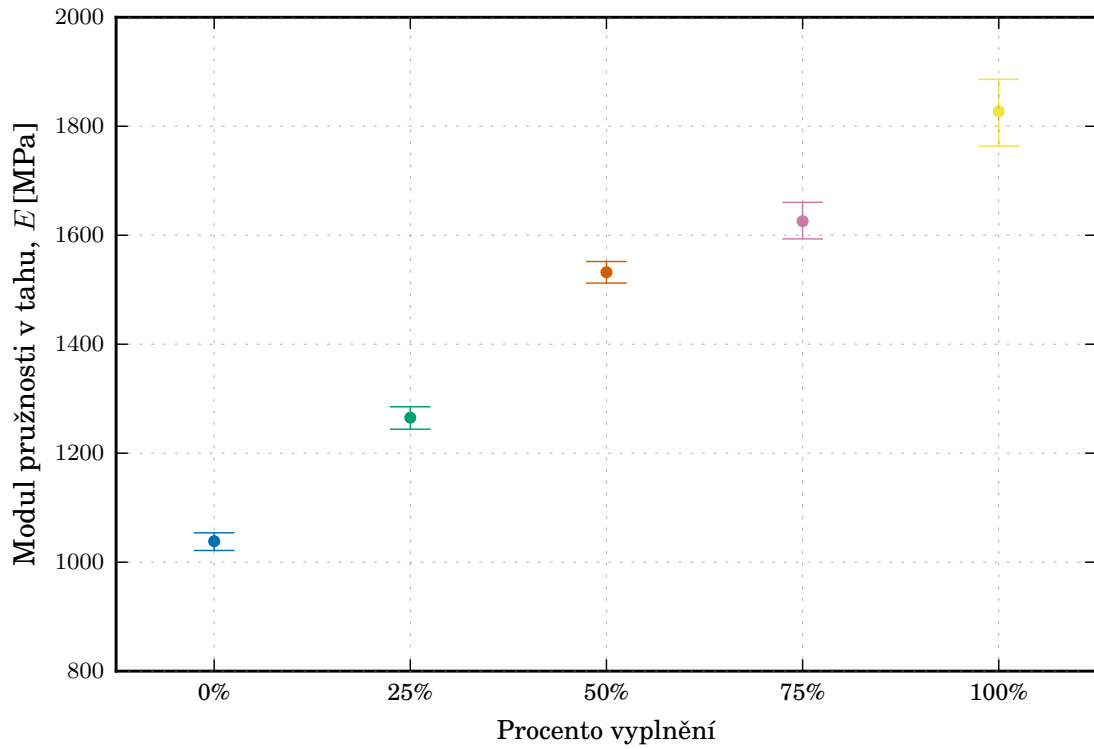
Obrázek 5.3: Těleso číslo 1 rectilinear 100% rozdrcená upínací část

Z naměřených dat byly sestaveny box-plot grafy (příloha B) a podle výsledků byly vyloučeny odlehle hodnoty z vyhodnocení střední hodnoty a směrodatné odchylky. Tímto krokem byla zajištěna vyšší přesnost při konečném vyhodnocení. Vyřazené hodnoty jsou u jednotlivých sérií zvýrazněny v příloze A. Shrnuté průměrné vlastnosti struktur jsou v tabulce 5.5. Průběhy mechanických vlastností v tahu se závislostí na výplni jsou zobrazeny v obrázcích 5.4 až 5.9.

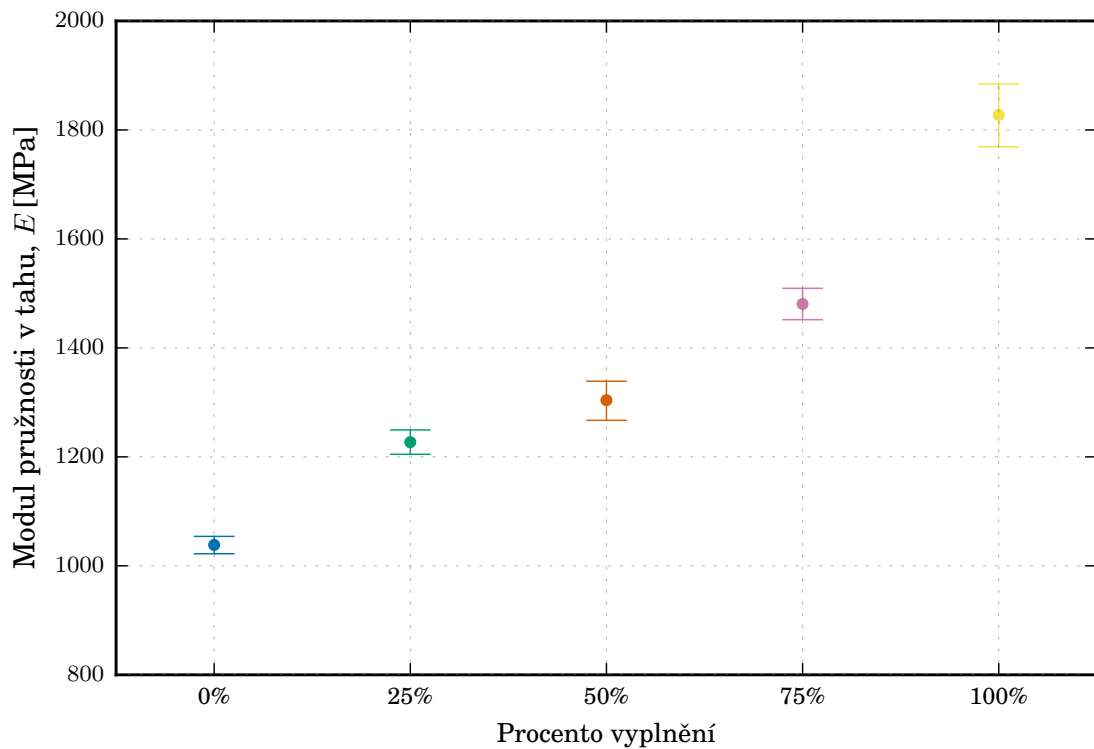
Tabulka 5.5: Tahové vlastnosti výplňových struktur

m hmotnost; E modul pružnosti v tahu; R_m Smluvní napětí na mezi pevnosti; ϵ_m poměrné prodloužení na mezi pevnosti

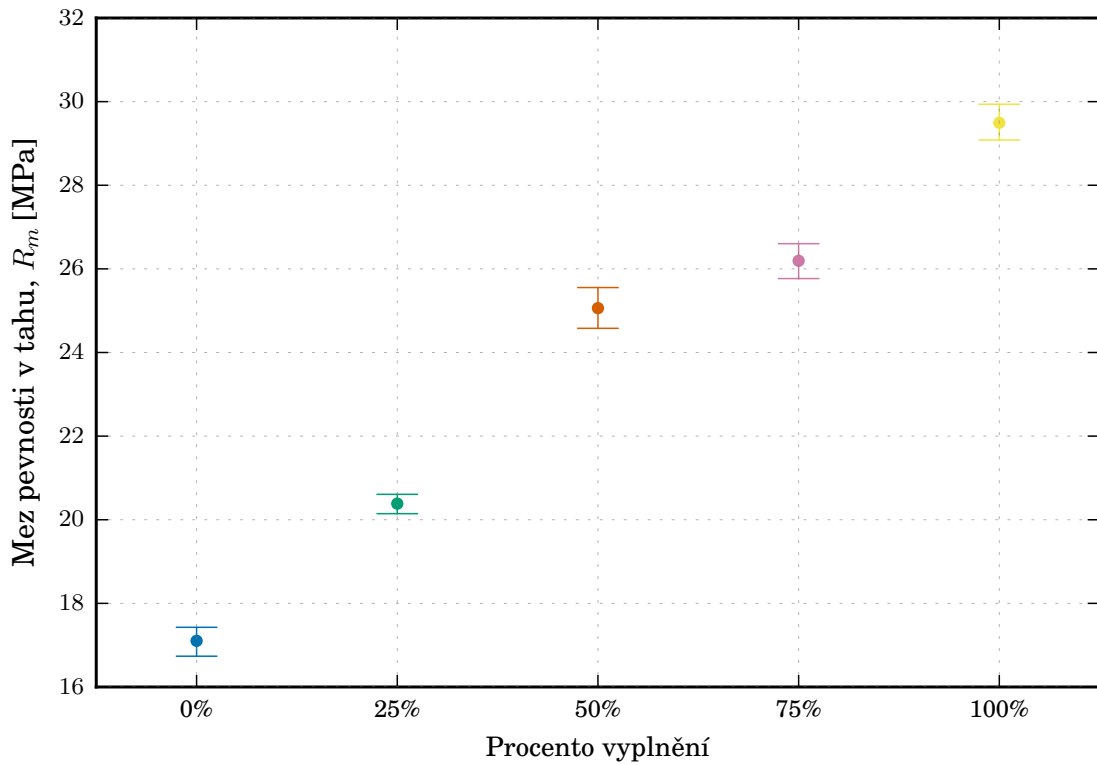
Vyplnění [%]	m [g]	E [MPa]	R_m [MPa]	ϵ_m [%]
Rectilinear 0	$4,022 \pm 0,029$	$1038,39 \pm 31,38$	$17,103 \pm 0,660$	$2,275 \pm 0,031$
Rectilinear 25	$5,575 \pm 0,075$	$1265,18 \pm 42,75$	$20,385 \pm 0,475$	$2,198 \pm 0,028$
Rectilinear 50	$7,355 \pm 0,101$	$1532,11 \pm 41,53$	$25,061 \pm 0,968$	$2,252 \pm 0,021$
Rectilinear 75	$7,739 \pm 0,022$	$1625,78 \pm 66,35$	$26,193 \pm 0,842$	$2,335 \pm 0,037$
Rectilinear 100	$9,057 \pm 0,127$	$1827,50 \pm 118,42$	$29,493 \pm 0,823$	$2,334 \pm 0,055$
Honeycomb 25	$5,810 \pm 0,064$	$1226,98 \pm 41,46$	$21,109 \pm 0,541$	$2,317 \pm 0,045$
Honeycomb 50	$7,085 \pm 0,281$	$1303,98 \pm 70,24$	$20,545 \pm 0,619$	$2,238 \pm 0,063$
Honeycomb 75	$8,112 \pm 0,168$	$1480,59 \pm 53,94$	$22,789 \pm 0,805$	$2,237 \pm 0,041$



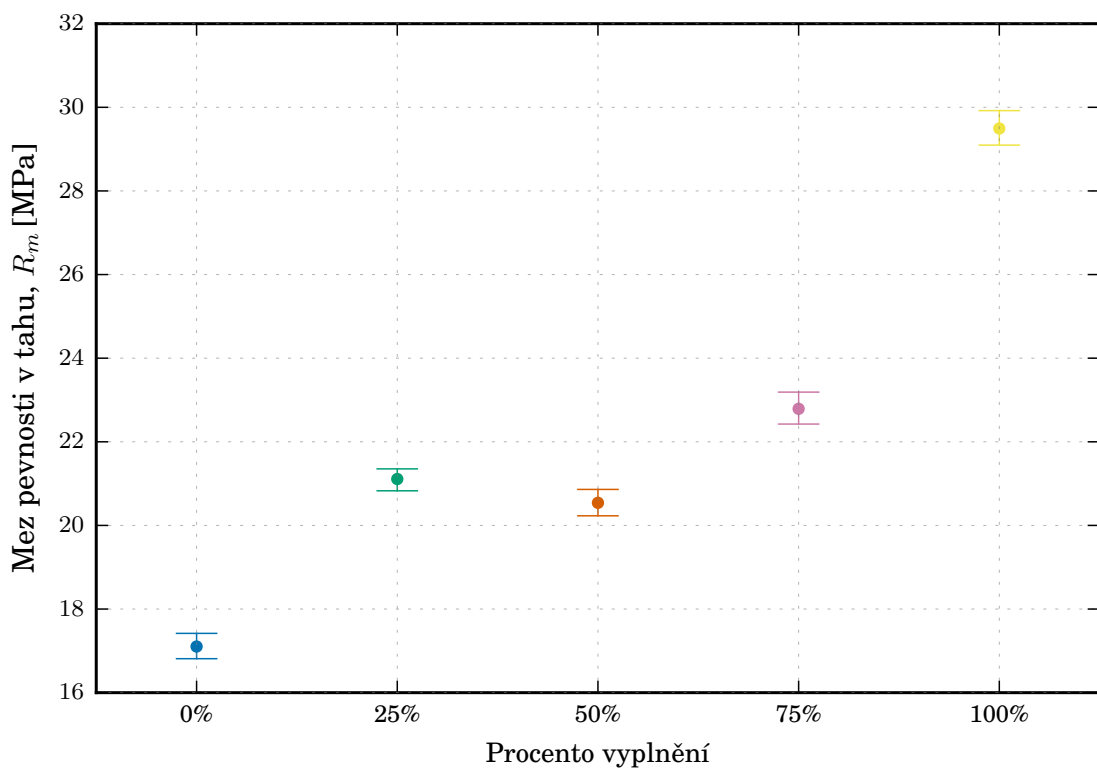
Obrázek 5.4: Modul pružnosti E [MPa] struktur Rectilinear



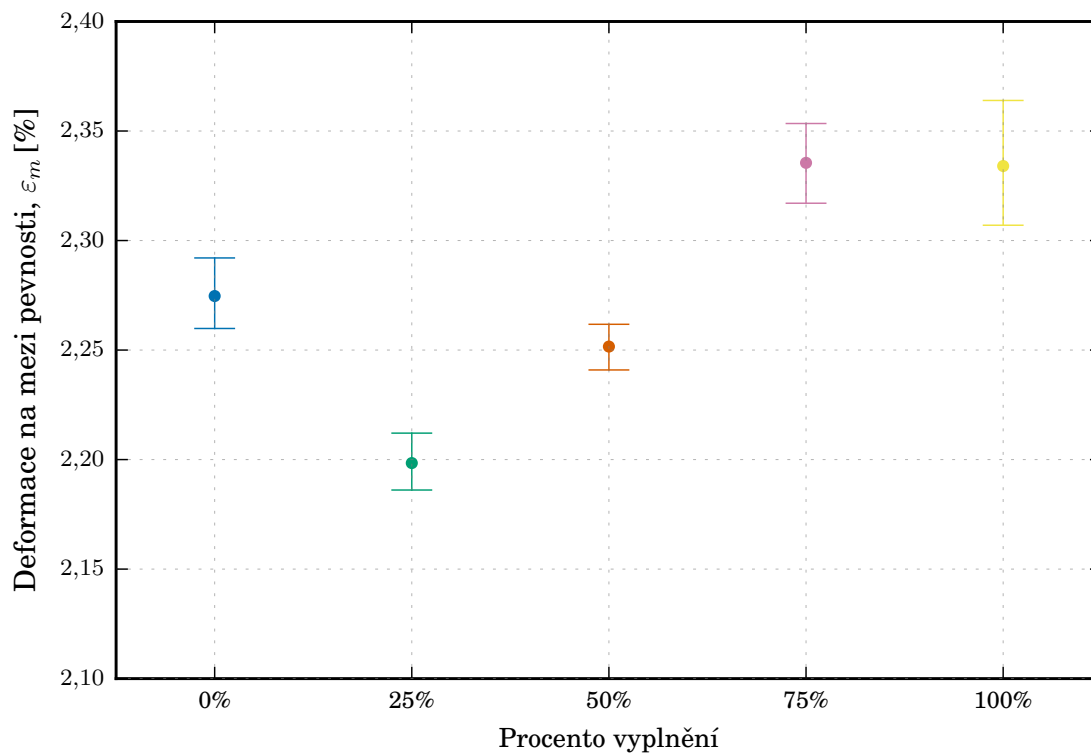
Obrázek 5.5: Modul pružnosti E [MPa] struktur Honeycomb, Hodnota 100% zobrazuje Rectilinear 100%



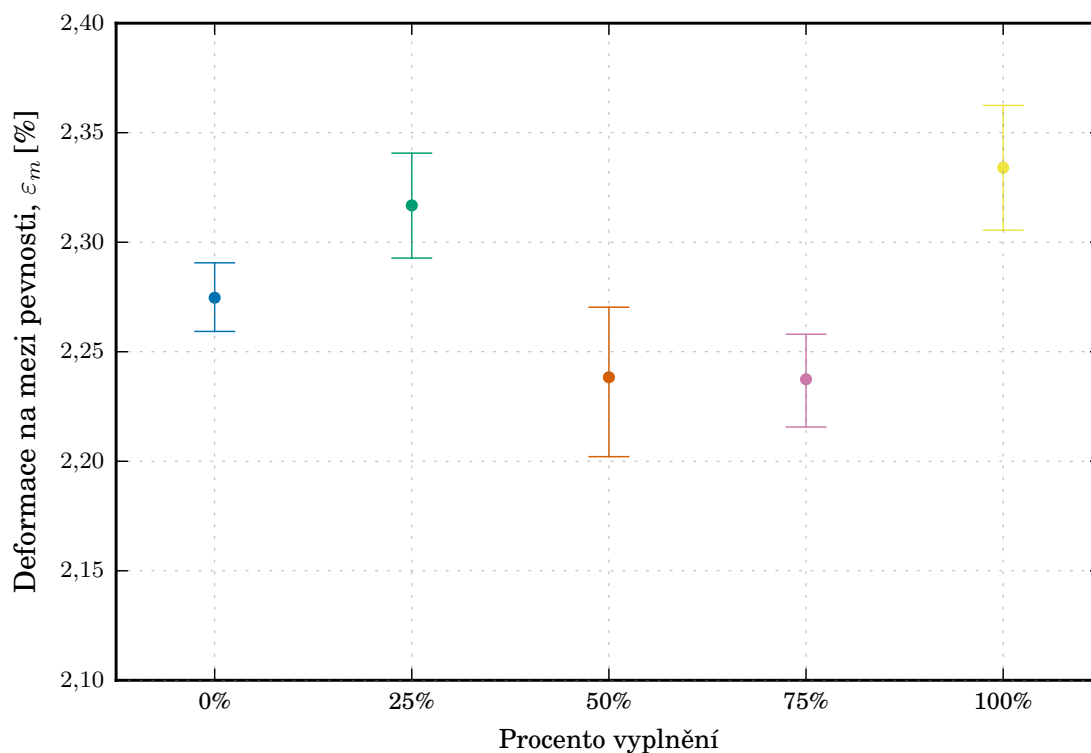
Obrázek 5.6: Smluvní napětí na mezi pevnosti R_m [MPa] struktur Rectilinear



Obrázek 5.7: Smluvní napětí na mezi pevnosti R_m [MPa] struktur Honeycomb, Hodnota 100 % zobrazuje Rectilinear 100 %



Obrázek 5.8: Poměrné prodloužení na mezi pevnosti ϵ_m [MPa] struktur Rectilinear



Obrázek 5.9: Poměrné prodloužení na mezi pevnosti ϵ_m [MPa] struktur Honeycomb, Hodnota 100 % zobrazuje Rectilinear 100 %

5.4 Ohybové vlastnosti

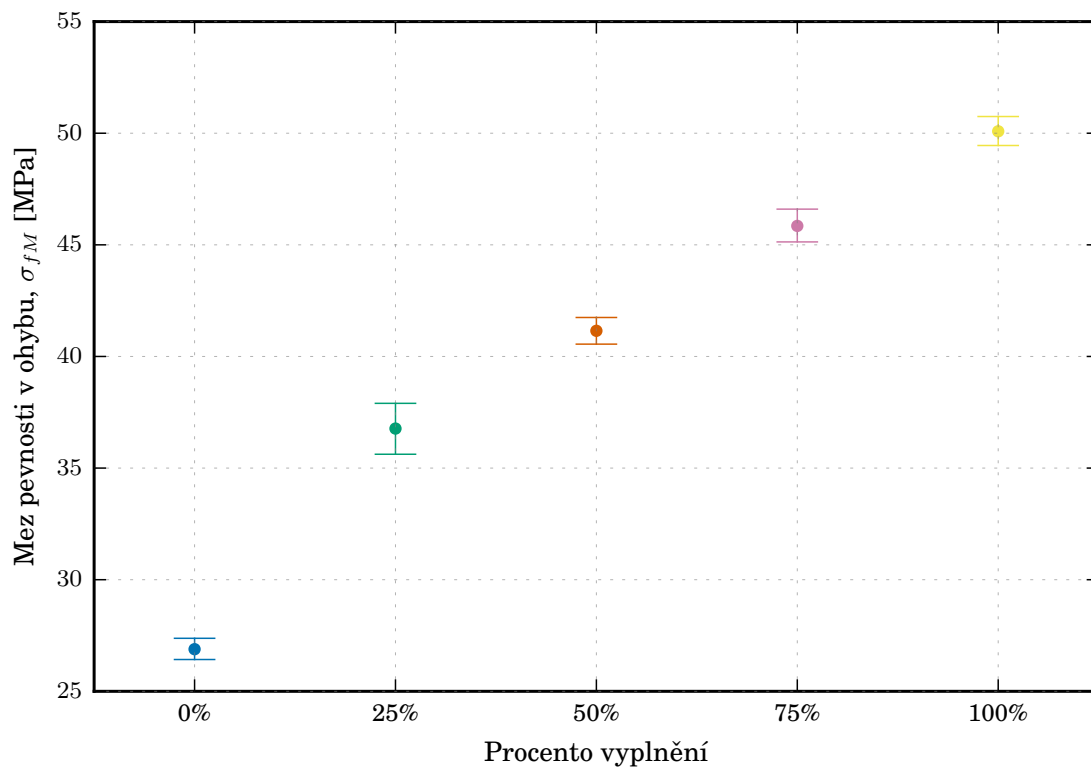
Při destruktivním měření ohybových vlastností bylo vyhodnocováno pouze napětí na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} . Měření proběhlo na celkem osmdesáti vzorcích a u všech bezchybně. Všechna naměřená data byla tedy korektní a použitelná pro vyhodnocení. Z měřených dat byl opět sestaven box-plot graf (příloha B) a odlehle hodnoty byly vyřazeny z dalšího zpracování. Naměřená data jsou uvedena v příloze A s vyznačením odlehlých hodnot. Průměrné hodnoty napětí na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} jsou shrnuty v tabulce 5.6 spolu s rázovou houževnatostí a_{cU} . Průběhy napětí na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} se závislostí na výplni jsou zobrazeny v grafech obrázek: 5.10 a obrázek 5.11

5.5 Rázová houževnatost

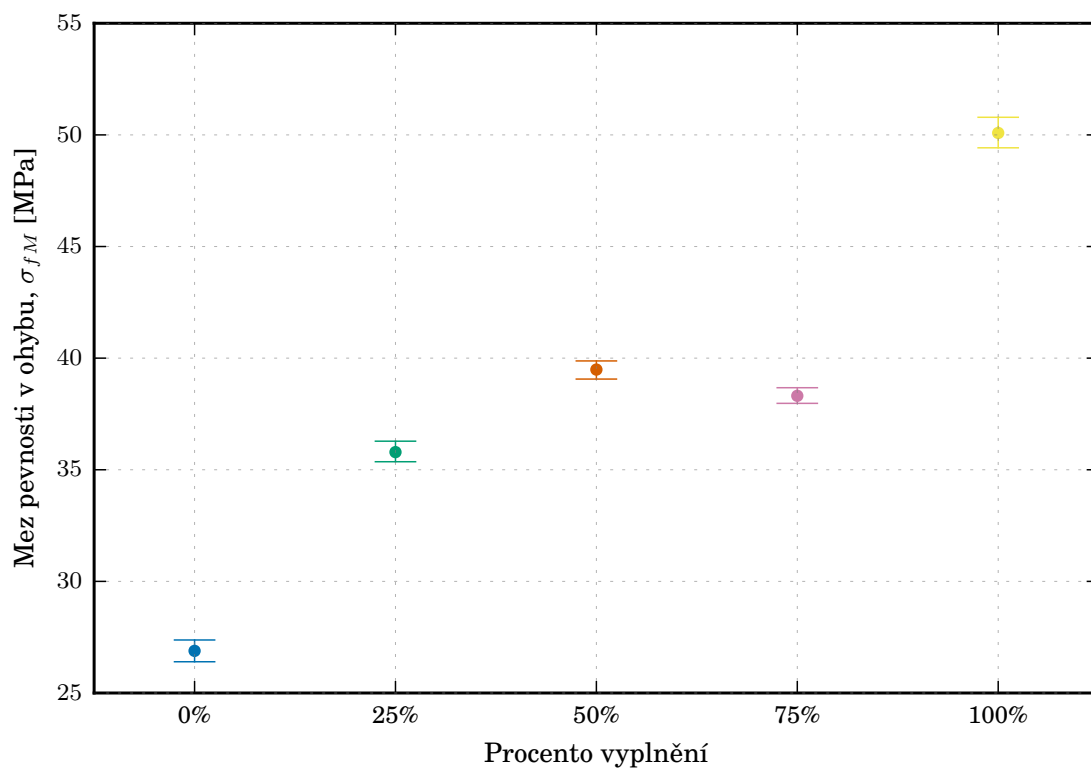
Tělesa při rázové zkoušce byla přerážena v přibližném středu vzorku. Zkouškou byla získána zmařená energie při přerážení tělesa. Po přepočtení získáme rázovou houževnatost, dle Charpyho a_{cU} . Ztrátová energie a rázová houževnatost jsou uvedeny v tabulkách v příloze: A. V porovnání s ostatními měřeními zobrazuje box-plot graf z dat rázové houževnatosti (příloha B) výrazně vyšší rozptyl hodnot. Z důvodu takto neobvykle velkého rozptylu hodnot nebyly z konečného vyhodnocení vyřazeny odlehlé hodnoty. Průměrné hodnoty rázové houževnatosti a_{cU} jsou shrnuty v tabulce 5.6, spolu s napětím na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} . Průběhy rázové houževnatosti a_{cU} se závislostí na výplni jsou zobrazeny na obrázcích 5.12 a 5.13.

Tabulka 5.6: Rázové a ohybové vlastnosti výplňových struktur m hmotnost; a_{cU} Rázová houževnatost Charpy; σ_{fM} Napětí na mezi pevnosti v ohybu

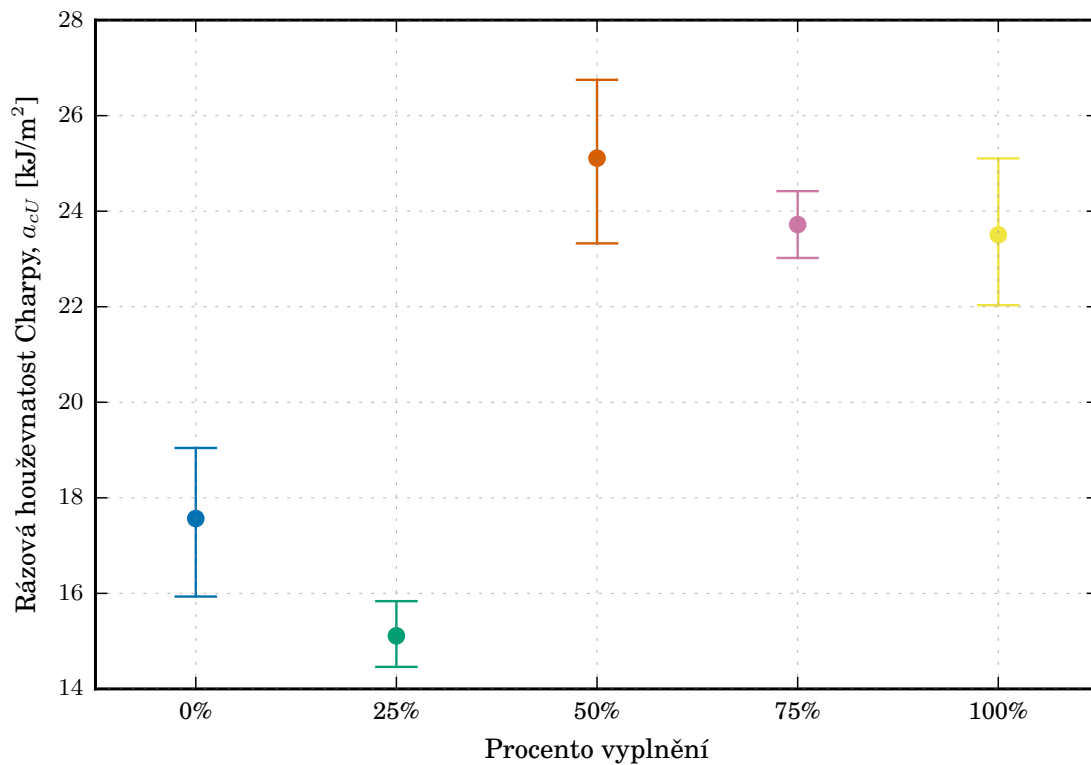
Výplnění [%]	m [g]	a_{cU} [kJm^{-2}]	σ_{fM} [MPa]
Rectilinear 0	$1,678 \pm 0,011$	$17,566 \pm 2,683$	$26,887 \pm 0,759$
Rectilinear 25	$2,192 \pm 0,104$	$15,111 \pm 1,204$	$36,770 \pm 1,969$
Rectilinear 50	$2,668 \pm 0,153$	$25,110 \pm 2,811$	$41,149 \pm 0,982$
Rectilinear 75	$3,022 \pm 0,011$	$23,719 \pm 1,198$	$45,848 \pm 1,313$
Rectilinear 100	$3,519 \pm 0,053$	$23,504 \pm 2,513$	$50,087 \pm 1,189$
Honeycomb 25	$2,411 \pm 0,024$	$21,519 \pm 2,207$	$35,790 \pm 0,829$
Honeycomb 50	$2,689 \pm 0,033$	$15,983 \pm 2,567$	$39,488 \pm 0,636$
Honeycomb 75	$2,773 \pm 0,250$	$19,213 \pm 3,470$	$38,312 \pm 0,528$



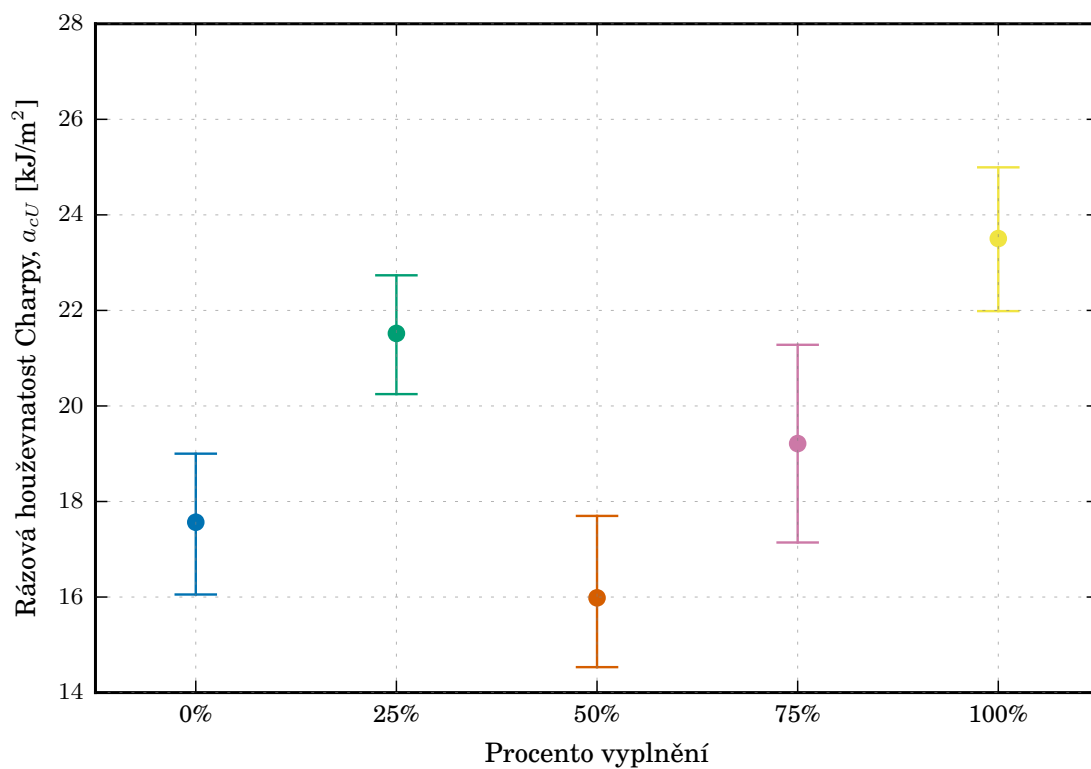
Obrázek 5.10: Napětí na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} [MPa] struktur Rectilinear



Obrázek 5.11: Napětí na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} [MPa] struktur Honeycomb, Hodnota 100 % zobrazuje Rectilinear 100 %



Obrázek 5.12: Rázová houževnatost a_{cU} [kJm⁻²] struktur Rectilinear



Obrázek 5.13: Rázová houževnatost a_{cU} [kJm⁻²]struktur Honeycomb, Hodnota 100 % zobrazuje Rectilinear 100 %

6 Zhodnocení výsledků měření

Pro vytváření vnitřních odlehčovacích struktur je možno použít mnoho různých přístupů a stylů. Z těchto stylů byly zvoleny dva – rectilinear a honeycomb. Jako testované zaplnění jader těles byly použity dvě referenční hodnoty 0 % a 100 % stylu rectilinear a 25 %, 50 %, 75 % u každé výplně. Rectilinear 100 % je považováno za těleso zcela plné. Těleso s výplní 0 % je zcela duté a jedná se pouze o vnější obálku. Z naměřených hodnot pro oba zvolené styly (rectilinear a honeycomb), je možné vyvodit, že odlehčení ovlivňuje mechanické vlastnosti negativně (snížení hodnot mechanických vlastností). Ovšem hmotnost a časová náročnost výtisku klesá.

U časové a materiálové náročnosti je u obou použitých struktur přibližně stejná úspora. Rozdíl v úspoře při shodné hodnotě zaplnění je pouze v minutách, respektive v gramech (relativně v jednotkách procent) a tedy z tohoto hlediska není mezi strukturami výrazný rozdíl. Vyčíslená časová úspora je zobrazena v tabulce 5.1 a materiálová úspora je vyčíslena v tabulce 5.2 a 5.3. Úspora času a materiálu je tedy výrazně závislá pouze na procentuálním zaplnění jádra dílu. Zvolený typ struktury ovlivňuje úsporu pouze minimálně. Tento poznatek platí pro díly srovnatelné velikosti, porovnání nebylo provedeno pro objemnější a složitější díly.

Mechanické vlastnosti obou struktur se od sebe liší již významně z pohledu, jak číselných hodnot, tak z pohledu jistého trendu, v závislosti na zaplnění. Přesně vyčíslené a graficky znázorněné hodnoty jsou v kapitole 5.

Pro strukturu rectilinear se modul pružnosti E , mez pevnosti v tahu R_m a mez pevnosti v ohybu σ_{fM} mění při snižování zaplnění jádra přibližně lineárně (viz obrázky 5.4, 5.6, 5.10). Pouze při vyplnění 0 % dochází ke skokovému snížení hodnoty u napětí na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} .

Pro strukturu honeycomb se hodnoty mechanických vlastností již chovají rozdílně. Přibližně lineární průběh má pouze modul pružnosti v tahu E (obrázek 5.5). Pro mez pevnosti v tahu je u 50% zaplnění propad hodnoty oproti 25% zaplnění. Tento propad je ovšem znovu vyrovnán nárůstem pevnosti při zaplnění 75 % (obrázek 5.7). Pro mez pevnosti v ohybu je ovšem vývoj opačný a je viditelný nárůst pevnosti při míře zaplnění 50 % oproti 25 % a 75 % (obrázek 5.11). Ovšem při porovnání se strukturou rectilinear zůstává pevnost v ohybu značně níže.

Pro deformaci na mezi pevnosti ε_m není trend zcela patrný u obou stylů výplně. Jako referenční bod vezmeme vyplnění 0 %. U stylu vyplnění rectilinear dochází při zvyšování 25% vyplnění dochází k poklesu deformace (struktura se stává křehčí) a s dalším zvyšováním míry vyplnění dochází ke zvyšování tažnosti (obrázek 5.8). Pokud se stejným způsobem podíváme na strukturu honeycomb, můžeme sledovat opačný trend než u výplně typu rectilinear (obrázek 5.9).

Výsledky rázové houževnatosti jsou značně nevyrovnané a nemají žádný výsledný trend. S ohledem na výsledky je možné diskutovat o příčinách sledovaného rozptylu hodnot měření. Jedním z možných aspektů je náhodnost přesné polohy bodu dopadu břitů kladiva na zkušební těleso během zkoušky. Pro její zpřesnění by musela rázová zkouška probíhat s vysokou precizností a přesností měření, včetně přípravy vzorků.

7 Závěr

Tato práce se zabývala určováním mechanických vlastností dílů s řízenou vnitřní odlehčenou strukturou typu rectilinear a honeycomb. V rámci práce byly vytištěny sady vzorků technologií FFF a následně došlo k otestování vytipovaných mechanických veličin. Z uvedených výsledků lze vyvodit následující závěry:

1. Data prokazují výraznou úsporu času stavby a materiálu při snižující se míře vnitřní výplně. Z hlediska časové a materiálové náročnosti není žádný podstatný rozdíl mezi jednotlivými strukturami.
2. Výhodněji po stránce mechanických vlastností vychází struktura rectilinear se svou vyšší pevností v tahu a ohybu oproti struktuře honeycomb. Struktura rectilinear se též chová lineárněji a je tak snazší odhad jejích vlastností. Je, ale nutné podotknout, že struktury byly testovány pouze v jednom směru a výsledné hodnoty by se mohly lišit v různých směrech zatěžování.
3. Vzhledem k tomu, že pro testování odlehčených struktur připravených pomocí aditivních technologií neexistuje jednotná norma, byly testy provedeny, dle standardů pro vstříkované díly. Tento přístup se ukázal nevhodný zejména v případě rázových testů, kde pravděpodobně docházelo ke značnému zkreslení výsledků vlivem nepřesné polohy dopadu kladiva.

Literatura

- [1] BAGSIK, A., JOSUPEIT, S., SCHOEPPNER, V., AND KLEMP, E. Mechanical analysis of lightweight constructions manufactured with fused deposition modeling. In *AIP Conference Proceedings* (2014), vol. 1593, AIP, pp. 696–701.
- [2] BĚHÁLEK, L. Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání. <https://publi.cz/books/180/09.html>, 15.04.2018. Online.
- [3] CHUA, C. K., LEONG, K. F., AND LIM, C. S. *Rapid Prototyping: Principles and Applications (with Companion CD-ROM)*. World Scientific Publishing Company, 2010. ISBN: 9812778977.
- [4] ES-SAID, O., FOYOS, J., NOORANI, R., MENDELSON, M., MARLOTH, R., AND PREGGER, B. Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Materials and Manufacturing Processes* 15, 1 (2000), 107–122.
- [5] FELIXPRINTERS. Felix tec4. https://www.felixprinters.com/felix-tec-4#product_tabs_description_tabbed, 04.03.2018. Online.
- [6] IAN GIBSON, DAVID ROSEN, B. S. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer, 2015. ISBN: 9781493921126.
- [7] PRUSA RESEARCH. 3d tiskárna original prusa i3 mk2s. <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/53-3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk2s.html>, 14.02.2018. Online.
- [8] REPRAPWIKI. Fused filament fabrication. <https://reprap.org/wiki/RepRap>, 12.02.2018. Online.
- [9] REZAYAT, H., ZHOU, W., SIRIRUK, A., PENUMADU, D., AND BABU, S. Structure–mechanical property relationship in fused deposition modelling. *Materials Science and Technology* 31, 8 (2015), 895–903.
- [10] STRATASYS. Materials for fdm process. <http://www.stratasys.com/materials/search?sortIndex=0>, 11.02.2018. Online.
- [11] WOHLERS, T., AND GORNET, T. History of additive manufacturing. *Wohlers report* 24, 2014 (2014), 118.

A Měřené hodnoty

V této příloze jsou uvedeny tabulky s měřenými hodnotami u zkušebních těles. Tabulky uvádějí stanovované hodnoty pro každý vzorek testovací série. Hodnoty vyřazené z celkového zhodnocení výsledné hodnoty středního průměru a směrodatné odchylky jsou v tabulkách vyznačeny červeně.

Tabulka A.1: Tahové vlastnosti vzorků Rectilinear 0 %

m hmotnost; a,b příčné rozměry; E modul pružnosti v tahu; R_m Smluvní napětí na mezi pevnosti; ϵ_m poměrné prodloužení na mezi pevnosti

Vzorek č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E [MPa]	R_m [MPa]	ϵ_m [%]
1	10,10	4,06	4,031	1033,17	16,564	2,270
2	10,05	4,03	3,985	907,91	16,230	2,275
3	10,07	3,99	4,048	1045,97	17,554	2,307
4	10,12	3,91	4,021	1083,19	17,608	2,227
5	10,10	4,06	4,017	1001,46	15,944	2,332
6	10,05	3,96	4,016	1024,10	17,358	2,310
7	10,08	4,04	3,964	1040,98	15,937	2,248
8	10,11	3,90	4,043	1056,86	17,564	2,282
9	10,10	4,02	4,059	1006,77	17,070	2,245
10	10,08	4,08	4,016	980,90	16,738	2,224
11	10,07	4,01	4,039	1027,87	17,539	2,312
12	10,10	3,93	3,984	1016,22	17,444	2,244
13	10,12	3,90	4,052	1066,55	17,896	2,290
14	10,08	3,95	4,061	1085,65	17,821	2,267
15	10,11	3,91	3,995	1067,72	17,274	2,279
Průměrná hodnota			4,022	1038,39	17,103	2,275
Směrodatná odchylka			0,029	31,38	0,660	0,031

Tabulka A.2: Tahové vlastnosti vzorků Rectilinear 25 %

m hmotnost; a,b příčné rozměry; E modul pružnosti v tahu; R_m Smluvní napětí na mezi pevnosti; ϵ_m poměrné prodloužení na mezi pevnosti

Vzorek č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E [MPa]	R_m [MPa]	ϵ_m [%]
1	10,14	4,33	5,643	1304,18	20,274	2,190
2	10,18	4,30	5,587	1249,51	19,941	2,222
3	10,18	4,29	5,622	1310,59	20,615	2,196
4	10,19	4,39	5,632	1283,73	20,101	2,155
5	10,16	4,20	5,498	1237,41	20,957	2,184
6	10,19	4,34	5,662	1292,19	20,109	2,177
7	10,19	4,30	5,658	1302,38	20,856	2,209
8	10,19	4,37	5,609	1180,94	19,645	2,231
9	10,19	4,30	5,576	1285,41	20,432	2,230
10	10,18	4,42	5,645	1247,93	19,387	2,219
11	10,17	4,30	5,595	1231,54	20,547	2,217
12	10,17	4,28	5,493	1206,97	20,526	2,154
13	10,17	4,19	5,435	1304,70	20,742	2,166
14	10,19	4,18	5,481	1222,18	20,615	2,184
15	10,18	4,13	5,492	1318,03	21,029	2,234
Průměrná hodnota			5,575	1265,18	20,385	2,198
Směrodatná odchylka			0,075	42,75	0,475	0,028

Tabulka A.3: Tahové vlastnosti vzorků Rectilinear 50%

m hmotnost; a,b příčné rozměry; E modul pružnosti v tahu; R_m Smluvní napětí na mezi pevnosti; ϵ_m poměrné prodloužení na mezi pevnosti

Vzorek č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E [MPa]	R_m [MPa]	ϵ_m [%]
1	10,35	4,40	7,379	1539,45	25,900	2,214
2	10,32	4,34	7,219	1517,16	25,792	2,234
3	10,29	4,34	7,345	1653,59	26,739	2,286
4	10,41	4,55	7,400	1502,51	24,015	2,253
5	10,41	4,46	7,401	1553,10	25,246	2,232
6	10,42	4,50	7,385	1466,20	24,593	2,246
7	10,33	4,37	7,350	1612,10	26,192	2,217
8	10,37	4,55	7,427	1501,77	23,654	2,241
9	10,38	4,36	7,442	1607,20	25,834	2,261
10	10,44	4,46	7,389	1538,53	25,031	2,246
11	10,40	4,55	7,433	1510,85	23,435	2,268
12	10,26	4,28	7,045	1495,05	25,437	2,263
13	10,38	4,51	7,400	1530,80	24,543	2,263
14	10,35	4,42	7,328	1565,70	25,299	2,274
15	10,38	4,52	7,382	1509,07	24,196	2,270
Průměrná hodnota			7,355	1532,11	25,061	2,252
Směrodatná odchylka			0,101	41,53	0,968	0,021

Tabulka A.4: Tahové vlastnosti vzorků Rectilinear 75 %

m hmotnost; a,b příčné rozměry; E modul pružnosti v tahu; R_m Smluvní napětí na mezi pevnosti; ϵ_m poměrné prodloužení na mezi pevnosti

Vzorek č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E [MPa]	R_m [MPa]	ϵ_m [%]
1	10,23	4,28	7,748	1621,39	27,048	2,358
2	10,16	4,26	7,711	1612,85	26,806	2,359
3	10,18	4,30	7,748	1678,61	26,376	2,322
4	10,18	4,35	7,767	1519,41	25,461	2,379
5	10,15	4,33	7,746	1563,16	25,879	2,339
6	10,14	4,33	7,704	1558,33	25,465	2,412
7	10,26	4,42	7,771	1713,97	24,835	2,292
8	10,19	4,29	7,753	1685,90	26,755	2,320
9	10,17	4,31	7,751	1657,18	25,838	2,321
10	10,15	4,25	7,706	1583,46	26,612	2,297
11	10,15	4,35	7,733	1617,83	25,277	2,313
12	10,18	4,25	7,768	1727,11	27,663	2,321
13	10,16	4,27	7,720	1696,26	26,729	2,299
14	10,14	4,25	7,730	1622,39	27,034	2,298
15	10,18	4,36	7,734	1528,92	25,116	2,394
Průměrná hodnota			7,739	1625,78	26,193	2,335
Směrodatná odchylka			0,022	66,35	0,842	0,037

Tabulka A.5: Tahové vlastnosti vzorků Rectilinear 100 %
 m hmotnost; a,b příčné rozměry; E modul pružnosti v tahu; R_m Smluvní napětí na
 mezi pevnosti; ϵ_m poměrné prodloužení na mezi pevnosti

Vzorek č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E [MPa]	R_m [MPa]	ϵ_m [%]
2	10,30	4,74	9,010	1975,95	29,2852	2,5448
3	10,29	4,76	8,946	1730,00	29,096	2,272
4	10,33	4,81	9,138	1958,80	30,036	2,407
5	10,31	4,82	9,132	1959,69	30,772	2,302
6	10,37	4,82	9,166	1886,32	29,851	2,393
7	10,24	4,73	8,673	1612,71	27,046	2,399
8	10,32	4,86	9,137	1735,32	28,905	2,355
9	10,32	4,91	9,120	1680,04	28,541	2,307
10	10,31	4,89	9,146	1729,08	28,855	2,336
11	10,26	4,79	9,091	1814,66	30,067	2,403
12	10,32	4,83	9,054	1859,84	29,123	2,288
13	10,26	4,74	9,056	1986,48	31,172	2,236
14	10,29	4,82	9,011	1832,28	29,084	2,317
15	10,34	4,90	9,117	1823,68	28,623	2,322
Průměrná hodnota			9,057	1827,50	29,493	2,334
Směrodatná odchylka			0,127	118,42	0,823	0,055

Tabulka A.6: Tahové vlastnosti vzorků Honeycomb 25 %
 m hmotnost; a,b příčné rozměry; E modul pružnosti v tahu; R_m Smluvní napětí na
 mezi pevnosti; ϵ_m poměrné prodloužení na mezi pevnosti

Vzorek č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E [MPa]	R_m [MPa]	ϵ_m [%]
1	10,28	4,67	5,817	1219,95	21,309	2,348
2	10,28	4,63	5,707	1272,22	21,710	2,252
3	10,30	4,71	5,870	1294,39	21,439	2,337
4	10,32	4,79	5,868	1237,30	19,885	2,347
5	10,29	4,63	5,803	1239,68	21,637	2,253
6	10,24	4,68	5,795	1277,95	21,550	2,335
7	10,26	4,71	5,820	1206,14	20,858	2,373
8	10,28	4,67	5,853	1280,45	21,211	2,412
9	10,33	4,66	5,843	1223,39	21,578	2,247
10	10,34	4,76	5,878	1181,28	20,760	2,343
11	10,29	4,73	5,859	1183,39	21,124	2,301
12	10,24	4,66	5,734	1164,93	20,884	2,246
13	10,33	4,75	5,880	1193,11	21,363	2,318
14	10,28	4,72	5,713	1203,54	20,220	2,338
15	10,34	4,78	5,717	1045,95	19,254	2,295
Průměrná hodnota			5,810	1226,98	21,109	2,317
Směrodatná odchylka			0,064	41,46	0,541	0,045

Tabulka A.7: Tahové vlastnosti vzorků Honeycomb 50 %

m hmotnost; a,b příčné rozměry; E modul pružnosti v tahu; R_m Smluvní napětí na mezi pevnosti; ϵ_m poměrné prodloužení na mezi pevnosti

Vzorek č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E [MPa]	R_m [MPa]	ϵ_m [%]
2	10,03	5,09	7,308	1388,30	20,512	2,285
3	10,40	5,07	7,313	1287,98	21,025	2,180
4	10,42	5,12	7,360	1251,26	20,077	2,222
5	10,11	5,15	7,356	1271,35	20,604	2,308
6	10,45	5,06	7,358	1417,96	21,158	2,200
7	9,94	5,08	7,065	1334,09	19,746	2,212
8	10,41	5,09	7,371	1285,42	20,676	2,311
9	10,19	4,88	6,859	1159,79	19,430	2,538
10	10,39	5,02	7,347	1314,93	21,692	2,145
11	10,21	4,90	6,791	1314,33	20,197	2,126
12	10,25	4,84	6,794	1207,41	20,578	2,284
13	10,25	4,79	6,738	1371,37	21,114	2,241
14	10,24	4,89	6,778	1363,50	20,213	2,269
15	10,16	4,98	6,745	1288,09	17,533	2,309
Průměrná hodnota			7,085	1303,98	20,545	2,238
Směrodatná odchylka			0,281	70,24	0,619	0,063

Tabulka A.8: Tahové vlastnosti vzorků Honeycomb 75 %

m hmotnost; a,b příčné rozměry; E modul pružnosti v tahu; R_m Smluvní napětí na mezi pevnosti; ϵ_m poměrné prodloužení na mezi pevnosti

Vzorek č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E [MPa]	R_m [MPa]	ϵ_m [%]
1	10,39	5,08	8,243	1508,75	21,818	2,179
2	10,39	4,91	8,159	1483,25	23,548	2,251
3	10,38	4,96	8,123	1502,99	23,106	2,205
4	10,42	4,94	8,107	1528,68	22,523	2,185
5	10,40	4,98	8,201	1420,92	22,231	2,272
6	10,39	5,07	8,210	1400,13	21,715	2,266
7	10,03	5,14	8,233	1408,07	21,917	2,232
8	10,37	4,99	8,129	1514,28	22,727	2,289
9	10,42	4,41	8,072	1742,55	27,252	2,187
10	10,40	4,93	8,151	1444,34	23,316	2,295
11	10,42	4,88	8,193	1580,50	23,005	2,624
12	10,37	4,95	8,143	1437,43	23,240	2,280
13	10,39	4,29	7,538	1718,93	24,305	2,245
14	10,11	5,08	8,056	1502,81	21,877	2,226
15	10,37	4,88	8,126	1515,50	23,712	2,205
Průměrná hodnota			8,112	1480,59	22,789	2,237
Směrodatná odchylka			0,168	53,94	0,805	0,041

Tabulka A.9: Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Rectilinear 0 %
 m hmotnost; a,b příčné rozměry; E_c Ztrátová energie rázu; a_{cU} Rázová houževnatost Charpy; σ_{fM} Napětí na mezi pevnosti v ohybu

Těleso č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E_c [J]	a_{cU} [kJm^{-2}]	σ_{fM} [MPa]
1	10,11	4,03	1,679	/	/	27,4
2	10,08	3,87	1,680	/	/	27,7
3	10,09	4,00	1,674	/	/	26,7
4	10,08	3,83	1,644	/	/	25,8
5	10,08	3,80	1,680	/	/	31,4
6	10,06	3,83	1,675	/	/	27,4
7	10,10	3,89	1,684	/	/	27,7
8	10,11	4,05	1,672	/	/	26,1
9	10,08	3,96	1,689	/	/	31,2
10	10,06	3,96	1,684	/	/	26,3
11	10,04	3,97	1,679	0,685	17,185	/
12	10,07	4,06	1,683	0,794	19,421	/
13	10,12	4,05	1,684	0,564	13,761	/
14	10,09	3,91	1,693	0,657	16,653	/
15	10,05	3,95	1,688	0,672	16,928	/
16	10,09	3,86	1,675	0,746	19,154	/
17	10,07	3,86	1,666	0,783	20,143	/
18	10,12	4,04	1,678	0,55	13,452	/
19	10,11	3,91	1,672	0,673	17,025	/
20	10,09	3,89	1,689	0,861	21,936	/
Průměrná hodnota			1,678	/	17,566	26,887
Směrodatná odchylka			0,011	/	2,683	0,759

Tabulka A.10: Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Rectilinear 25 %
 m hmotnost; a,b příčné rozměry; E_c Ztrátová energie rázu; a_{cU} Rázová houževnatost Charpy; σ_{fM} Napětí na mezi pevnosti v ohybu

Těleso č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E_c [J]	a_{cU} [kJm^{-2}]	σ_{fM} [MPa]
1	10,01	4,28	2,107	/	/	34,6
2	10,03	4,09	1,988	/	/	33,7
3	10,05	4,28	2,121	/	/	34,3
4	10,11	4,30	2,293	/	/	37,9
5	10,10	4,15	2,272	/	/	38,5
6	10,10	4,16	2,275	/	/	36,8
7	10,06	4,13	2,216	/	/	36,3
8	10,09	4,15	2,248	/	/	37,9
9	10,12	4,11	2,273	/	/	39,2
10	10,10	4,16	2,277	/	/	38,5
11	10,09	4,18	2,271	0,611	14,486	/
12	10,10	4,10	2,255	0,722	17,435	/
13	10,03	4,13	2,044	0,582	14,049	/
14	10,10	4,49	2,278	0,666	14,686	/
15	10,03	4,23	2,029	0,613	14,448	/
16	10,12	4,21	2,281	0,692	16,242	/
17	10,08	4,19	2,268	0,657	15,555	/
18	10,08	4,12	2,218	0,662	15,940	/
19	10,00	4,20	2,094	0,558	13,285	/
20	10,03	4,14	2,039	0,622	14,979	/
Průměrná hodnota			2,192	/	15,111	36,770
Směrodatná odchylka			0,104	/	1,204	1,969

Tabulka A.11: Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Rectilinear 50 %
 m hmotnost; a,b příčné rozměry; E_c Ztrátová energie rázu; a_{cU} Rázová houževnatost Charpy; σ_{fM} Napětí na mezi pevnosti v ohybu

Těleso č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E_c [J]	a_{cU} [kJm^{-2}]	σ_{fM} [MPa]
1	10,27	4,50	2,880	/	/	40,94
2	9,99	4,30	2,495	/	/	40,16
3	10,05	4,24	2,530	/	/	40,85
4	10,10	4,20	2,638	/	/	42,93
5	10,08	4,31	2,643	/	/	41,73
6	10,29	4,31	2,888	/	/	44,10
7	10,03	4,30	2,526	/	/	40,58
8	10,08	4,30	2,627	/	/	41,31
9	10,00	4,33	2,525	/	/	39,77
10	10,29	4,46	2,886	/	/	42,07
11	10,30	4,36	2,887	1,31	29,170	/
12	10,25	4,38	2,847	1,181	26,305	/
13	10,32	4,40	2,909	1,072	23,608	/
14	10,09	4,25	2,628	1,046	24,392	/
15	10,02	4,25	2,518	1,034	24,280	/
16	10,08	4,18	2,624	1,193	28,314	/
17	10,07	4,26	2,558	1,051	24,499	/
18	10,08	4,22	2,650	1,142	26,846	/
19	10,04	4,26	2,608	0,818	19,125	/
20	10,02	4,23	2,488	1,041	24,560	/
Průměrná hodnota			2,668	/	25,110	41,149
Směrodatná odchylka			0,153	/	2,811	0,982

Tabulka A.12: Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Rectilinear 75 %
 m hmotnost; a,b příčné rozměry; E_c Ztrátová energie rázu; a_{cU} Rázová houževnatost Charpy; σ_{fM} Napětí na mezi pevnosti v ohybu

Těleso č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E_c [J]	a_{cU} [kJm^{-2}]	σ_{fM} [MPa]
1	10,11	4,33	3,029	/	/	45,48
2	10,09	4,36	3,012	/	/	44,85
3	10,12	4,30	3,014	/	/	45,66
4	10,10	4,21	3,013	/	/	47,19
5	10,16	4,35	3,033	/	/	45,04
6	10,13	4,22	3,000	/	/	47,57
7	10,09	4,23	3,021	/	/	47,22
8	10,10	4,21	3,022	/	/	47,08
9	10,13	4,35	3,027	/	/	44,37
10	10,12	4,34	3,011	/	/	44,02
11	10,11	4,29	3,009	1,013	23,356	/
12	10,08	4,27	3,027	0,92	21,374	/
13	10,15	4,32	3,025	1,03	23,490	/
14	10,13	4,32	3,031	1,079	24,656	/
15	10,10	4,29	3,015	0,99	22,848	/
16	10,09	4,30	3,042	1,03	23,739	/
17	10,10	4,32	3,017	1,034	23,698	/
18	10,08	4,36	3,025	1,051	23,914	/
19	10,11	4,30	3,042	1,046	24,060	/
20	10,12	4,35	3,029	1,147	26,055	/
Průměrná hodnota			3,022	/	23,719	45,848
Směrodatná odchylka			0,011	/	1,198	1,313

Tabulka A.13: Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Rectilinear 100%
m hmotnost; a,b příčné rozměry; E_c Ztrátová energie rázu; a_{cU} Rázová houževnatost Charpy; σ_{fM} Napětí na mezi pevnosti v ohybu

Těleso č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E_c [J]	a_{cU} [kJm^{-2}]	σ_{fM} [MPa]
1	10,25	4,85	3,555	/	/	51,7
2	10,26	4,87	3,546	/	/	49,35
3	10,26	4,79	3,546	/	/	51,4
4	10,20	4,92	3,550	/	/	48,87
5	10,22	4,88	3,533	/	/	48,81
6	10,19	4,81	3,543	/	/	51,3
7	10,22	4,88	3,546	/	/	49,58
8	10,22	4,89	3,528	/	/	48,56
9	10,35	4,80	3,541	/	/	50,8
10	10,35	4,83	3,552	/	/	50,5
11	10,20	4,69	3,390	0,925	19,336	/
12	10,28	4,91	3,554	1,227	24,309	/
13	10,27	4,76	3,515	1,222	24,997	/
14	10,19	4,68	3,389	1,22	25,582	/
15	10,22	4,69	3,415	1,046	21,822	/
16	10,21	4,91	3,540	1,106	22,062	/
17	10,28	4,85	3,519	1,113	22,323	/
18	10,28	4,87	3,524	1,091	21,792	/
19	10,38	4,84	3,549	1,415	28,165	/
20	10,29	4,77	3,538	1,21	24,651	/
Průměrná hodnota			3,519	/	23,504	50,087
Směrodatná odchylka			0,053	/	2,513	1,189

Tabulka A.14: Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Honeycomb 25 %
 m hmotnost; a,b příčné rozměry; E_c Ztrátová energie rázu; a_{cU} Rázová houževnatost Charpy; σ_{fM} Napětí na mezi pevnosti v ohybu

Těleso č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E_c [J]	a_{cU} [kJm^{-2}]	σ_{fM} [MPa]
1	10,30	4,74	2,399	/	/	36,3
2	10,32	4,73	2,435	/	/	36,4
3	10,30	4,89	2,435	/	/	34,5
4	10,28	4,77	2,402	/	/	35,5
5	10,28	4,76	2,430	/	/	36,8
6	10,30	4,78	2,398	/	/	35,7
7	10,26	4,75	2,412	/	/	37,1
8	10,26	4,81	2,396	/	/	35,1
9	10,26	4,79	2,397	/	/	35,2
10	10,29	4,84	2,423	/	/	35,3
11	10,25	4,72	2,364	1,181	24,411	/
12	10,35	4,77	2,433	1,147	23,232	/
13	10,26	4,79	2,347	0,884	17,987	/
14	10,30	4,73	2,418	1,075	22,065	/
15	10,29	4,75	2,418	0,948	19,39	/
16	10,32	4,67	2,415	0,886	18,383	/
17	10,28	4,69	2,414	1,061	22,006	/
18	10,35	4,70	2,414	1,149	23,620	/
19	10,28	4,75	2,450	1,094	22,404	/
20	10,35	4,80	2,429	1,077	21,678	/
Průměrná hodnota			2,411	/	21,519	35,790
Směrodatná odchylka			0,024	/	2,207	0,829

Tabulka A.15: Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Honeycomb 50%
 m hmotnost; a,b příčné rozměry; E_c Ztrátová energie rázu; a_{cU} Rázová houževnatost Charpy; σ_{fM} Napětí na mezi pevnosti v ohybu

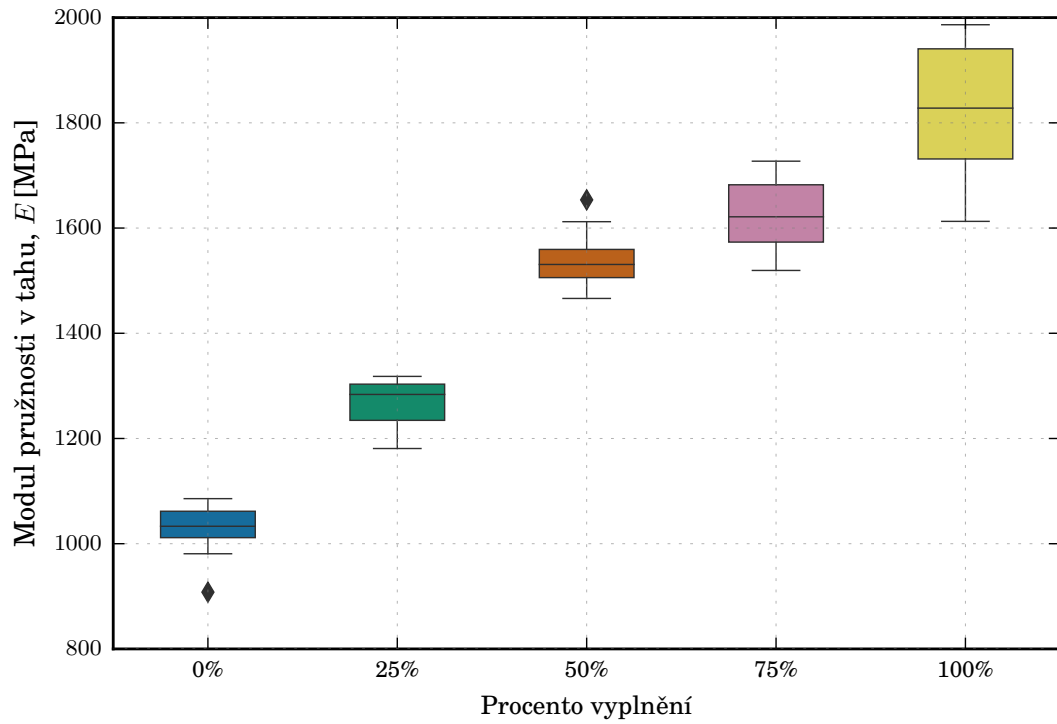
Těleso č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E_c [J]	a_{cU} [kJm^{-2}]	σ_{fM} [MPa]
1	10,34	4,66	2,683	/	/	39,6
2	10,33	4,73	2,722	/	/	39,6
3	10,22	4,70	2,648	/	/	38,5
4	10,29	4,63	2,699	/	/	40,6
5	10,32	4,78	2,680	/	/	37,3
6	10,34	4,70	2,705	/	/	39,8
7	10,26	4,76	2,723	/	/	38,8
8	10,30	4,50	2,609	/	/	41,6
9	10,32	4,73	2,711	/	/	39,6
10	10,37	4,71	2,708	/	/	39,4
11	10,26	4,80	2,691	0,697	14,153	/
12	10,34	4,68	2,708	0,753	15,566	/
13	10,26	4,83	2,702	0,654	13,197	/
14	10,31	4,66	2,699	0,88	18,316	/
15	10,33	4,74	2,723	1,02	20,831	/
16	10,40	4,74	2,708	0,714	14,483	/
17	10,28	4,73	2,696	0,753	15,486	/
18	10,28	4,60	2,613	0,91	19,243	/
19	10,32	4,55	2,649	0,684	14,566	/
20	10,33	4,69	2,696	0,678	13,994	/
Průměrná hodnota			2,689	/	15,983	39,488
Směrodatná odchylka			0,033	/	2,567	0,636

Tabulka A.16: Rázové a ohybové vlastnosti vzorků Honeycomb 75%
 m hmotnost; a,b příčné rozměry; E_c Ztrátová energie rázu; a_{cU} Rázová houževnatost Charpy; σ_{fM} Napětí na mezi pevnosti v ohybu

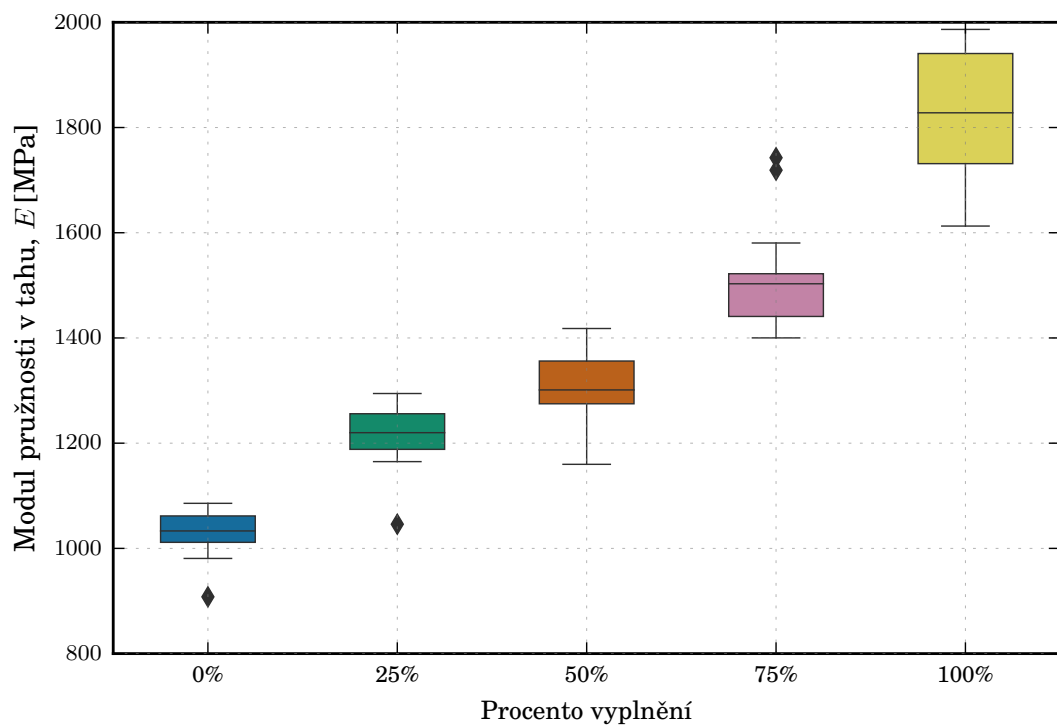
Těleso č.	a [mm]	b [mm]	m [g]	E_c [J]	a_{cU} [kJm^{-2}]	σ_{fM} [MPa]
1	10,15	3,92	2,522	/	/	38,0
2	10,34	4,83	3,091	/	/	38,3
3	10,12	4,11	2,700	/	/	38,2
4	10,11	4,11	2,689	/	/	38,3
5	10,05	3,90	2,481	/	/	36,2
6	10,32	5,07	3,232	/	/	38,1
7	10,30	5,00	3,189	/	/	38,9
8	10,09	4,01	2,666	/	/	39,2
9	10,10	4,00	2,656	/	/	40,2
10	10,10	4,13	2,693	/	/	37,5
11	10,09	4,04	2,659	0,853	20,925	/
12	10,06	3,96	2,512	0,727	18,249	/
13	10,08	3,99	2,651	0,943	23,446	/
14	10,10	4,04	2,644	0,682	16,714	/
15	10,09	4,01	2,653	0,771	19,055	/
16	10,08	4,05	2,660	0,795	19,473	/
17	10,33	5,05	3,201	0,682	13,073	/
18	10,35	4,90	3,194	0,806	15,892	/
19	10,28	4,01	2,697	1,016	24,646	/
20	10,10	4,09	2,679	0,853	20,649	/
Průměrná hodnota			2,773	/	19,213	38,312
Směrodatná odchylka			0,250	/	3,470	0,528

B Box-plot grafy

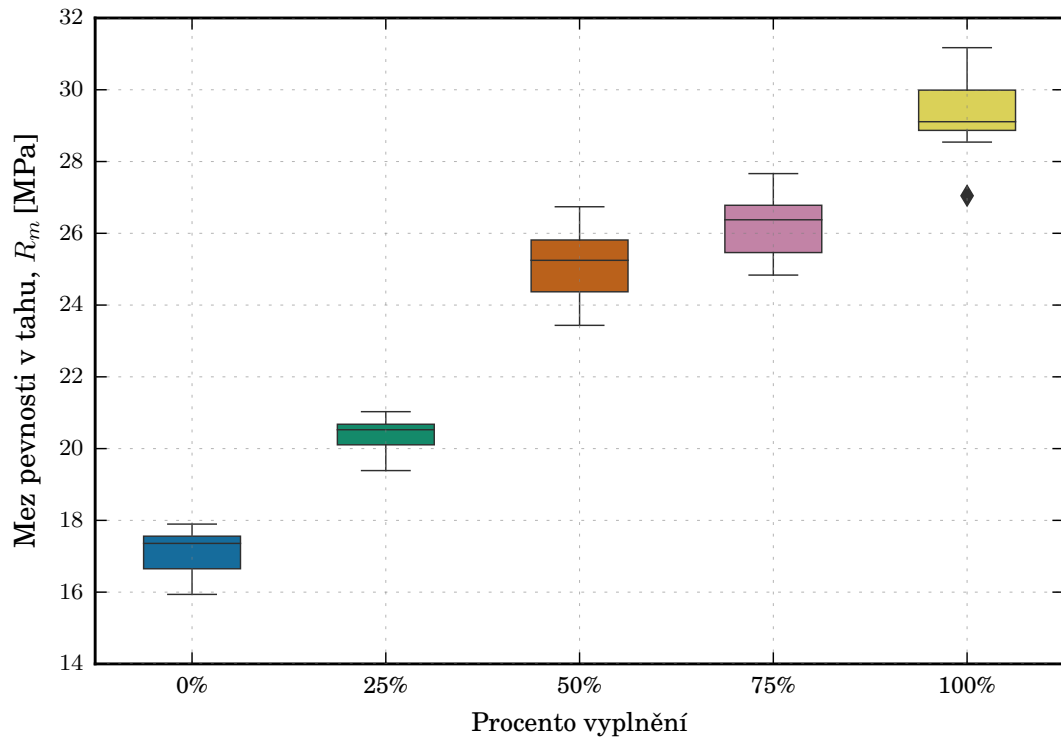
V této příloze jsou veškeré box-plot grafy sloužící k určení odlehlých hodnot z měření mechanických vlastností. Horní a spodní obrys boxu určuje polohy 1. a 3. kvartilu z dané sady hodnot. vodorovná čára uvnitř boxu pak určuje 2. kvartil (medián) hodnot. Paprsky vycházející z boxu znázorňují proměnlivost dat nad třetím a pod prvním kvartilem. Jako poslední se v grafech vyskytují tzv. odlehlé hodnoty, které spadají mimo vyhodnocovanou oblast.



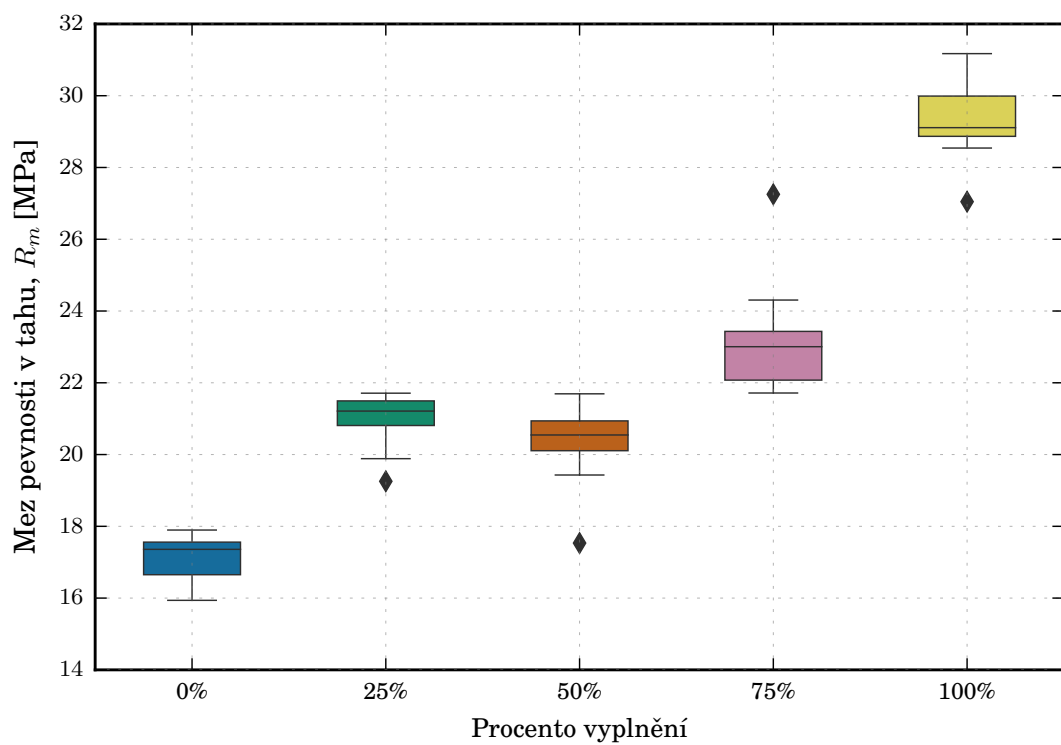
Obrázek B.1: Box-plot graf modulu pružnosti E [MPa] struktur Rectilinear



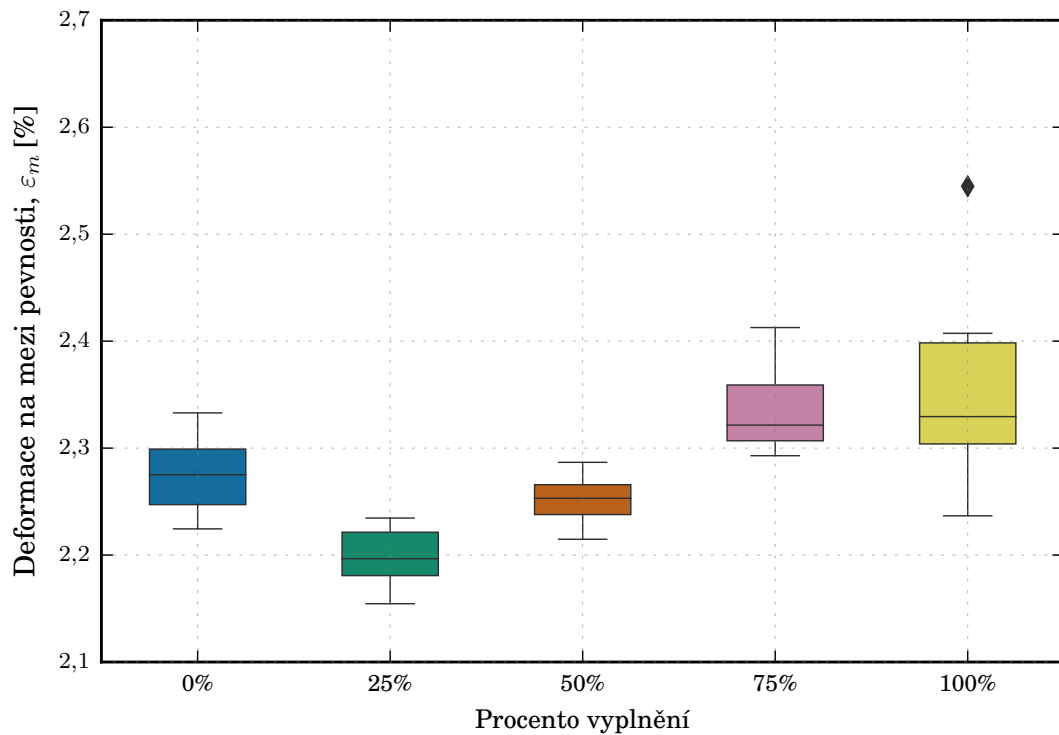
Obrázek B.2: Box-plot graf modulu pružnosti E [MPa] struktur Honeycomb, Hodnota 100 % zobrazuje Rectilinear 100 %



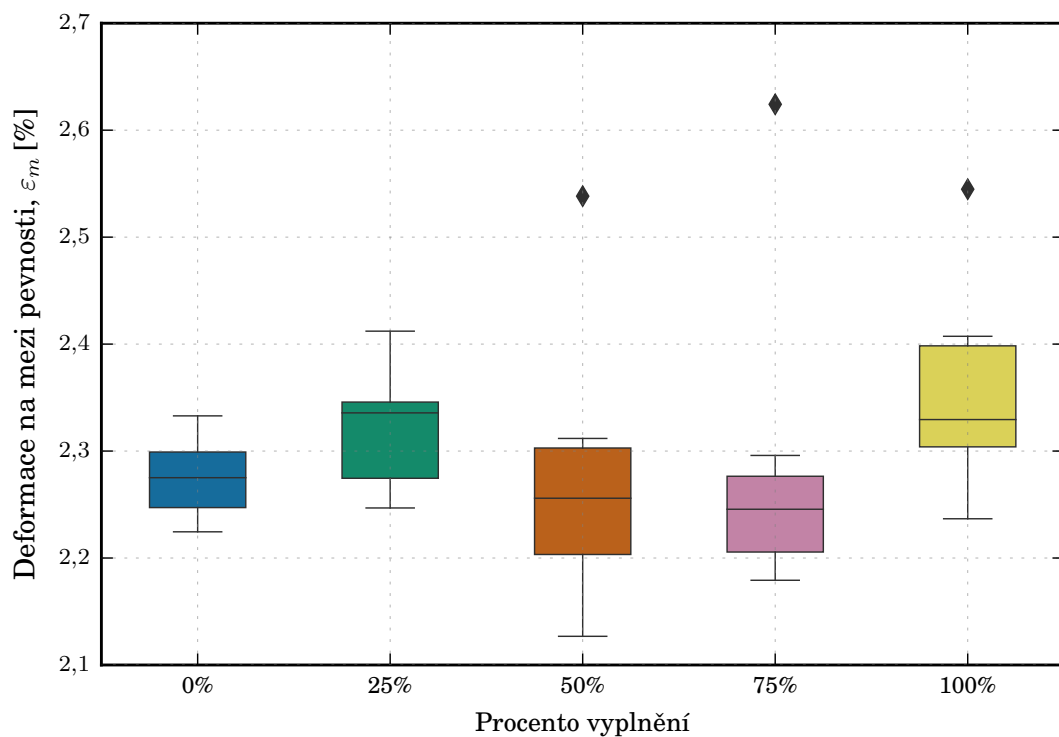
Obrázek B.3: Box-plot graf smluvní napětí na mezi pevnosti R_m [MPa] struktur Rectilinear



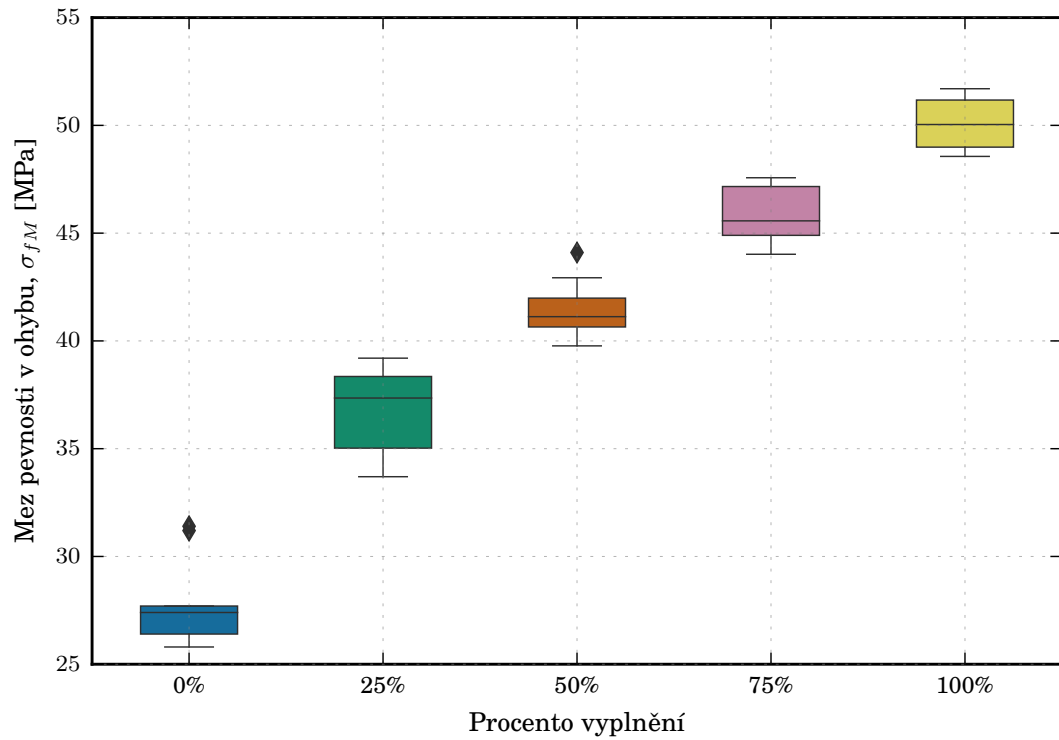
Obrázek B.4: Box-plot graf smluvní napětí na mezi pevnosti R_m [MPa] struktur Honeycomb, Hodnota 100 % zobrazuje Rectilinear 100 %



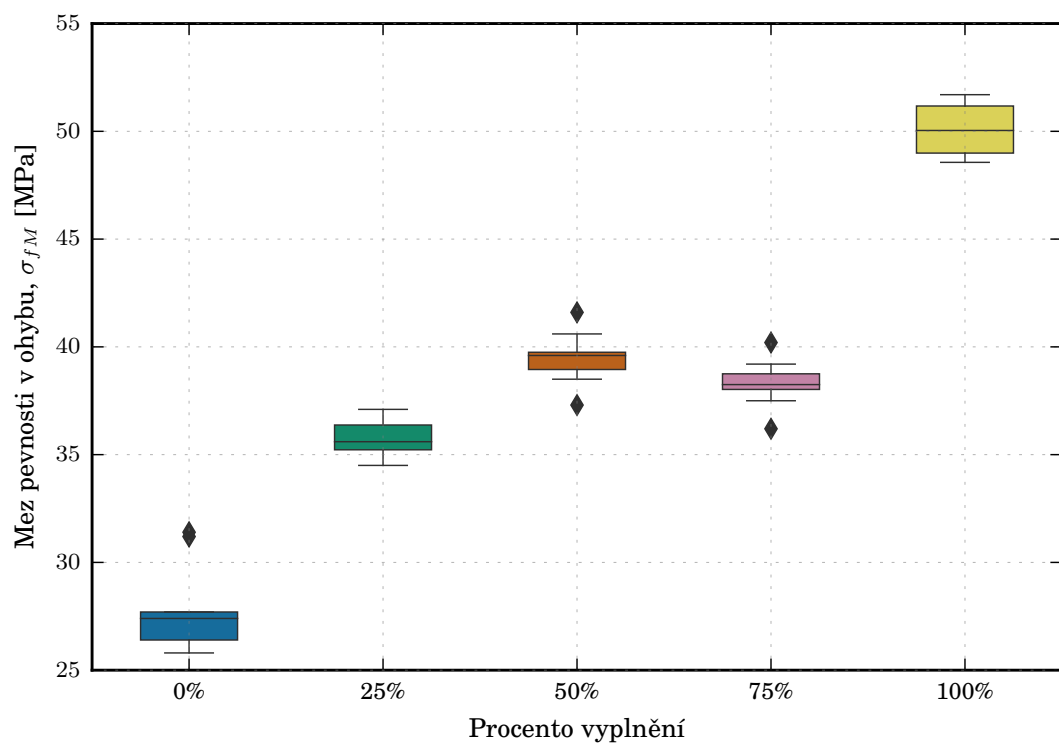
Obrázek B.5: Box-plot graf poměrné prodloužení na mezi pevnosti ϵ_m [MPa] struktur Rectilinear



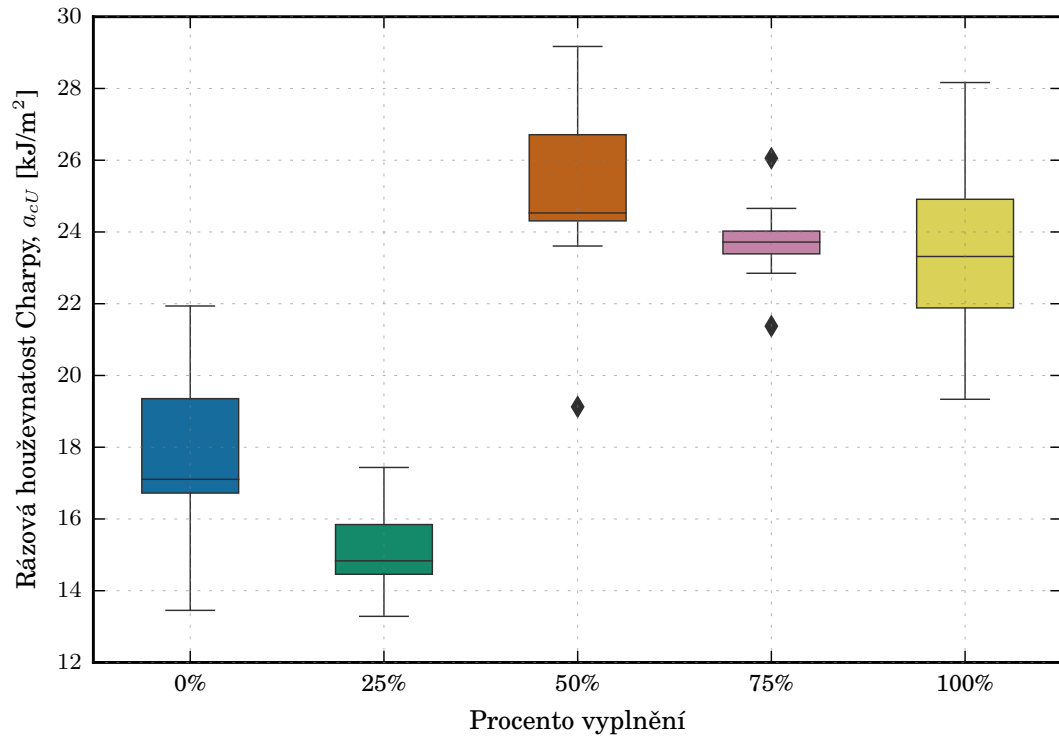
Obrázek B.6: Box-plot graf poměrné prodloužení na mezi pevnosti ϵ_m [MPa] struktur Honeycomb, Hodnota 100 % zobrazuje Rectilinear 100 %



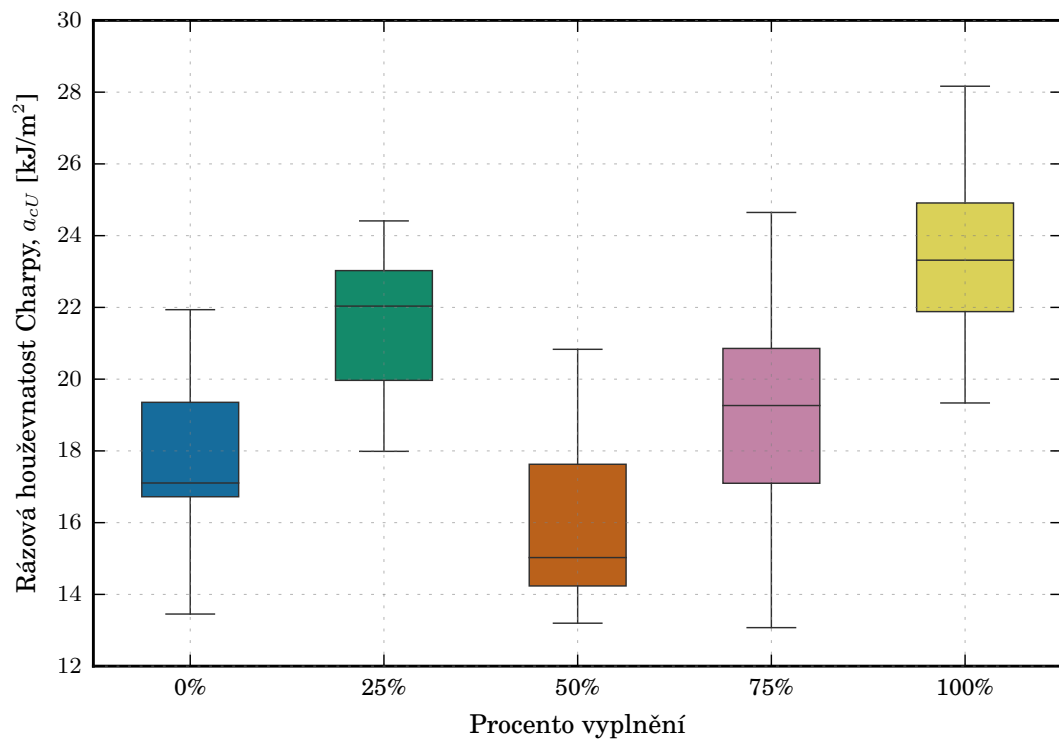
Obrázek B.7: Box-plot graf napětí na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} [MPa] struktur Rectilinear



Obrázek B.8: Box-plot graf napětí na mezi pevnosti v ohybu σ_{fM} [MPa] struktur Honeycomb, Hodnota 100 % zobrazuje Rectilinear 100 %



Obrázek B.9: Box-plot graf rázová houževnatost a_{cU} [kJm^{-2}] struktur Rectilinear



Obrázek B.10: Box-plot graf rázová houževnatost a_{cU} [kJm^{-2}] struktur Honeycomb, Hodnota 100 % zobrazuje Rectilinear 100 %