

Zkouška pevnosti v ohybu zvolených typů mřížových struktur

Matěj Škývara

Bakalářská práce
2019/2020

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Matěj Škývara
Osobní číslo:	T18426
Studijní program:	B3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Technologická zařízení
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Zkouška pevnosti v ohybu zvolených struktur typu lattice

Zásady pro vypracování

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Analýza současného stavu
4. Návrh aplikace technologie 3D tisku při výrobě tvarově složitých komponentů
5. Vyhodnocení a závěr

Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. SHIGLEY, J. et al.: Konstruování strojních součástí (2010), ISBN 978-80-214-2629-0
2. VASIIKO, K.: Výrobní technologie, Prešov, 2005, ISBN 80-7099-282-0
3. CHUA, Ch. K., LEONG, K. F.: 3D printing and additive manufacturing principles and applications, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, pp. 551, ISBN 978-9814571401
4. CHUA, C. K., LIU, A., & LEONG, K. F. X State of the Art in Rapid Metallic Manufacturing. In 3rd International Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, ICRPM-BM, 2008, Beijing, China.
5. WARNER, M. C.: Rapid prototyping methods to manufacture functional metal and plastic parts. Rapid prototyping systems: Fast track to product realization, 1993, 137-144

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Katarína Monková, PhD.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **22. května 2020**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá zkouškou pevnosti v ohybu vybraných atypických porézních struktur, vyrobených za použití aditivní technologie 3D tisku typu FDM.

Teoretická část této práce se věnuje podrobnějšímu náhledu do technologie FDM 3D tisku a jejích materiálů. Další části jsou věnovány teoretickému seznámení s využívanými statistickými vyhodnocovacími metodami, ohybové zkoušce a ohybu z pohledu mechaniky plastů. Jsou zakončeny kapitolou věnovanou porézním strukturám.

Praktická část se zabývá tiskem a následným vyhodnocením čtyř typů porézních struktur. Zkouška byla provedena tříbodovým ohybem na zkušebním stroji Zwick 1456, o tisk se postarala poloprofesionální tiskárna Prusha Mk3S, jako materiál posloužila struna nebarveného materiálu ABS.

Klíčová slova: porézní struktury, mřížové struktury, 3D tisk, zkouška ohybem, FDM, ABS.

ABSTRACT

This work deals with the test of flexural strength of selected atypical porous structures, produced using additive technology of 3D printing of the FDM technology.

The theoretical part of this work deals with a more detailed insight into the technology of FDM 3D printing and its materials. Other parts are devoted to theoretical acquaintance with the used statistical evaluation methods, bending test and bending from the point of view of plastics mechanics. Finished with a chapter on porous structures.

The practical part deals with the printing and subsequent evaluation of four types of porous structures. The test was performed on a three-point bending machine with a Zwick 1456 testing machine. The printing was taken care of by a semi-professional Prusha Mk3S printer, the material of which was a string of uncoated ABS material.

Keywords: 3D Printing, FDM, ABS, porous structures, lattice structure, bending test.

Rád bych tímto poděkoval vedoucí mé bakalářské práce paní prof. Ing. Kataríně Monkové, Ph.D. za ochotu, vstřícnost, vynaložený čas, veškeré rady a cenné informace, které mi pomohly při řešení této problematiky. Panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za odzkoušení vzorků na ohyb v době, kdy škola byla studentům uzavřena.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING A TISKÁRNÝ FDM	11
1.1 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING	11
1.2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	12
1.3 TECHNOLOGIE TISKU FDM	13
1.3.1 FDM nebo FFF?	16
1.3.2 REP-RAP	17
1.4 FDM TISK A KVALITA	17
1.4.1 Faktory ovlivňující kvalitu povrchu.....	18
1.4.1.1 Výška vrstvy vs. průměr trysky	18
1.4.1.2 Vliv výběru šířky trysky a vrstvy na dobu tisku modelu.....	19
1.4.2 Vliv šířky trysky na mechanické vlastnosti	20
1.4.3 Stringování	20
2 MATERIÁLY PRO FDM 3D TISK	22
2.1.1 PLA (Polylactic Acid – kyselina polymléčná).....	22
2.1.2 PET / PET–G (polyetylén tereftalát–glykol).....	23
2.1.3 PC – Polykarbonát.....	23
2.1.4 PA / PA 12 (Polyamid - Nylon)	24
2.1.5 ASA (akrylonitril–styren–akryl)	25
2.1.6 ABS (akrylonitril–butadien–styren).....	25
3 STATISTIKA A STATISTICKÉ VYHODNOCOVÁNÍ	26
3.1 GAUSSOVO (NORMÁLOVÉ) ROZDĚLENÍ.....	26
3.2 ARITMETICKÝ PRŮMĚR.....	27
3.3 SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	27
3.3.1 Směrodatná odchylka výběru	28
3.4 GRUBBSŮV TEST.....	28
3.5 LINEÁRNÍ REGRESE.....	29
4 PORÉZNÍ STRUKTURY	30
5 MECHANIKA PLASTŮ	32
5.1 ZKOUŠKA NA OHYB	32
II PRAKTICKÁ ČÁST	35
6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	36
7 POUŽITÝ MATERIÁL	37
8 TISK VZORKŮ, TISKOVÉ PODMÍNKY A PŘÍPRAVA NA ZKOUŠKU OHYBEM	38

8.1	3D TISKÁRNA A SLICOVACÍ PROGRAM	38
8.2	TISKOVÉ PODMÍNKY	38
8.2.1	Délka tisku	38
8.2.2	Fixace výrobku.....	38
8.2.3	Nastavení tiskárny při tisku.....	39
8.3	PŘÍPRAVA NA OHYBOVOU ZKOUŠKU A PARAMETRY OHYBOVÉ ZKOUŠKY	41
9	TYPY STRUKTUR PRO EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ.....	42
10	VÝPOČET OHYBOVÉHO NAPĚTÍ HRÍDELE	44
11	VÝPOČTY	45
11.1	VÝPOČET MINIMÁLNÍHO DOVOLENÉHO OHYBOVÉHO NAPĚTÍ HRÍDELE PRVNÍHO VZORKU STRUKTURY CARTESIAN S OBJEMOVÝM PODÍLEM 44%	45
11.2	VÝPOČET GRUBBSOVA TESTU ODLEHLÝCH HODNOT PRO CARTESIANSKOU STRUKTURU S OBJEMOVÝM PODÍLEM 44%	45
11.2.1	Výpočet aritmetického průměru testovaného souboru.....	45
11.2.2	Výpočet směrodatné odchylky průměru	45
11.2.3	Grubbsův test pro nejnižší hodnotu z testovaného souboru.....	45
11.2.4	Grubbsův test pro nejvyšší hodnotu z testovaného souboru	46
12	VÝSLEDKY OHYBOVÝCH ZKOUŠEK STRUKTUR A STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ	47
12.1	VZORKY TYPU C S OBJEMOVÝM PLNĚNÍM 44%	47
12.2	VZORKY TYPU C S OBJEMOVÝM PLNĚNÍM 57%.....	49
12.3	VZORKY TYPU C S OBJEMOVÝM PLNĚNÍM 70%	50
12.4	VZORKY TYPU R S OBJEMOVÝM PLNĚNÍM 44%	52
12.5	VZORKY TYPU R S OBJEMOVÝM PLNĚNÍM 57%.....	54
12.6	VZORKY TYPU R S OBJEMOVÝM PLNĚNÍM 70%.....	56
12.7	VZORKY TYPU O S OBJEMOVÝM PLNĚNÍM 44%.....	57
12.8	VZORKY TYPU O S OBJEMOVÝM PLNĚNÍM 57%.....	59
12.9	VZORKY TYPU O S OBJEMOVÝM PLNĚNÍM 70%.....	61
12.10	VZORKY TYPU S S OBJEMOVÝM PLNĚNÍM 44%	63
12.11	VZORKY TYPU S S OBJEMOVÝM PLNĚNÍM 57%	65
12.12	VZORKY TYPU S S OBJEMOVÝM PLNĚNÍM 70%	67
13	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	69
13.1	POROVNÁNÍ STRUKTUR DLE TYPU ODLEHČENÍ	69
13.2	POROVNÁNÍ SOUBORU STRUKTUR PODLE OBJEMOVÝCH PLNĚNÍ.....	71
	ZÁVĚR	74
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ	80

SEZNAM TABULEK.....	81
SEZNAM GRAFŮ	82
SEZNAM PŘÍLOH.....	83

ÚVOD

Rozvoj technologie, ekonomiky a s ní požadavků trhu vedou výrobce k zvyšování nároků na vlastnosti výrobku, za cenu co nejnižší ceny a hmotnosti. Mnohdy se konstruktéři dostávají do fáze, kdy požadavky zadavatele jsou daleko za možnostmi konvenčních technologií. I kdyby v takových případech bylo možné výrobek za užití konvenčních metod vyrobit, bylo by to vykoupeno enormními náklady na čas, technologii, kapacitu a materiál. Tyto požadavky odběratelů vedou mnohé dodavatelské skupiny k hledání nových postupů a technologií výroby.

Jednou z takových technologií je v současné době velmi populární technologie 3D tisku patřící do skupiny technologií rapid prototyping, tedy souboru technologií, které vytváří výsledný objekt stavením, nikoliv odebráním materiálu, jak to známe u konvenčních technologií.

Jednou z možností, kde nám 3D tisk umožnil vyrobit dříve nemyslitelné, je lehčení těles. Lehčení těles pomocí mřížových struktur se začalo uplatňovat v poslední době díky rozvoji technologií RP. Lehčené nebo též porézní struktury nám umožňují získat a mnohdy překonat mechanické vlastnosti homogenního materiálu, jako je snížení váhy tělesa a spotřeby materiálu.

Byť mnohé z těchto struktur jsou již známé a široce využívány, některé se dají vyrábět i pomocí konvenčních technologií.

Tato práce se zabývá experimentálním odlehčením těles, které můžeme vyrobit jen díky technologiím RP. Věnuje se čtyřem typům lehčení, jejich vyroběním na FDM 3D tiskárně a následnou zkouškou na ohyb. Jako materiál slouží základní konstrukční plast ABS.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING A TISKÁRNÝ FDM

1.1 Technologie Rapid prototyping

Technologiemi Rapid Prototyping (RP) se v současné době označují metody výroby prototypů, součástí, nebo nástrojů s přímým použitím počítačových dat.

Jde o progresivní způsob výroby, její vznik je datován rokem 1988 a to vynálezem metody SLS – Selective Laser Sintering, panem Charlesem Hullem.

Současné metody RP můžeme rozdělit na dvě skupiny:

- Metody rychlého odebrání materiálu, kde řadíme především výrobu pomocí odebrání materiálů při obrábění na konvenčních CNC strojích
- Metody aditivní výroby, jejichž principem je tvorba objektu pomocí postupného nánášení materiálu, např: pryskyřice, termoplasty, kovy a jejich slitiny

Aditivní metody RP je možné podle formy počátečního materiálu rozdělit na procesy kapalinové, práškové a pevnolátkové. Základem pro výrobu je virtuální trojrozměrný model součásti, který je rozdělen do řezů. Pro volné prostory, tam kde je to nezbytné, je navrženo umístění podpůrného materiálu, jenž se po dokončení výrobního cyklu odstraní.

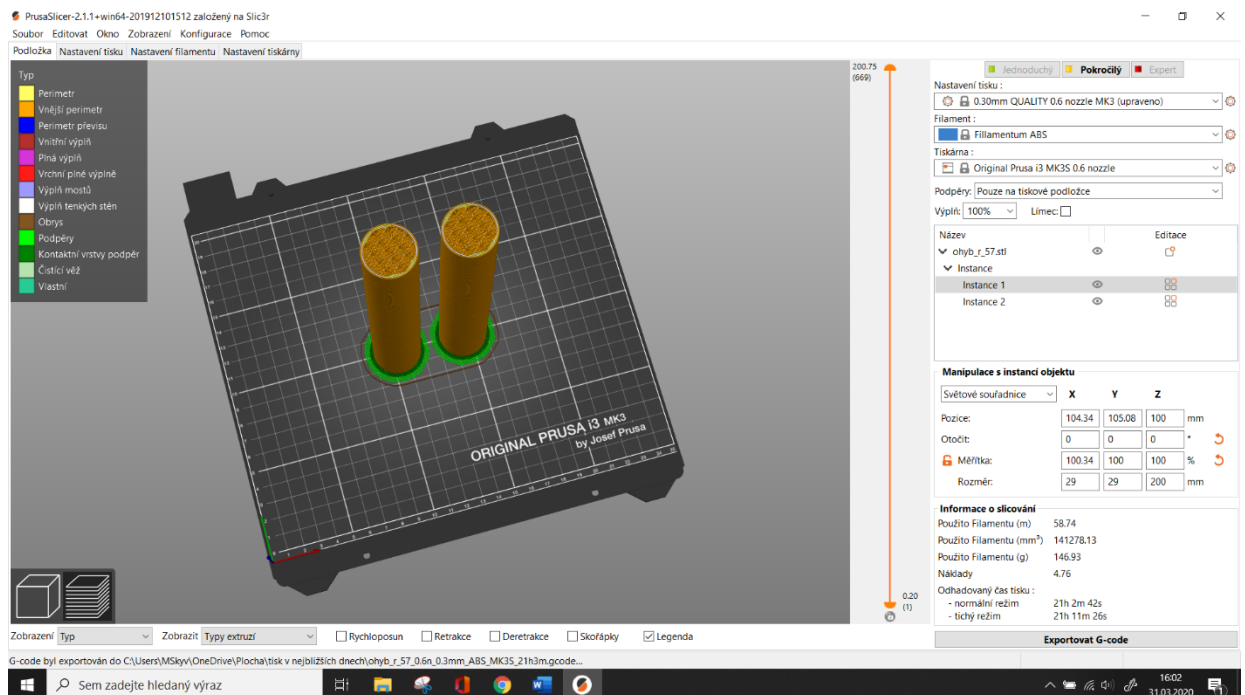
Tyto technologie se uplatňují nejčastěji v průmyslovém sektoru, především při malosériové výrobě součástí s relativně nízkými náklady. Používají se především při výrobě prototypů, slévárenských modelů, maket, náhradních dílů, součástí jednoúčelových strojů, umělých končetin, zubních korunek atd.

V současnosti zažívají technologie RP velký rozmach a jsou čím dál více dostupné pro domácí využití. Nejvyšší nárůst získaly díky open source projektu REP–RAP.

Nadále se budeme v této práci zabývat využitím technologie aditivní výroby při zkoumání odlehčení materiálu na ohybovou zkoušku zkušebních těles. [1]

1.2 Aditivní technologie

Aditivní technologie je charakterizována veškerou výrobou produktů, kde se ve velké míře neuzívá metody, při které dochází k odebírání materiálu. Aditivní technologie je proces, při kterém trojrozměrný výrobek vzniká postupným nanášením jednotlivých tenkých vrstev materiálu na sebe. Princip metody spočívá ve vytvoření virtuálního 3D modelu v konstrukčním programu např. Solid Edge, Fusion 360, či jiném vhodném programu, nebo naskenováním trojrozměrného objektu pomocí 3D skeneru, převedeném nejčastěji ve formátu STL, OBJ, 3FM. Připravená data jsou načtena do slicovacího programu viz. obrázek 1. Model je následně v softwaru virtuálně rozřezán příčnými řezy na tenké vrstvy, přičemž, čím menší je tloušťka vrstvy, tím bližší je tvar hotového výrobku originálnímu 3D modelu. V programu je následně navržena podpurná konstrukce, která pomáhá k vytvoření modelu a lze ji též využít pro ustavení modelu na tiskovou desku. Formou G-kódu je připravený model ze systému přenesen do stroje určeného ke zhotovení výrobku. [1] [3]

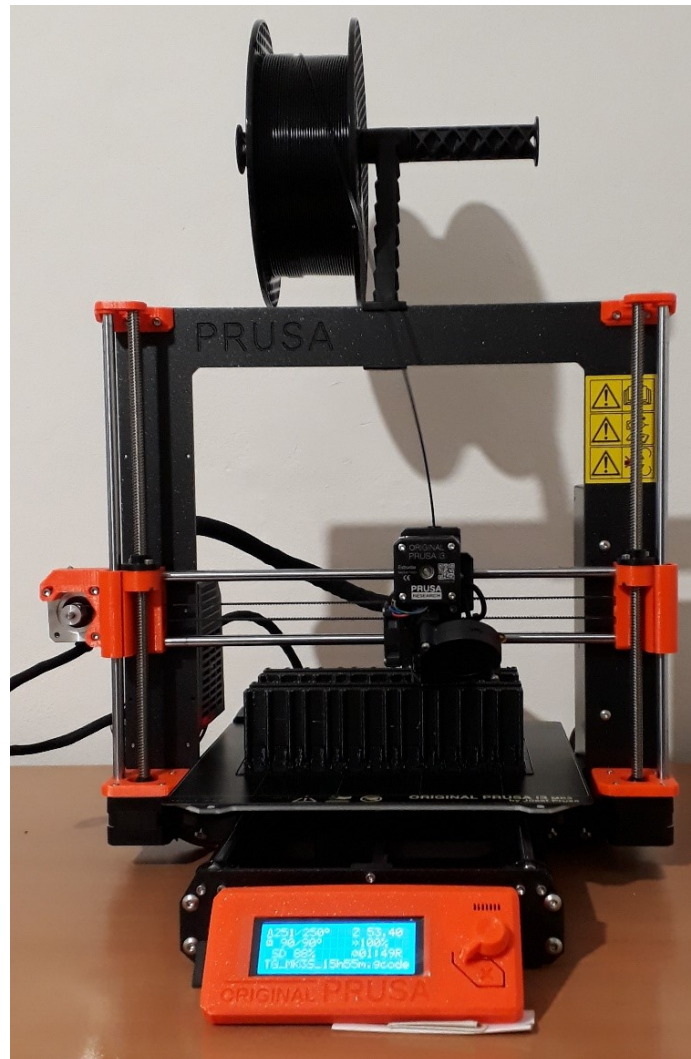


Obrázek 1 - Zkušební tělesa připravená na export do G-codu v programu PrusaSlicer.

1.3 Technologie tisku FDM

V současné době se jedná o jednu z nejpoužívanějších technologií pro 3D tisk, tvorbu prototypů a funkčních výrobků. Tato technologie je užívána, jak profesionálními, tak amatérskými tiskárnami. Její výhodou je velká dostupnost různých typů tiskáren a materiálů pro 3D tisk. Jedná se o technologicky jednodušší tiskárny, což jim neubírá nic na jejich obrovské přidané hodnotě.

Princip spočívá v tavení plastového vlákna – filamentu uvnitř extruderu, který je do tiskové hlavy přiváděn pod tlakem. Tisková hlava materiál roztaví a vytlačuje jej na tiskovou podložku skrz tenkou tryskou. Celá soustava se pohybuje nad tiskovou podložkou ve dvou osách. Z vytlačovaného materiálu, po jednotlivých vrstvách, tvoří výsledný objekt v horizontálním směru. [3]



Obrázek 2 - Poloprofesionální jedno-materiálová tiskárna MK3S od společnosti Prusa Research s.r.o.

Vlákno plastu nebo vosku je ve vytlačovací hlavě roztaveno a vytlačováno na povrch existující součásti. Pohyb hlavy ve vrstvě je řízen v osách X-Y a nahoru v ose Z o velikosti tloušťky jedné vrstvy pohybující se mezi 0,05 - 0,40 mm. Vstupní vlákno se zpravidla pohybuje mezi 1,75 - 2,85 mm. Vlákno je ve vytlačovací hlavě ohřáto o 0,5 °C nad teplotu tání. Během 0,1 sekundy vzniká studený spoj vytlačovaného materiálu s povrchem torza výrobku.

Nejčastějšími materiály pro FDM tisk jsou termoplasty a polykarbonáty, dále se využívají kompozitní materiály s různými přísadami, např. dřevo, uhlíková a karbonová vlákna, bronzový prášek apod. [2]

Jestliže je pro zdárné dokončení výtisku vyžadován podpůrný materiál, je obvykle vytlačován druhou vytlačovací hlavou/extruderem a jde o surovinu, která se snadno separuje od základního materiálu. U hydrofobních materiálů můžeme jako podpůrný materiál využít PVA (polyvinylalkohol), který je rozpustný ve vodě. Pokud není možné mít na tiskárně dvě vytlačovací hlavy/extrudery, tisknou se podpory ze stejného materiálu, jako je výsledný produkt. [3]

Jednou z velkých výhod této metody tisku je, že většina užitých materiálů je netoxická a FDM stroje se tak mohou používat v domácím i kancelářském prostředí.

Pro úsporu času umožňují některé FDM stroje dva módy tisku: plně objemový mód a mód řídký. Poslední uváděný mód šetří stavební materiál a čas výroby, ale výrazně snižuje mechanické vlastnosti prostřednictvím minimalizace výplně stěn výrobku.

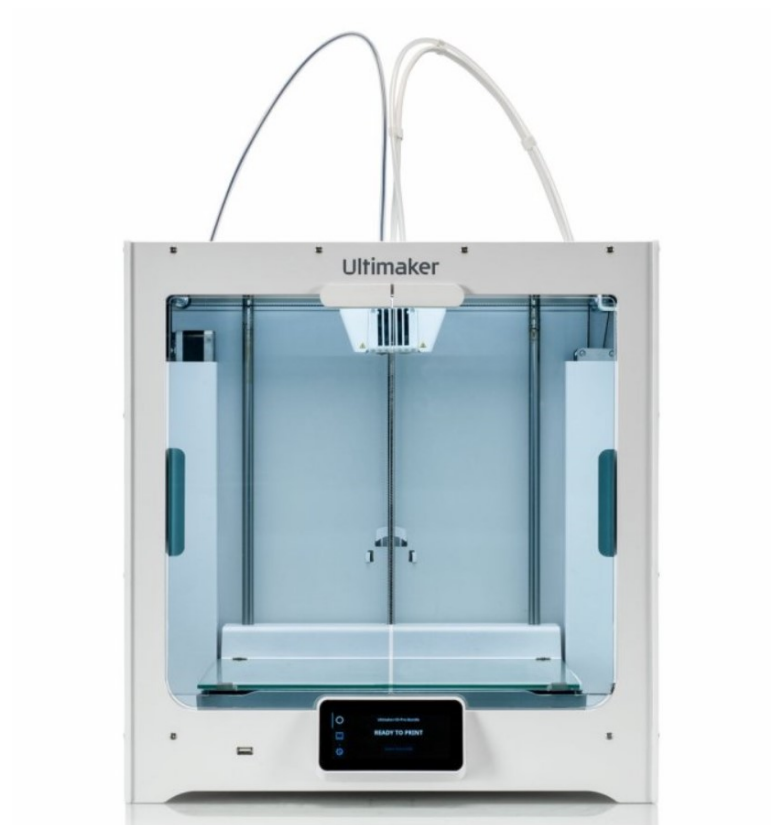
Dalším módem tisku je tisk spirálový. Používá se pouze u objektů s jednoduchým obvodem např. váza, trubky. Tiskárna pokládá materiál tak, aby na výtisku nebyly vidět spoje mezi jednotlivými vrstvami. [2]

Výhody technologie FDM:

1. Velké množství použitelných materiálů
2. Při tisku nevznikají žádné škodlivé emise
3. Minimální odpad
4. Nízká cena funkčních prototypů
5. Svými vlastnostmi se vytištěné součásti blíží konečným produktům

Nevýhody technologie FDM:

1. Kvalita povrchu
2. Nutnost dokončovacích operací – odstranění podpor
3. Časová náročnost tisku



Obrázek 3 Profesionální vícemateriálová 3D tiskárna Ultimaker S3 od společnosti Ultimaker, typ technologie: FDM [9]

1.3.1 FDM nebo FFF?

V mnohých člancích, na které můžeme v odborném tisku i obyčejných mediích narazit, se můžeme často setkat se zaměňováním zkratk FDM a FFF. Která z nich je správně?

FFF (fused filament fabrication) doslova znamená „výroba z roztaveného filamentu“. Jedná se o alternativní označení ke zkratce FDM, kterou zavedla komunita kolem projektu REP-RAP, aby se vyhnula střetu s firmou Stratasys.

FDM neboli fused deposition modeling je označení pro nejrozšířenější technologii 3D tisku. Koncem 80. let 20. století ji vynalezl a patentoval Scott Crump, zakladatel společnosti Stratasys, jež má na pojem Fused Deposition Modeling stále platnou ochrannou známku. Výrobky firmy Stratasys patří k tomu nejlepšímu a nejdražšímu co na trhu s FDM tiskárnami můžete získat. [10]

1.3.2 REP-RAP

REP-RAP je projekt, jenž vznikl za účelem rozšíření technologií 3D tisku mezi soukromé zákazníky. Stroje se vyvíjely a vyráběly na principu hardwaru s otevřenou licencí. Otcem této myšlenky se v roce 2004 stal britský matematik Ardian Bowyer, který tak následně přispěl k ohromnému rozšíření 3D tisku v dalších letech.

V současné době se označení REP–RAP používá pro tiskárny, které vznikly na základě tohoto projektu a jsou do určité míry schopné sami sebe replikovat. Dobrým příkladem takové tiskárny je tuzemská tiskárna Prusa MK3S od dnes již světoznámé značky Prusa Research s.r.o. [11]

1.4 FDM tisk a kvalita

Ve sféře 2D tisku můžete najít tiskárny které uvádějí „600 dpi“ či „1200 dpi“ tento údaj označuje počet „bodů na palec“ při ukládání inkoustu na papír.

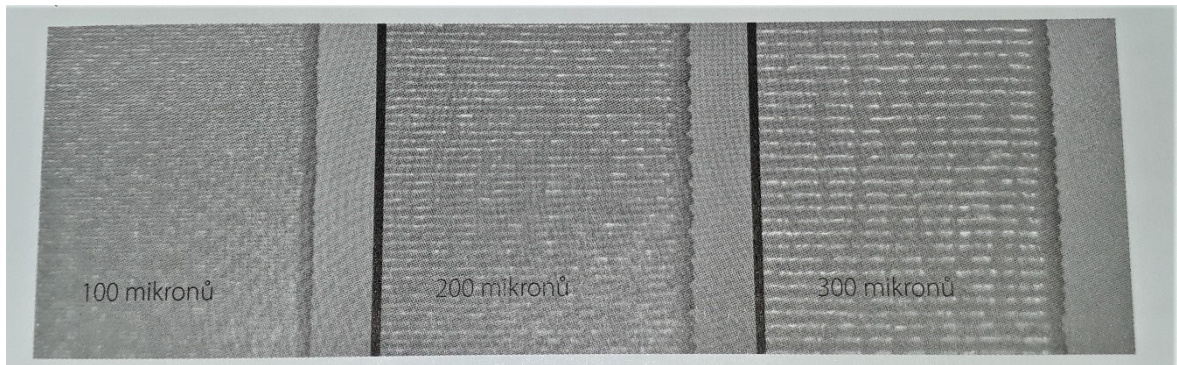
Čím více drobných „inkoustových teček“ je umístěno na jednotce délky, tím je rozlišení vyšší. U 3D tisku je tomu podobně.

Všechny 3D tiskárny (FDM) se vyznačují dvěma odlišnými typy rozlišení. Vrstva Z udává výškové rozlišení ve směru vertikálním.

Další metrikou je přesnost v rovině XY. Určuje, jak dokáže tiskárna vykreslit jednotlivé tvary a vrstvy (při pohledu ze shora). Vzhledem k tomu, že tiskárny FDM využívají nejčastěji trysky 0,6 mm, což znamená 600 mikronů.

Rozlišení v ose Z je nejčastější metrikou, se kterou se u tiskáren FDM setkáme. Jak si můžeme všimnout na obrázku č.4, tři tělesa mají stejnou velikost, ale vznikly v různém rozlišení.

Všechny míry se uvádějí v „mikronech“. Rozlišení přesného tisku, většinou odpovídá hodnotě 200 mikronů. [3]

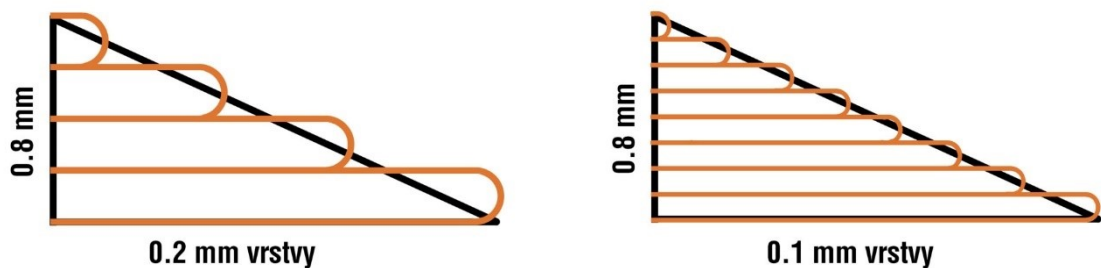


Obrázek 4 Pohled zblízka na tři vrstvy vytištěné postupně (zleva doprava) v rozlišení 100 mikronů, 200 mikronů a 300 mikronů [2]

1.4.1 Faktory ovlivňující kvalitu povrchu

1.4.1.1 Výška vrstvy vs. průměr trysky

Výška vrstvy by neměla přesahovat 80 % průměru trysky. Pokud tedy používáte standardní trysku s průměrem 0,4 mm, maximální výška vrstvy by měla být 0,32 mm. U trysky s průměrem 0,6 mm můžete tisknout až 0,48 mm vysoké vrstvy, viz. obrázek 5.



Obrázek 5 Ukázka odlišné struktury výtisku při rozdílném nastavení šířky vrstvy. [16]

Kromě uvedeného omezení jsou na sobě tyto dvě veličiny víceméně nezávislé. Jejich nastavení má zcela odlišný efekt na tvar, čistotu a pevnost výtisku.

Průměr trysky ovlivňuje množství detailů téměř výhradně v rovině rovnoběžné s podložkou. To znamená, že s menší tryskou budete schopni mnohem detailněji vykreslit například text, pokud je umístěn na horní straně výtisku. Na druhou stranu výška vrstvy ovlivňuje množství detailů na stěnách a šikmých plochách výtisku. Na organicky vypadajících modelech si velmi snadno všimnete jednotlivých vrstev a čím menší výšku vrstvy použijete, tím lepšího výsledku dosáhnete. Naopak u pravoúhlých tvarů nedává moc smysl nastavovat nízkou výšku vrstvy a zbytečně prodlužovat dobu tisku, zlepšení totiž bude zcela minimální.

Výška jedné vrstvy se může pohybovat od 0,05 mm po 0,15 mm u trysky s průměrem 0,25 mm, od 0,07 mm do 0,3 mm u trysky s průměrem 0,4 mm a od 0,15 mm do 0,4 mm u trysky s průměrem 0,6 mm.

Vrstvy nižší než 0,1 mm, například 0,05 a 0,07 mm, se už obecně nedoporučují tisknout, jelikož doba tisku se neúměrně zvyšuje a kvalita povrchu objektu již moc opticky nestoupá.

Též je dobré zmínit, že není vhodné tisknout rádiusy, tiskárna mnohem lépe a čistěji vytiskne úkosy. [15]

1.4.1.2 Vliv výběru šířky trysky a vrstvy na dobu tisku modelu

3D tisk nepatří mezi nejrychlejší výrobní procesy. I pár centimetrů vysoký model může zabrat několik hodin.

Tryska s větším průměrem pokládá širší perimetry, což znamená, že pro dosažení stejné tloušťky stěny jich stačí méně. Větší průměr trysky navíc umožňuje tisknout s vyšší výškou vrstvy. Kombinace těchto dvou faktorů vede ve většině případů k výraznému zkrácení doby tisku.

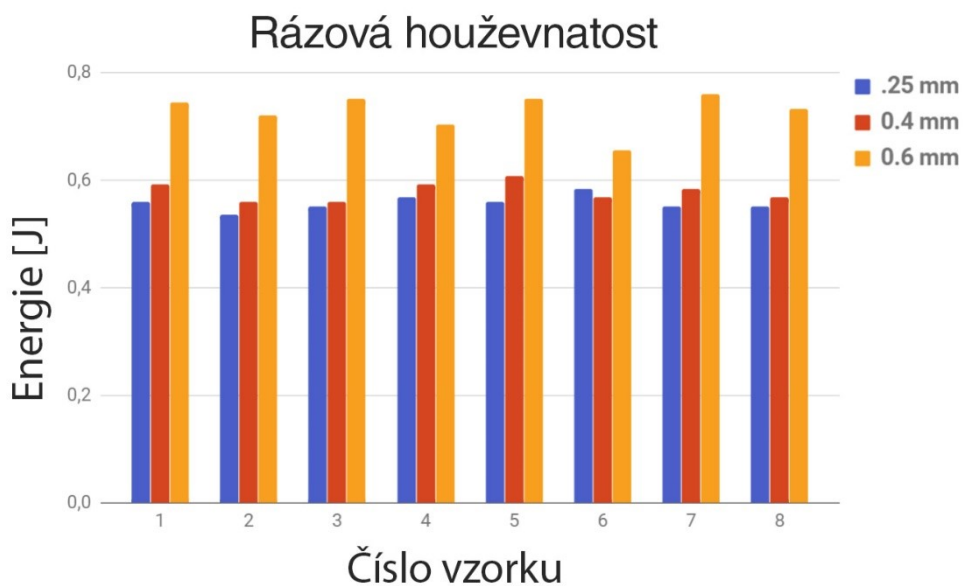


Obrázek 6 Vliv šířky trysky na konečnou velikost výtisku při zachování jednotné výšky vrstvy [17]

Jsou ovšem případy, např. pokud budeme tisknout vázu a zachováme stejnou výšku vrstvy, tedy jen jeden perimetr, nedojde k žádnému zrychlení. V tomto případě musí totiž tiskárna provést stejnou sekvenci pohybů, nezávisle na velikosti trysky. Při tištění větší tryskou budeme mít silnější stěnu, nicméně doba tisku bude téměř totožná. [3]

1.4.2 Vliv šířky trysky na mechanické vlastnosti

Další výhodou použití větších trysek je zvýšená odolnost výtisků. Při Charpyho testu rázové houževnatosti absorbovaly výtisky z 0,6 mm trysky v průměru o 25,6 % více energie než s tryskou 0,4 mm. S tryskou 0,25 mm naopak o 3,6 % méně. Test byl prováděn na deseti vzorcích, minimální a maximální výsledky z každé série byly odstraněny, proto v grafu vidíte hodnoty pro 8 vzorků. [16]



Graf 1 Vliv šířky trysky na rázovou houževnatost zkušebních těles [18]

1.4.3 Stringování

Při stringování dochází k situaci, kdy za sebou tryska nechává tenká vlákna plastu, což má za následek „chlupaté“ výtisky. Ke stringování dochází nejčastěji při tisku složitějších objektů, nebo pokud nejsou správně nastaveny parametry tisku (viz. obrázek 8).

Některé materiály, jako například PET-G nebo pružné filamenty, mohou stringovat i při naprosto správném nastavení tiskárny.

Tento fakt se v praxi řeší většími nájezdy a odjezdy tiskové hlavy po dokončení tiskové vrstvy. Toto nastavení dokáže stringování částečně eliminovat, zbytek se musí odstranit v postprodukci. [3]



Obrázek 7 Výrazně stringovaný výrobek [19]

2 MATERIÁLY PRO FDM 3D TISK

Pro technologie FDM tisku je k dispozici velké množství rozdílných materiálů od řady výrobců v různých cenových kategoriích.

Vesměs se jedná o termoplasty a kompozitní materiály na bázi termoplastu, nejčastěji PLA a nepolymerního plnicího materiálu (např. dřevo, mosazný prášek...).

Tyto plnicí materiály mají především vizuální účel. Méně se promítají do mechanických vlastností výtisku, které mají spíše tendenci snižovat.

Každý výrobce pro svůj materiál uvádí rozsah teplot, při kterých dosahujeme nejlepších mechanických i optických výsledků, zpracovatelské podmínky jednotlivých filamentů se liší v řadách jednotek až desítek stupňů. [9]

2.1.1 PLA (Polylactic Acid – kyselina polyléččná)

PLA je spolu s ABS nejpoužívanějším termoplastickým materiálem pro 3D tisk metodou extruze termoplastu, a to včetně originální FDM technologie. Jde o biologicky odbouratelný polymer vyráběný např. z dextrózy – cukru extrahovaného z biologických surovin, jako je kukuřičný škrob nebo cukrová třtina. Tento biologicky odbouratelný materiál je ve světě velice populární. Teploty zpracování jsou velmi závislé na výrobcu a jeho technologii výroby.

Platí, že ve srovnání s ABS jde o materiál, který je při stejných výchozích podmínkách snadněji a rychleji tisknutelný. Nicméně PLA začíná měknout již při teplotě kolem 60 °C, zatímco referenční ABS až okolo 100 °C.

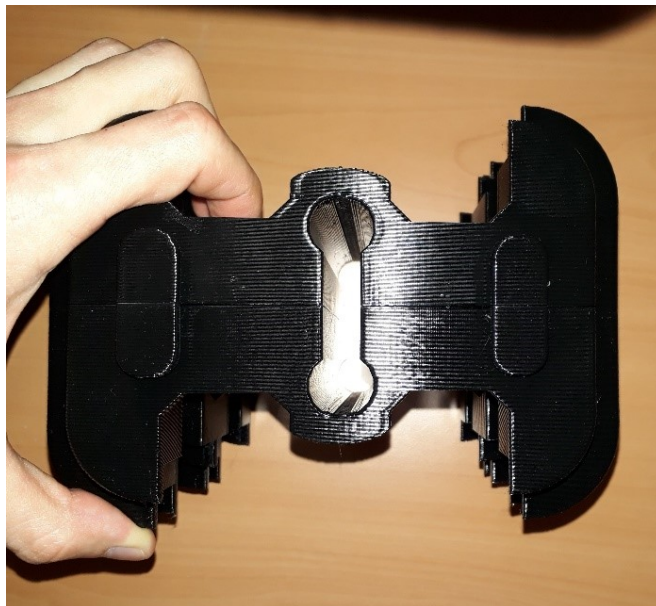
Používá se zejména pro pohledové objekty, nefunkční prototypy a demonstrátory. Jedná se o materiál vhodný i pro velkoformátové tisky. Je tvrdý, křehký s omezenější možností opracování - ruční broušení, vrtání a lakování. Materiál PLA je silně hydrofobní. [9]

2.1.2 PET / PET-G (polyetylén tereftalát–glykol)

PET-G je dokonale transparentní amorfní kopolyester, který vyniká dobrou odolností proti poškození. Je lesklý, tuhý, houževnatý, dle typu odolný proti nízkým i vysokým teplotám.

Jedná se nenasákavý polymer, zdravotně nezávadný, odolný i vůči zředěným roztokům kyselin, zásad, mýdel a solí.

V určitých případech se dá použít jako náhrada za materiál ABS, kdy nás při výrobě velice potěší jeho nižší tepelné smrštění. Při výrobě strun se často barví, čímž ztrácí svou transparentnost. Děje se tak především z důvodů požadavků trhu. [9]



Obrázek 8 Navíjecí šablona pro přípravu vinutí pro rotor generátoru. Funkční výrobek z barveného materiálu PET-G

2.1.3 PC – Polykarbonát

Je nejtvrdší běžně používaný Termoplastický materiál používaný v současné době na tiskárnách typu FDM. Polykarbonát představuje skvělou kombinaci pevnosti, optické transparentnosti a tuhosti.

Má výborné mechanické a dielektrické vlastnosti, konstantní v neobvykle širokém rozmezí teplot (od -70 °C do 140 °C). Dále malou nasákavost, značnou povětrnostní odolnost a transparentnost, rozměrovou stabilitu, chemickou odolnost a snadnou zpracovatelnost.

Je využíván nejčastěji pro tisk transparentních prototypů. Polykarbonát má vynikající UV stabilitu, kterou lze ještě dále zvyšovat s pomocí aditivních UV stabilizátorů. Dalšími přísadami mohou být tepelné stabilizátory nebo aditiva pro zlepšení ESCR (koroze pod napětím). Je využíván hlavně pro tisk transparentních prototypů, pro mechanicky namáhané a funkční díly. [9]

2.1.4 PA / PA 12 (Polyamid - Nylon)

Polyamidy patří mezi nejčastěji používanou skupinu plastů mezi technickými polymery. Je to způsobeno především jejich vynikajícím poměrem vlastností a ceny. Jde o odolný materiál s všestranným použitím.

V tenkých vrstvách je flexibilní při současně vysoké adhezi (přilnutí) mezi vrstvami navzájem. Vyniká nízkým součinitelem tření, kdy ve spojení s vysokou teplotou tání je předurčen k tisku funkčních a technických dílů.

Je ovšem silně hygroskopický, tedy rychle absorbuje vodu.

Nejčastěji k výrobě výtisků používány dva typy Nylonu, a to PA 6 a nověji PA 12. PA 12 má mimo jiné nižší hygroskopické vlastnosti, čímž je nasákavost vodou snížena a pro 3D tisk je tento typ PA výhodnější. [9]



Obrázek 9 Cívky s různě barevnými tiskovými strunami pro tiskárny typu FDM [20]

2.1.5 ASA (akrylonitril–styren–akryl)

ASA (akrylonitril–styren–akryl) je materiál blízký ABS. Jde vlastně o jeho alternativu, která má zvýšenou odolnost proti povětrnostním vlivům, zejména s vynikající odolností proti UV záření. Tento vysoce kvalitní termoplast je předurčen ke konstrukčnímu využití. Má dobrou mechanickou odolnost, tuhost, odolnost proti teplotě. Na 3D tiskárnách je dobře zpracovatelný, hodí se i pro náročné tisky, detaily i malých objektů a má i výborné vrstvení tisknutých předmětů. Má nižší tendenci ke žloutnutí vlivem teploty, což je ku prospěchu zejména u objektů, kde je kladen důraz na vzhled. Vyznačuje se dobrou rozměrovou stabilitou.

ASA má vyšší tuhost než ABS a proto je vhodný i pro tisk náročnějších aplikací, jako např. strojírenské nástroje či koncové výrobky pro venkovní použití. [9]

2.1.6 ABS (akrylonitril–butadien–styren)

ABS (akrylonitril–butadien–styren) patří spolu s PLA mezi nejpoužívanější a nejuniverzálnější tiskové materiály. Zároveň jde o nejpoužívanější technický plast s širokým použitím od domácích potřeb, hraček až po automobilový průmysl.

Jde o odolný amorfnní termoplastický kopolymer, který vyniká dobrou odolností vůči mechanickému poškození. Je tuhý, houževnatý, dle typu odolný proti nízkým i vysokým teplotám, málo nasákavý a zdravotně nezávadný.

Je odolný vůči kyselinám, louhům, uhlovodíkům, olejům, tukům. Zpracovávat ho lze do teploty 280 °C. Smrštění se pak pohybuje mezi 0,3 - 0,7 %.

Materiál se dá i velmi dobře opracovávat, např. broušením či vyhlazováním pomocí acetonových výparů. Možné je i lepení rozpouštědlovými lepidly na bázi toluenu a methylenchloridu a také polyakrylátovými lepidly.

Teplota měknutí se u ABS pohybuje okolo 100 °C. [9]

3 STATISTIKA A STATISTICKÉ VYHODNOCOVÁNÍ

Statistika se zabývá zpracováváním, zjišťováním, rozbořem a hodnocením určitých jevů shromažďovaných za určitým účelem. Můžeme takto shromažďovat a vyhodnocovat údaje za účelem např. popisu rozsáhlých souborů, nebo nalezení a odstranění rušivých odchylek souboru.

Odchylky souboru dat jsou jevy, které nám způsobují chyby a nepřesnosti ve vyhodnocování dat. Jsou způsobeny povětšinou veličinami náhodného charakteru a lidského faktoru.

Pro vyhodnocování souborů dat používáme mnohé matematické i popisné funkce. Ty, které budeme využívat při vyhodnocení dat v praktické části bakalářské práce, si dále představíme.

V této práci se budeme setkávat s funkcemi a hodnotami normálního rozdělení. [6]

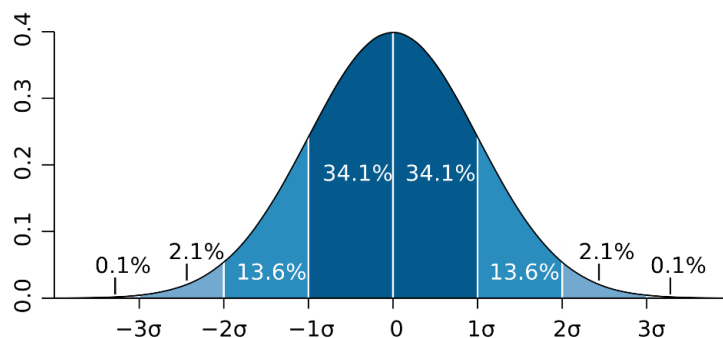
3.1 Gaussovo (normálové) rozdělení

Normální rozdělení popisuje vlastnosti veličiny vznikající složením různých náhodných vlivů, kterých je velký počet, jsou navzájem nezávislé a každá ovlivňuje výsledek pouze minoritně.

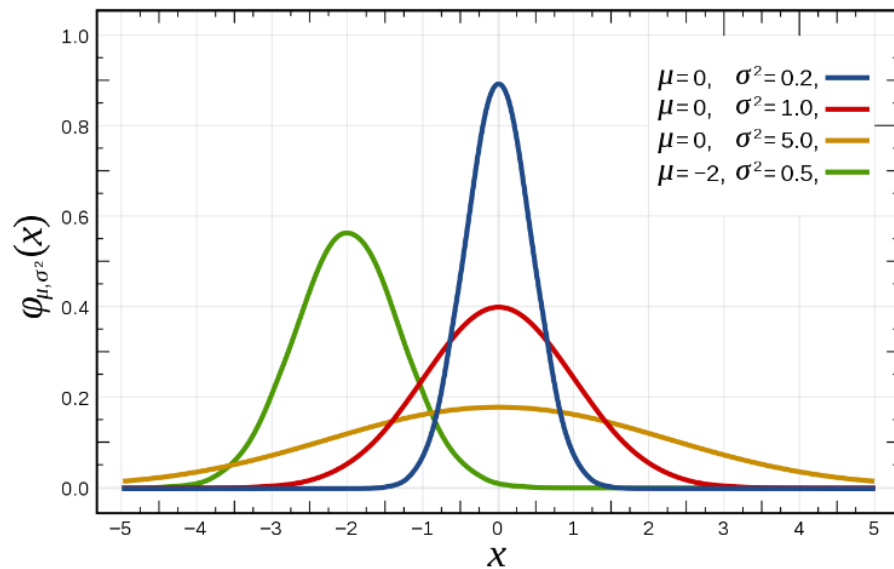
Hustota pravděpodobnosti tedy mívá tvar:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

Funkce $f(x)$ je symetrická vůči poloze maxima $x=\mu$, které odpovídá současně i střední hodnotě náhodné proměnné.



Graf 2 Gaussovo normální rozdělení [14]



Graf 3 Gaussovo normální rozdělení [14]

S rostoucí hodnotou σ se křivka rozšiřuje a klesá její funkční hodnota v maximu v souladu s požadavkem, aby plocha pod křivkou zůstávala jednotková. Roste tak rozptyl hodnot. Hodnota σ se proto nazývá směrodatná odchylka. [6]

3.2 Aritmetický průměr

Střední hodnota (aritmetický průměr) je definována jako součet všech hodnot náhodné proměnné x_i dělený počtem hodnot. Vypočtený průměr pak udává, jaká stejná část z úhrnu hodnot sledované číselné proměnné připadá na jednu jednotku souboru (jednoho jedince). [6]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

3.3 Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka je v teorii pravděpodobnosti a statistice často používanou mírou statistické disperze (vlnění). Jedná se o kvadratický průměr odchylek hodnot znaku od jejich aritmetického průměru.

Zhruba řečeno vypovídá o tom, jak moc se od sebe navzájem liší typické případy v souboru zkoumaných čísel. Je-li malá, jsou si prvky souboru většinou navzájem podobné, a naopak velká směrodatná odchylka signalizuje velké vzájemné odlišnosti. Směrodatná odchylka je nejužívanější míra variability. [7]

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

3.3.1 Směrodatná odchylka výběru

Pro skutečný výpočet odhadu směrodatné odchylky na empiricky zjištěné řadě čísel (tento odhad se nazývá výběrová směrodatná odchylka a jedná se o odmocninu z výběrového rozptylu) lze použít následující postup: [7]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

Potom výběrová směrodatná odchylka těchto dat může být vypočítána jako

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

Pro praktické výpočty se častěji používá ekvivalentní vzorec

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - N\bar{x}^2 \right)} \quad (6)$$

3.4 Grubbsův test

Grubbsův test se používá pro objektivní vylučování extrémních hodnot na základě vypočteného testovacího kritéria u souborů dat, které odpovídají Gaussovu normálnímu rozdělení sledované náhodné veličiny.

Seřadíme hodnoty výběrového souboru do vzestupné variační řady.

Vypočteme aritmetický průměr \bar{x} a směrodatnou odchylku S ze všech hodnot souboru.

Vypočítáme testovací kritérium pro první, případně poslední, n -tou hodnotu variační řady (podle toho, který je nejodlehlejší):

$$T = \frac{x_{(l)} - \bar{x}}{s} \quad (7)$$

Vypočtené testovací kritérium porovnáme s tabulkovou kritickou hodnotou pro příslušné n výběrového souboru a zvolenou α pro Grubbsův test (viz Tabulky: Kritické hodnoty $T_n; \alpha - T_1; \alpha$ pro Grubbsův test):

Pokud $T_1(n, \alpha) > T_{krit}$. T první (případně poslední) hodnotu variační řady vyloučíme ze souboru a musíme vypočítat nový průměr \bar{x} a směrodatnou odchylku bez této vyloučené hodnoty.

Pokud $T_1(n, \alpha) \leq T_{krit}$. T první (poslední) hodnota variační řady patří do souboru a vyloučit ji nemůžeme, není extrémní hodnotou. [7]

3.5 Lineární regrese

Lineární regrese je matematická metoda používaná pro proložení souboru bodů v grafu přímkou. Lineární regrese představuje aproximaci daných hodnot přímkou metodou nejmenších čtverců. Pokud tuto přímkou vyjádříme rovnicí, jedná se o nalezení optimálních hodnot koeficientů. [7]

Lineární regrese nejčastěji počítáme pomocí excelovské funkce:

LINREGRESE(DataY;DataX;TYP;Parametr)

Výstup funkce se následně zobrazuje:

(odhad parametru b)	(odhad parametru a)
(odhad chyby parametru b)	(odhad chyby parametru a)
(koeficient determinace*)	(chyba odhadu)
F (F-statistika)	df (počet stupňů volnosti)
St-Sr (rozdíl celkové a reziduální sumy čtverců odchylek)	Sr (reziduální suma čtverců odchylek)

4 PORÉZNÍ STRUKTURY

Odlehčovací nebo též porézní struktury používáme u výrobků především z důvodů úspory hmotnosti a materiálů, při zachování požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností.

Porézní struktury dělíme dle čtyř parametrů na průchozí, neprůchozí a na geometricky definovatelné a nedefinovatelné.

Průchozí struktury jsou takové, kterými může proudit kapalina nebo jiné medium. Tyto struktury se také používají při výrobě aditivních technologií DMLS (Direct Metal Laser Sintering), kdy se po „vytištění“ výrobku vysype zůstatek výrobního materiálu. Nejběžnější průchozí strukturou používanou v 3D tisku termoplastů je struktura zvaná Gyroid, viz. obrázek č.10.



Obrázek 10 Geometricky definovaná porézní struktura typu Gyroid

Geometricky nedefinovatelné struktury jsou takové, které se skládají z náhodného shluku otevřených i uzavřených dutin. Na rozdíl od nich, je struktura geometricky definovaných struktur jasně daná, nejčastěji 3D modelem. Tyto struktury si navrhuje konstruktér sám podle aplikace a potřebných mechanických vlastností. V současné době se upouští od individuálního navrhování struktur a v průmyslu se především používají některé již definované struktury, např. plástev, mřížová struktura nebo již zmíněný Gyroid. [3] [21]

Díky tomu, že geometricky definované struktury mají jasnou a pevně danou typografii lehčení, setkáváme se s nimi při odborné aplikaci nejčastěji. Tato stejnorodost nám zaručuje konstantní mechanické vlastnosti a můžeme vybírat struktury dle potřebných aplikací.

Porézní struktury se dají rozlišovat podle typu matrice, které specifikují umístění jednotlivých buněk, což jsou základní stavební prvky matrice. Můžeme dělit matrice na ty, které jsou s buňkami jednoduše tvarovanými, složitě tvarovanými a velmi složitě tvarovanými, při kterých se vědci často inspiroují přírodou.

Spojením složitých topologických struktur a aditivní výroby získáme produkt, který bude mít propracovaný charakter vlastností, hospodárnou výrobu, zkrácený výrobní čas, úsporu materiálu a energie apod. [22] [23]



Obrázek 11 Pilotní vzorky tří typů struktur, se kterými se dále se-
tkáme v této práci. Technologie výroby FDM, materiál PLA.

5 MECHANIKA PLASTŮ

Pro praktické využití plastů a výrobků vyrobených technologií RP je důležité určit jejich mechanickou charakteristiku. K tomu nám slouží zkoušky mechanických vlastností. Jedná se o zkoušku tahem a ohybem. Zkouška tahem vychází z normy ČSN EN ISO 527 Plasty - Stanovení tahových vlastností, při níž jsou ze závislosti napětí/poměrné prodloužení, stanovovány hodnoty modulu pružnosti při tahovém namáhání, meze pevnosti v tahu a dalších napěťových a deformačních charakteristik. Zkouška na ohyb se řídí normou ČSN EN ISO 178 Plasty - Stanovení ohybových vlastností, která slouží ke stanovení modulu pružnosti v ohybu, pevnosti v ohybu a dalších charakteristik za daných podmínek.

Tyto statické zkoušky se aplikují u všech technických materiálů a slouží k získání základních informací pro určení vhodnosti materiálů a technické výpočty. [8]

5.1 Zkouška na ohyb

Ohybová zkouška nám předkládá důležité informace o chování materiálu v ohybu, které patří mezi jedno z nejběžnějších namáhání (mosty, nosníky, obkladové materiály, střešní konstrukce apod.).

Zkouška stanovuje modul pružnosti materiálů, u kterých to není možné s přesností určit pomocí tahové či tlakové zkoušky. Při namáhání v ohybu je napětí rozloženo ve zkušební vzorku tak, že je maximální v krajních vrstvách a nulové uprostřed. [24]

Maximální napětí se definuje

$$\sigma_+ = \frac{M_0 \cdot h_+}{I}, \sigma_- = \frac{M_0 \cdot h_-}{I} \quad (8)$$

Kde:

M_0 ...je ohybový modul

I ... je momentem setrvačnosti plochy průřezu zkušebního tělesa vzhledem k neutrální ose

h_+ ... je tloušťka materiálu v tahové oblasti od neutrální osy

h_- ... je tloušťka materiálu v tlakové oblasti

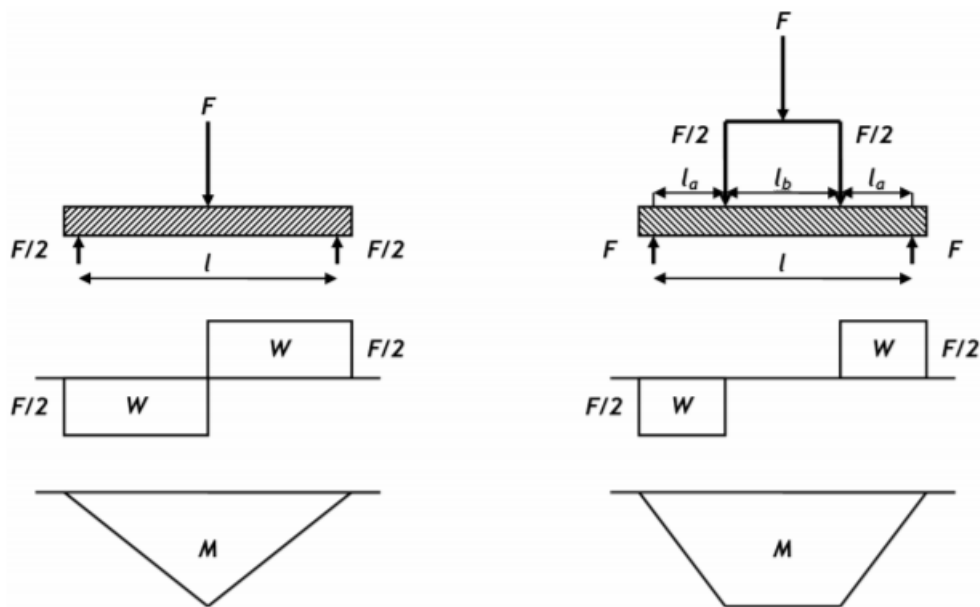
Dosažením poměru $I/h = W$ dostáváme rovnici napětí v ohybu

$$\sigma_y = \frac{M_0}{W} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

Kde:

W ...je modul průřezu

K ohybovým zkouškám se používají zkušební tělesa tvaru nosníku, která se umístí na dvě podpěry ve vzdálenosti dle normy ČSN EN ISO 178 (640607). Síla působící na těleso potom působí uprostřed mezi podpěrami (třibodový ohyb) anebo je rozdělena na dvě stejně velké síly působící v určité vzdálenosti od podpěr (čtyřbodový ohyb). [8]



Obrázek 12 Třibodový (vlevo) a čtyřbodový systém ohybové zkoušky [21]

Pokud dojde k porušení tělesa při maximálním ohybovém momentu, pevnost ohybu se počítá dle následujícího vzorce.

$$\sigma_y = \frac{M_{max}}{W} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

Pro třibodový ohyb a těleso válcového tvaru se ohybový moment a pevnost ohybu spočítá.

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot d \text{ [mm}^3\text{]} \quad (11)$$

$$\sigma_y = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{F_{max} \cdot l}{d^3} \text{ [MPa]} \quad (12)$$

Ohybovou zkoušku lze využít i ke stanovení modulu pružnosti, zejména u polymerů s malou tažností. V oblasti elastických deformací platí, že prohnutí je přímo úměrné síle a délce podpěr a nepřímo úměrné pružnosti a momentu setrvačnosti.

$$y = \frac{F \cdot I^3}{48 \cdot E_y \cdot I} [mm] \quad (13)$$

$$E_y = \frac{F \cdot I^3}{48 \cdot I \cdot y} = \frac{I^3}{48 \cdot I} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta y} [MPa] \quad (14)$$

Pro válcový průřez dále:

$$E_y = \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot \frac{F \cdot I^3}{d^4 \cdot y} [MPa] \quad (15)$$

Modul pružnosti se stanovuje tak, že se vytyčí průhyby při různých zatíženích a ze směrnice závislosti zatěžovací síly a odpovídajícího prohloubení se odečte hodnota modulu. [8] [24]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této práce bylo charakterizovat ohybové vlastnosti vybraných porézní struktur, tisknutých na FDM 3D tiskárně. Struktury byly vytisknuty ze základního konstrukčního plastu typu ABS. O ohybovou zkoušku se postaral univerzální zkušební stroj Zwick 1456. Výsledné naměřené hodnoty byly nadále zpracovány a porovnávány.



Obrázek 13 Univerzální zkušební stroj Zwick 1456 [12]

7 POUŽITÝ MATERIÁL

Jako materiál posloužil konstrukční plast ABS od firmy Fillamentum z Hulína (Česká Republika), dodaný ve formě navinuté struny šířky $1,75 \pm 0,05$ mm, barvy bílé a natural.

Důležité specifikace materiálu dle materiálového listu:

Hustota: $1,08 \text{ g/cm}^3$

Pevnost v ohybu: 57 MPa

Modul pružnosti v ohybu: 1900 MPa

Rozpouštědlo: Aceton

Teplota tisku: 220 - 240 °C

Teplota podložky: 80 - 105 °C

Kompatibilní adheziva: Lepící tyčinky viz. obrázek, 3DLACK [25]



Obrázek 14 Ukázka jedné zbylé špulky materiálu použité na výrobu zkušebních těles. Napravo od ní leží lepící tyčinka značky Kores.

8 TISK VZORKŮ, TISKOVÉ PODMÍNKY A PŘÍPRAVA NA ZKOUŠKU OHYBEM

8.1 3D Tiskárna a Slicovací program

Tisk zkušebních vzorků byl proveden na FDM 3D tiskárně MK3S, jako Slicovací program nám posloužil PrusaSlicer. Oba výrobky jsou z produkce české společnosti Prusa Research.

8.2 Tiskové podmínky

ABS oplývá velkým teplotním smrštěním, proto je potřeba ho tisknout v uzavřeném boxu, ve kterém se po dobu tisku bude udržovat konstantní teplota. K tomuto účelu nám posloužil box z Lack stolku zakrytovaný průhledným plexisklem o tloušťce 4 mm. Toto jednoduché řešení umožnilo udržet konstantní tiskovou teplotu 45 °C.

8.2.1 Délka tisku

Abych omezili možnou zmetkovitost vlivem vady tiskárny, výpadku proudu, případně výrobní chyby materiálu, byly výrobky tisknuty po dvou kusových sériích. V tomto režimu byla předpokládaná doba tisku rovna 670 hodinám. Optimalizace technologie tisku a určitá zmetkovitost zaviněná výše zmíněnými vlivy, mi prodloužila dobu zdárného vytištění zkušebních těles o dalších 50 hodin. Celková doba tisku se tedy vyšplhala na 720 tiskových hodin.

8.2.2 Fixace výrobku

S přihlédnutím ke tvaru porézních struktur, jedinou možností tisku bylo umístit tělesa na tiskovou podložku vertikálně.

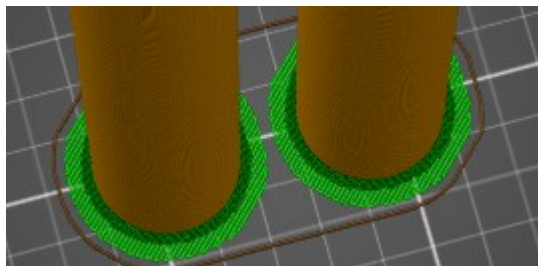
Vzhledem k malé styčné ploše výrobku s podložkou, vyšší tepelné roztažnosti materiálu ABS a pohybu tiskové podložky ve směru ose Y, bylo nutné zkušební tělesa na podložku dodatečně zafixovat.

Výrobky se dají zafixovat na PEI tiskovou podložku několika způsoby. Nejpoužívanějšími jsou spreje 3DLack, které jsou spíše vhodnější pro tisk na skle. Dále můžeme použít ABS-Juice, což je granulát ABS rozpuštěný v acetonu. Tato sloučenina je nanášena na teplou podložku, její adhezní vlastnosti jsou výborné.

Bohužel zahřátý aceton pomalu rozpouští PEI povrch podložky, čímž je tato kombinace v dlouhodobém horizontu naprosto nevhodná. Poslední možností a dle mého názoru pro tisk na PEI podložkách nejvhodnější, je tisk s použitím obyčejného kancelářského tubového lepidla. Tato varianta, ať se zdá jakkoliv úsměvná, zvyšuje přilnavost tisknutého plastu k podložce.

Sama o sobě by, ale ani aplikace lepidla na první vrstvu materiálu nebyla v tomto případě dostačující, proto jsem při vytváření G-codu nechal vygenerovat na styčnou plochu mezi zkušebním tělesem a tiskovou podložkou tzv. raft.

Raft je mezivrstva mezi tištěným objektem a podložkou, která zajistí lepší přilnavost tisknutého objektu k podložce a je výrazně širší než styčná plocha výrobku s raftem. Na obrázku č.16 je raft vyznačen světle a tmavě zelenou barvou. Pro tisk byly použity dvě vrstvy raftu, které spolu s lepidlem zajistily dostatečnou adhezi i při více jak 25 hodin trvajícím tisku.



Obrázek 15 Raft zkušebních těles

8.2.3 Nastavení tiskárny při tisku

Při tisku zkušebních těles bylo nutné zvolit kompromis mezi detailností výtisku a dobou tisku. Jako ideální se ukázala kombinace trysky s průměrem 0,6 mm a výškou vrstvy 0,3 mm. Z informací obsažených v teoretické části víme, že výtisky tryskou o průměr 0,6 mm dosahují vyšší pevnosti a o třetinu kratší doby tisku.

Šířka trysky	0,6 mm
Výška vrstvy	0,3 mm
Teplota trysky	240 °C
Teplota podložky	110 °C

Nastavení raftu a podpěr se řídilo upraveným základním nastavením pro tisk tohoto materiálu. Upraveny byly hodnoty rozteče podpěr, rozteče kontaktních vrstev a hodnoty mezi podpěrami a objektem v ose Z.

Podpěry	
Generovat podpěry:	<input checked="" type="checkbox"/>
Automaticky generované podpěry:	<input checked="" type="checkbox"/>
Mezní úhel převisu:	55 °

Raft	
Vrstev raftu:	2 vrstva(y)

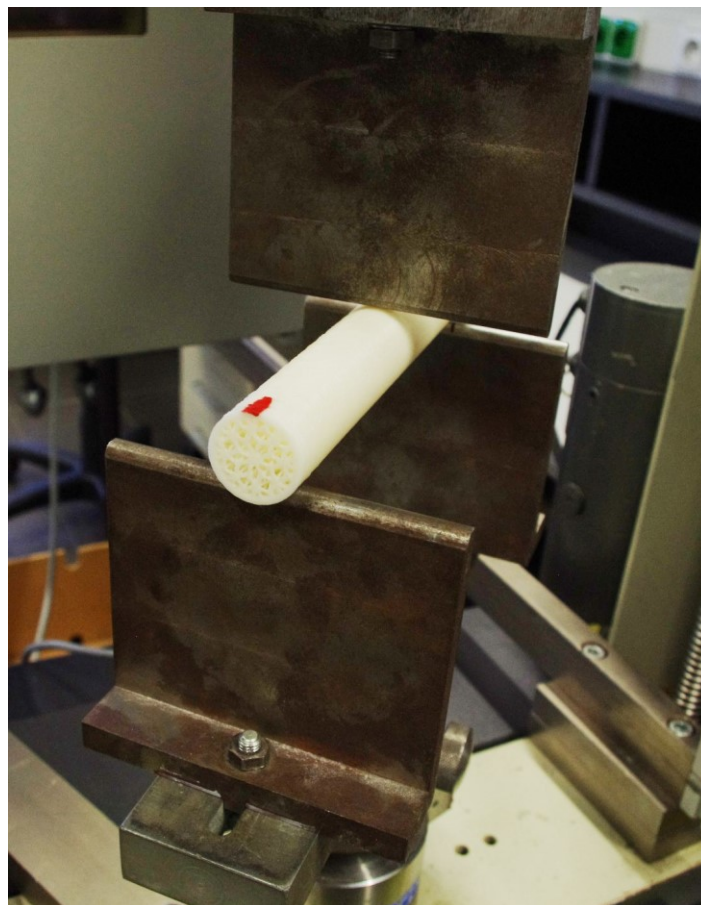
Volby pro podpěry a raft	
Mezera mezi podpěrami a objektem v ose Z:	0 (rozpustné) mm
Vzor:	Přímočará
Rozteč podpěr:	0 mm
Kontaktní vrstvy:	2 vrstva(y)
Rozteč kontaktních vrstev:	0 mm
Pouze na tiskové podložce:	<input checked="" type="checkbox"/>
XY vzdálenost mezi objektem a podpěrami:	80% mm nebo %
Nevytvářet podpěry pod mosty:	<input checked="" type="checkbox"/>

Obrázek 16 Použité nastavení podpěr a raftu v PrushaSliceru

8.3 Příprava na ohybovou zkoušku a parametry ohybové zkoušky

Tělesa byla po vytisknutí sundána z tiskové podložky. Kleštěmi se odstranily zbytky raftu. Červenou barvou byla vyznačena „nulová“ pozice pro ohyb, aby ohybová zkouška všech těles dané struktury proběhla za identického natočení, viz. obrázek 17.

Poté byla tělesa zabalena po pěti kusových sériích, popsána prvním písmenem typu odlehčené struktury, např. S jako struktura Starlit a procentuálním množstvím objemového plnění materiálu, např. 70 %. Následně byly struktury odeslány k otestování na univerzální zkušební stroj Zwick 1456. Rozteč podpěr byla nastavena na 170 mm a posuv $v = 20$ mm/min.

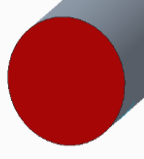
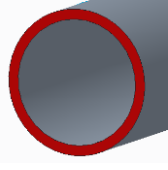
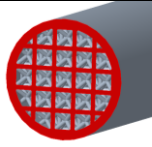
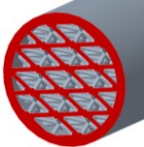
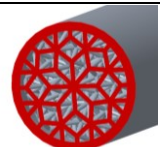


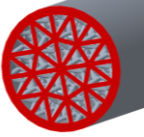
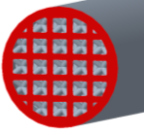
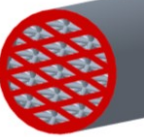
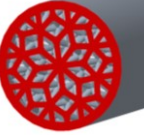
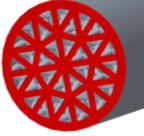
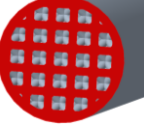
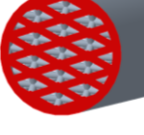
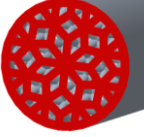
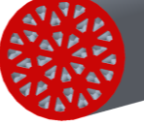
Obrázek 17 Ukázka orientace a rozložení vzorku typu S na zkušebním stroji Zwick 1456

9 TYPY STRUKTUR PRO EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ

Po konzultaci s vedoucím bakalářské práce byly zvoleny čtyři druhy struktur, které se navzájem liší geometrií a rozložením buněk ve struktuře zkušební tělesa. Jednotlivé struktury byly vytvořeny na softwaru PTC CREO 6.0 a následně vygenerovány do rozměrů zkušební tělesa. V tabulce č.1 vidíme tyto struktury spolu s informacemi o objemovém podílu a množství materiálu v mm³.

Tabulka 1 vybrané struktury na experimentální testování v ohybu

Typ/název Struktury	Označení vzorku	Objem materiálu ve vzorku [mm ³]	Objem materiálu ve vzorku vzhledem k plnému válcovému vzorku tzv. „Volume ratio“ [%]	Průřez struktury	Průměr vlákna „Lattice strut“ [mm]
Full volume	V	132 103,9711	100		-
Tube	V ₁	33 929,2	25,68		-
Cartesian	C_44	57 697,779	43,676		1
Rhomboid	R_44	57 165,004	43,71		1
Starlit	S_44	57 186,718	43,29		1

Octagonal	O_44	56 873,371	43,487		1
Cartesian	C_57	75 330,265	57,023		1,4
Rhomboid	R_57	75 675,284	57,284		1,35
Starlit	S_57	76 639,320	57,298		1,4
Octagonal	O_57	74 645,685	57,076		1,4
Cartesian	C_70	93 593,807	70,85		1,8
Rhomboid	R_70	92 701,298	70,08		1,7
Starlit	S_70	92 472,384	70		1.8
Octagonal	O_70	91 179,165	69,72		1.7

10 VÝPOČET OHYBOVÉHO NAPĚTÍ HŘÍDELE

Jak již víme, tato práce se zabývá testováním experimentálních struktur v ohybu. Výsledky ohybové zkoušky na stojí Zwick jsem nadále vložil do vztahu pro výpočet dovoleného ohybového napětí. [24]

$$\sigma = \frac{F_{max} * l}{W_0} = \frac{M_{omax}}{W_0} \leq \sigma_D \quad (16)$$

Kde:

F_{max} *maximální síla*

l *vzdálenost reakcí*

M_{omax} *maximální ohybový moment*

σ *napětí v ohybu*

σ_D *dovolené napětí v ohybu*

W_0 *modul průřezu v ohybu (mění se vzhledem ke geometrii struktury)*

Vzdálenost reakcí l při testování těles byla 170 mm. Modul průřezu v ohybu W_0 jsem zjistil výstupem z konstrukčního programu, viz. tabulka č.2. Pro výpočet byla použita minimální hodnota.

Tabulka 2 Modul průřezu v ohybu W_0

Objemový podíl [%]	W_0 (ze softwaru PTC CREO 6.0)							
	Cartesian [mm ³]		Rhomboid [mm ³]		Starlit [mm ³]		Octagonal [mm ³]	
	min	max	min	max	min	max	min	max
44	1212,29	1517,96	1463,7	1607,28	1260,66	1496,46	1390,69	1611,04
57	1352,12	1679,48	1691,13	1759,98	1578,53	1649,13	1608,98	1805,49
70	1542,77	1829,04	1937,27	1986,89	1773,23	1816,02	1968,59	1942,5

11 VÝPOČTY

11.1 Výpočet minimálního dovoleného ohybového napětí hřídele prvního vzorku struktury Cartesian s objemovým podílem 44%

$$\sigma = \frac{F_{max} * l}{W_0} \leq \sigma_D$$
$$\sigma = \frac{399 * 170}{1212,29} = 55,95196 \text{ N}$$

11.2 Výpočet Grubbsova testu odlehlých hodnot pro Cartesiánskou strukturu s objemovým podílem 44%

Pro výpočet Grubbsova testu odlehlých hodnot potřebujeme testovanou hodnotu, aritmetický průměr ze zkušební vzorku a hodnotu směrodatné odchylky výběrové. Mnou testovaná hodnota je maximální síla, kterou musel zkušební stroj vynaložit pro destrukci zkušebního tělesa.

11.2.1 Výpočet aritmetického průměru testovaného souboru

$$\bar{x} = \frac{295 + 344 + 365 + 393 + 399}{5} = 359,2$$

11.2.2 Výpočet směrodatné odchylky průměru

Výpočet směrodatné odchylky výběru byl proveden přes funkci **smodch.p** v softwaru Excel. Hodnota směrodatné odchylky pro vybraný soubor hodnot je 37,7168.

11.2.3 Grubbsův test pro nejnižší hodnotu z testovaného souboru

$$T = \frac{x_{(i)} - \bar{x}}{s}$$
$$T = \frac{295 - 359,2}{37,7168} = 1,70216$$

Hodnota $T_{krit 0,5}$ pro splnění Grubbsova testu je rovna 1,72. Z toho vyplývá, že těleso, které kladlo nejnižší silový odpor proti zkušebnímu stroji, do měřeného souboru zapadá.

11.2.4 Grubbsův test pro nejvyšší hodnotu z testovaného souboru

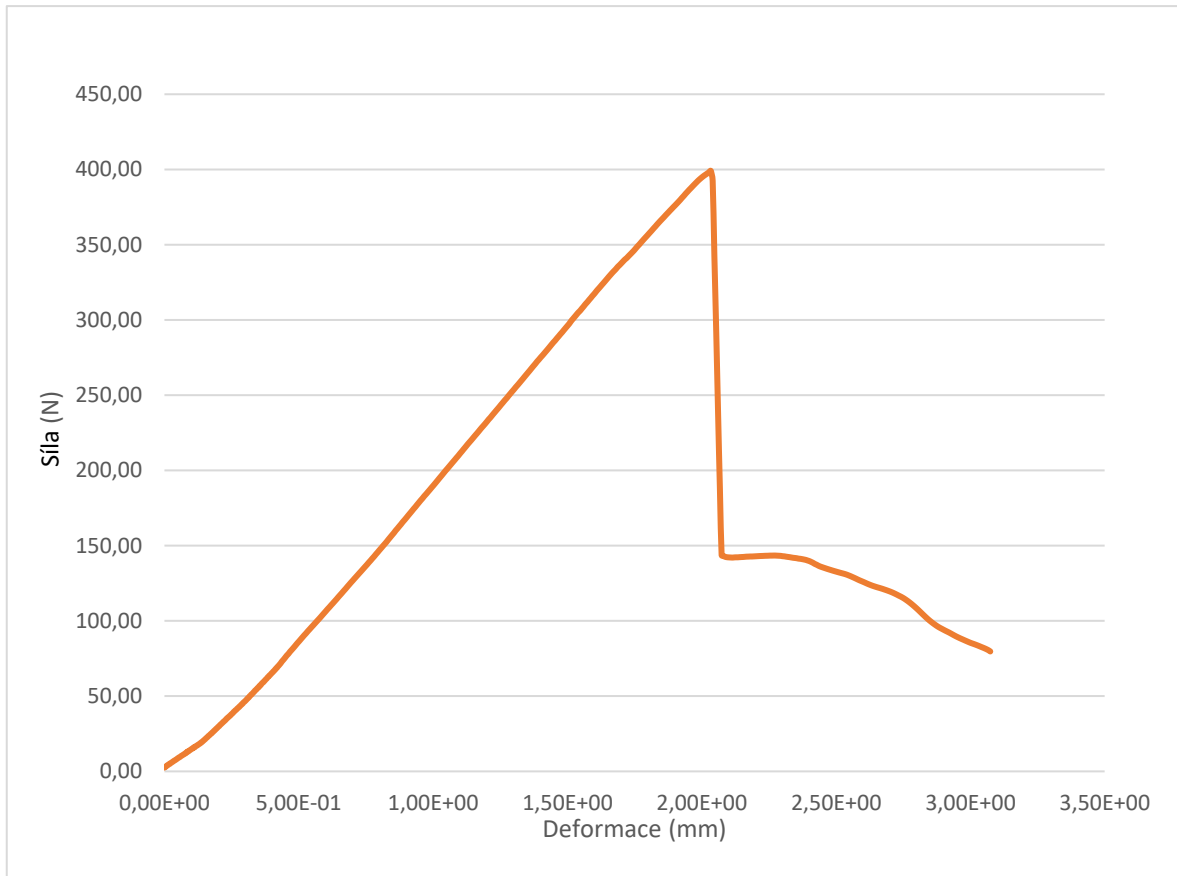
$$T = \frac{x_{(i)} - \bar{x}}{s}$$

$$T = \frac{399 - 359,2}{37,7168} = 1,05523$$

Hodnota $T_{krit 0,5}$ pro splnění Grubbsova testu je rovna 1,72. Z toho vyplývá, že těleso, které kladlo nejvyšší silový odpor proti zkušebnímu stroji do měřeného souboru zapadá.

12 VÝSLEDKY OHYBOVÝCH ZKOUŠEK STRUKTUR A STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

12.1 Vzorky typu C s objemovým plněním 44%



Graf 4 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série C44

Tabulka 3 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série C44

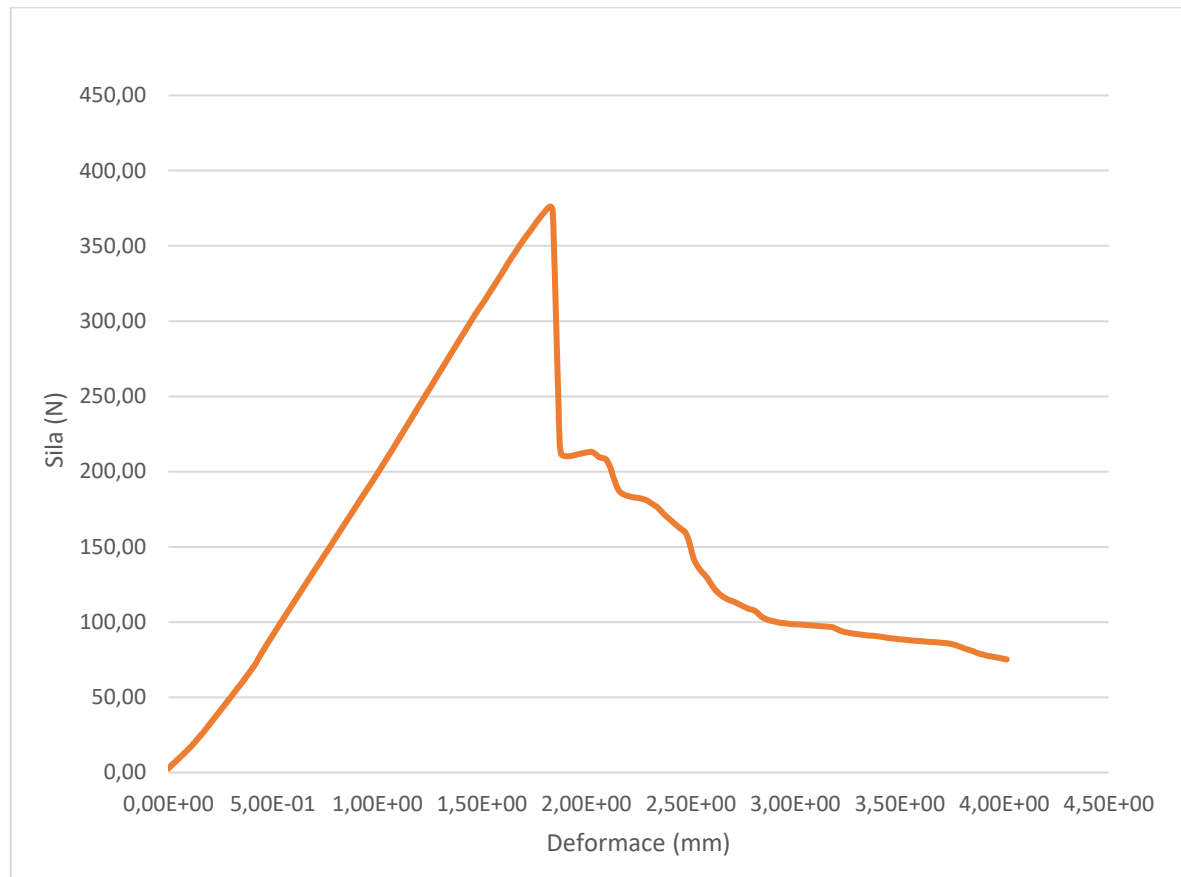
	dL při F{lo max}	dL(kor.) při F	dL při F	F{lo max}	dL lom.	dL lom.	DI lom.	W při F
Nr	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	Nmm
C44.1	2	1,9	0,1	399	3,1	3	2,6	396,97
C44.2	1,7	1,7	0	344	3,1	3	2,7	294,36
C44.3	1,5	1,4	0	295	2,6	2,5	2,1	206,32
C44.4	2,2	2	0	393	3,1	2,9	2,4	399,01
C44.5	1,8	1,7	0,1	365	3	3	2,7	328,67

Tabulka 4 Statistické vyhodnocení pro souhlas vzorků C44

číslo	F{lo max} (N)		Výpočet
1	295	Aritmetický průměr	359,2
2	344	Grubbsův test pro 295 N	1,702157457
3	365	Grubbsův test pro 399 N	1,05523157
4	393	$T_n 0,05$	1,72
5	399	Směr. průměru	37,71683974

Výsledek hodnoty kritéria T u nejvyšší i nejnižší naměřené hodnoty F{lo max} souboru C44, byl nižší než hodnota $T_n 0,05$ pro pětičlenný soubor hodnot. Vybraný soubor hodnot tedy neobsahoval žádnou odlehlou hodnotu.

12.2 Vzorok typu C s objemovým plněním 57%



Graf 5 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série C57

Tabulka 5 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série C57

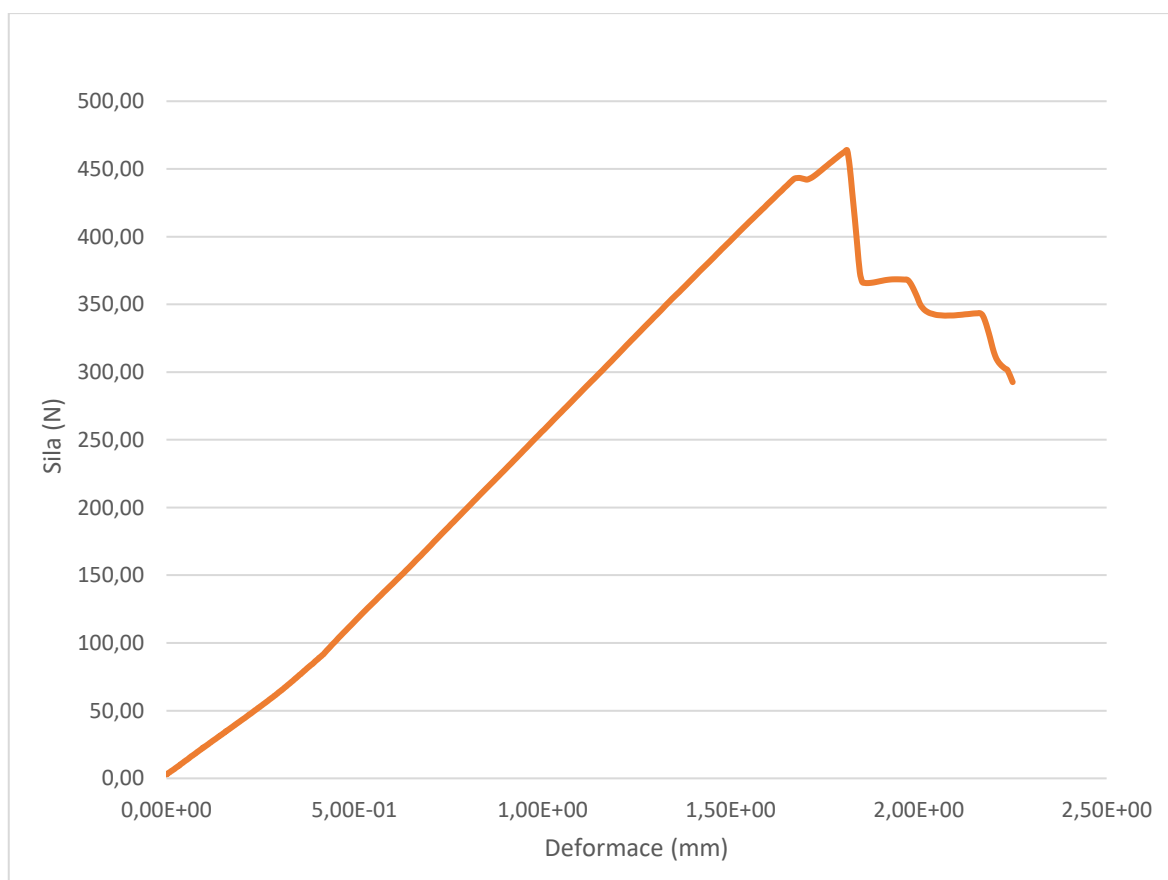
	dL při F{lo max}	dL(kor.) při F	dL při F	F{lo max}	dL lom.	dL lom.	DI lom.	W při F
Nr	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	Nmm
C57.1	1,5	1,5	0	349	1,5	1,5	0	262,6
C57.2	1,9	1,9	-0,1	423	1,9	1,9	-0,1	394,33
C57.3	1,5	1,5	0	366	2,6	2,6	2,2	270,75
C57.4	1,8	1,7	0	376	4	3,9	3,6	334,16
C57.5	1,8	1,7	0	397	1,8	1,7	0	348,82

Tabulka 6 Statistické vyhodnocení pro souhlas vzorků C57

číslo	F{lo max} (N)		Výpočet
1	349	Aritmetický průměr	382,2
2	366	Grubbsův test pro 349 N	1,294900644
3	376	Grubbsův test pro 423 N	1,591323682
4	397	T_n 0,05	1,72
5	423	Směr. průměru	25,63903274

Výsledek hodnoty kritéria T u nejvyšší i nejnižší naměřené hodnoty F{lo max} souboru C57 byl nižší než hodnota T_n 0,05 pro pětičlenný soubor hodnot. Vybraný soubor hodnot tedy neobsahoval žádnou odlehlou hodnotu.

12.3 Vzorky typu C s objemovým plněním 70%



Graf 6 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série C70

Tabulka 7 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série C70

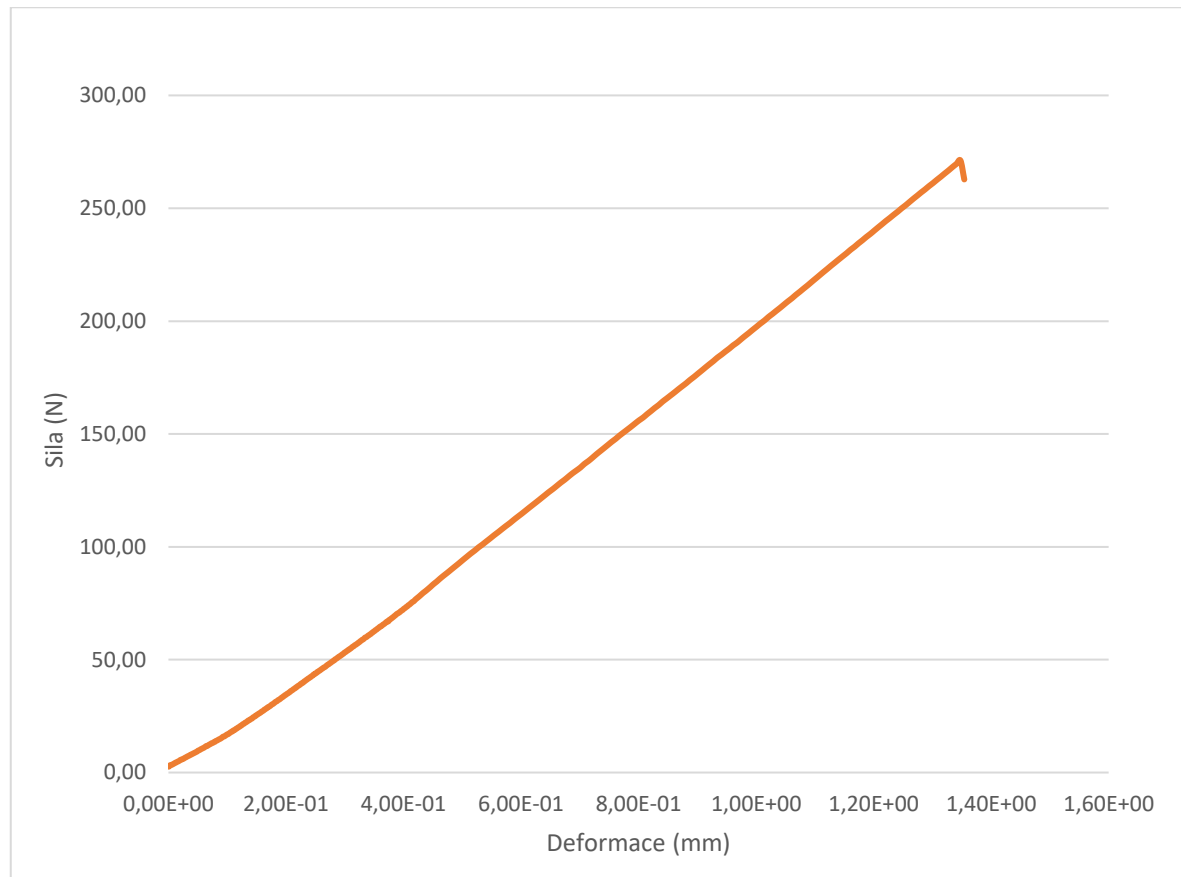
	dL při F{lo max}	dL(kor.) při F	dL při F	F{lo max}	dL lom.	dL lom.	DI lom.	W při F
Nr	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	Nmm
C70.1	1,6	1,5	0	417	2	1,9	0,5	328,92
C70.2	1,8	1,8	0,4	313	2,1	2,1	1,1	320,55
C70.3	1,8	1,7	0,1	464	2,3	2,2	1,1	418,50
C70.4	2,3	2,1	0,1	552	4,6	4,5	4,1	618,52
C70.5	1,8	1,7	0	476	2,3	2,2	1,3	407,86

Tabulka 8 Statistické vyhodnocení pro souhlas vzorků C70

číslo	F{lo max} (N)		Výpočet
1	313	Aritmetický průměr	444,4
2	417	Grubbsův test pro 313 N	1,669395689
3	464	Grubbsův test pro 552 N	1,367024171
4	476	T_n 0,05	1,72
5	552	Směr. průměru	78,71111739

Výsledek hodnoty kritéria T u nejvyšší i nejnižší naměřené hodnoty F{lo max} souboru C70 byl nižší než hodnota T_n 0,05 pro pětičlenný soubor hodnot. Vybraný soubor hodnot tedy neobsahoval žádnou odlehlou hodnotu.

12.4 Vzorok typu R s objemovým plněním 44%



Graf 7 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série R44

Tabulka 9 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série R44

	dL při F{lo max}	dL(kor.) při F	dL při F	F{lo max}	dL lom.	dL lom.	DI lom.	W při F
Nr	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	Nmm
R44.1	0,8	0,8	0	149	5,2	5,2	5	58,72
R44.2	1,3	1,3	0	271	1,4	1,3	0	176,71
R44.3	1,3	1,2	0	259	1,3	1,2	0	162,23
R44.4	1,5	1,5	0	300	2,6	2,6	2,3	231,91
R44.5	1,2	1,2	0	258	2,3	2,3	2,1	152,29

Tabulka 10 Statistické vyhodnocení pro souhlas vzorků R44

číslo	$F\{lo\ max\}$ (N)		Výpočet
1	149	Aritmetický průměr	262,6666667
2	258	Grubbsův test pro 258 N	0,790065707
3	259	Grubbsův test pro 271 N	1,41083162
4	271	T_n 0,05	1,15
5	300	Směr. průměru	5,906681716

Výsledek hodnoty kritéria T u nejnižší naměřené hodnoty $F\{lo\ max\}$ tj. 149 N souboru R44 byl vyšší než hodnota T_n 0,05 pro pětičlenný soubor hodnot. Tato hodnota byla proto vyřazena z testovaného souboru jako hodnota odlehlá a nadále jsem pokračoval s hodnotou 258 N, u které byla hodnota T nižší než určuje testovací kritérium pro čtyři hodnoty.

Výsledek hodnoty kritéria T u nejvyšší naměřené hodnoty souboru tj. 300 N byl vyšší než hodnota T_n 0,05 pro čtyřčlenný soubor hodnot, který má dle statistických tabulek hodnotu 1,48. Tato hodnota byla vyhodnocena jako hodnota odlehlá a nadále jsem pokračoval s hodnotou 271 N.

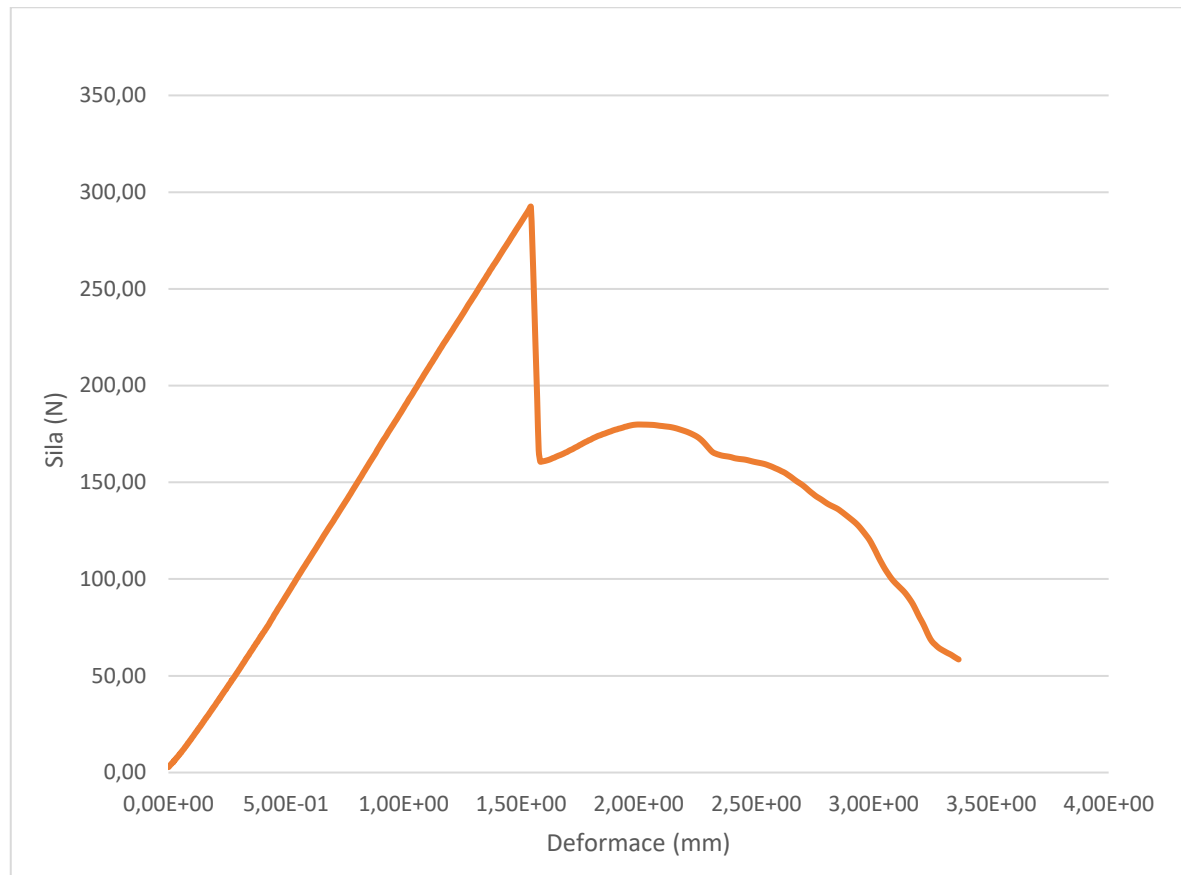
Výsledky tohoto testu si můžeme prohlédnout v tabulce č.10. Zde vidíme, že Grubbsův test vybrané hodnoty nesplňuje tabulkové parametry hodnoty T_n 0,05.

Hodnoty vyřazené ze souboru základních hodnot byly v tabulce č.10 vyznačeny tučnými číslicemi.

Těmito výsledky jsem se dostal do situace, kdy nemůžeme správně vyhodnotit soubor hodnot, jelikož dle Grubbsova testu je velká část hodnot odlehlá. Zatímco u nejnižší naměřené hodnoty tj. 149 N můžu konstatovat, že se zjevně zkušební těleso vytisklo s určitou chybou v porézni struktuře, která zapříčinila výrazně nižší maximální dovolené zatížení, u zkušebního tělesa č.5 toto konstatovat nemůžu.

Abych mohl správně vyhodnotit tento soubor hodnot, bylo by nezbytné rozšířit množství testovaných vzorků ideálně na dvojnásobek.

12.5 Vzoroky typu R s objemovým plněním 57%



Graf 8 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série R57

Tabulka 11 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série R57

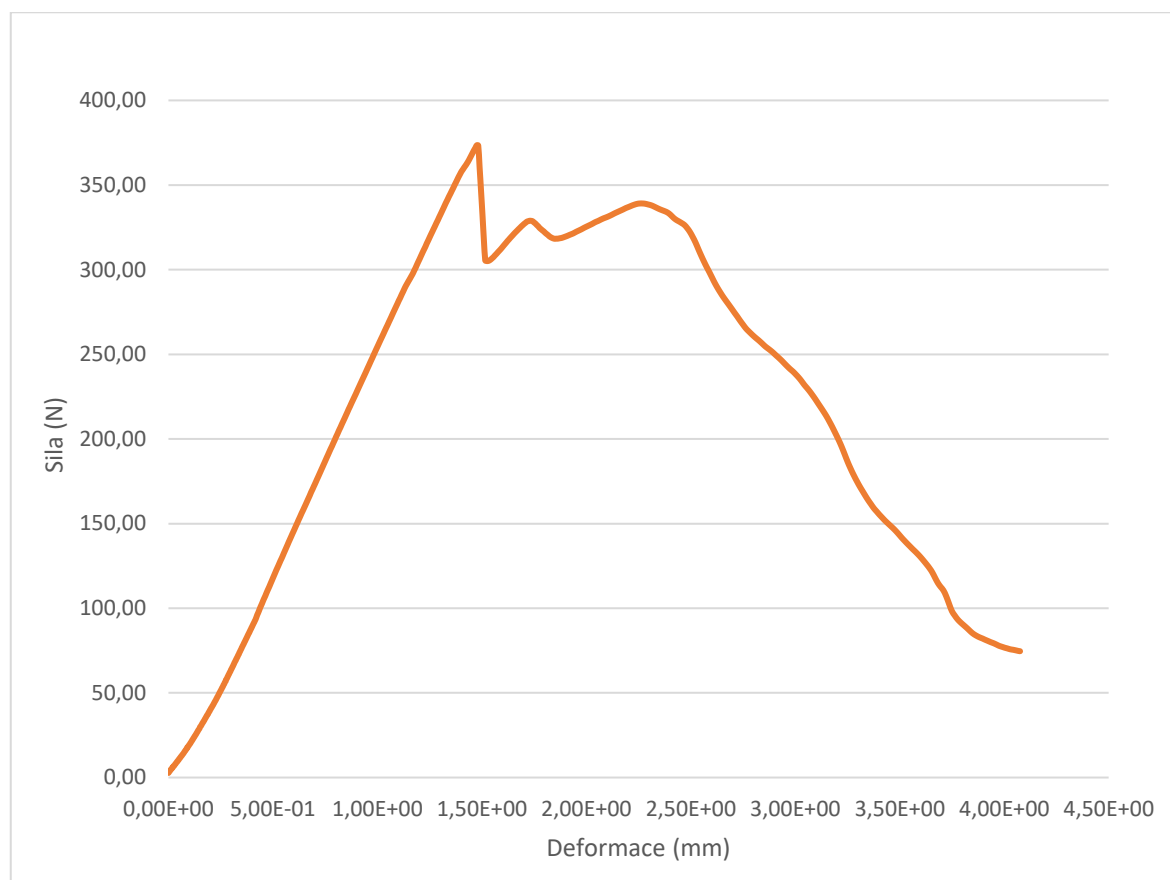
	dL při F{lo max}	dL(kor.) při F	dL při F	F{lo max}	dL lom.	dL lom.	DI lom.	W při F
Nr	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	Nmm
R57.1	1,5	1,5	0	292	3,4	3,3	3	222,67
R57.2	1,4	1,4	0	272	3,7	3,6	3,4	188,03
R57.3	1,7	1,6	0	311	3,6	3,5	3,2	258,18
R57.4	1,6	1,6	0	310	3,4	3,4	3,1	252,8
R57.5	1,5	1,4	0	273	2,9	2,9	2,5	198,4

Tabulka 12 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků R57

číslo	$F\{lo\ max\}$ (N)		Výpočet
1	272	Aritmetický průměr	291,6
2	273	Grubbsův test pro 272 N	1,152861396
3	292	Grubbsův test pro 311 N	1,141097505
4	310	T_n 0,05	1,72
5	311	Směr. průměru	17,00117643

Výsledek hodnoty kritéria T u nejvyšší i nejnižší naměřené hodnoty $F\{lo\ max\}$ souboru R57 byl nižší než hodnota T_n 0,05 pro pětičlenný soubor hodnot. Vybraný soubor hodnot neobsahoval žádnou odlehlou hodnotu.

12.6 Vzorky typu R s objemovým plněním 70%



Graf 9 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série R70

Tabulka 13 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série R70

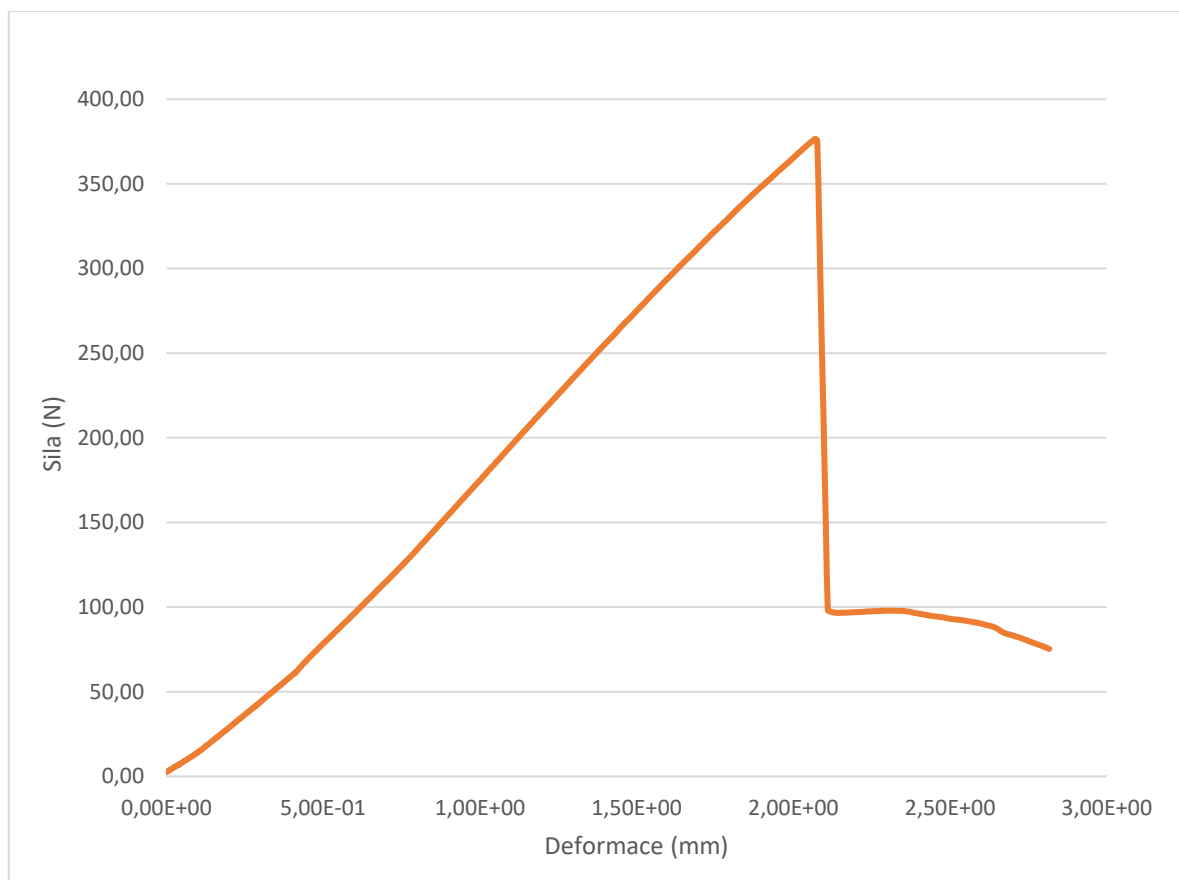
	dL při F{lo max}	dL(kor.) při F	dL při F	F{lo max}	dL lom.	dL lom.	DI lom.	W při F
Nr	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	Nmm
R70.1	1,5	1,4	0	374	4,1	4	3,7	270,69
R70.2	1,2	1,1	0	297	2,1	1,9	1	168,95
R70.3	1,7	1,7	0,5	311	2,5	2,5	2,3	339,08
R70.4	1,7	1,7	0	461	3,5	3,5	3,1	396,26
R70.5	1,8	1,6	0	434	4,1	3,9	3,6	350,88

Tabulka 14 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků R70

číslo	F{lo max} (N)		Výpočet
1	297	Aritmetický průměr	375,4
2	311	Grubbsův test pro 297 N	1,208094073
3	374	Grubbsův test pro 461 N	1,319041488
4	434	$T_n 0,05$	1,72
5	461	Směr. průměru	64,89560848

Výsledek hodnoty kritéria T u nejvyšší i nejnižší naměřené hodnoty F{lo max} souboru R70 byl nižší než hodnota $T_n 0,05$ pro pětičlenný soubor hodnot. Vybraný soubor hodnot neobsahoval žádnou odlehlou hodnotu.

12.7 Vzorky typu O s objemovým plněním 44%



Graf 10 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série O44

Tabulka 15 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série O44

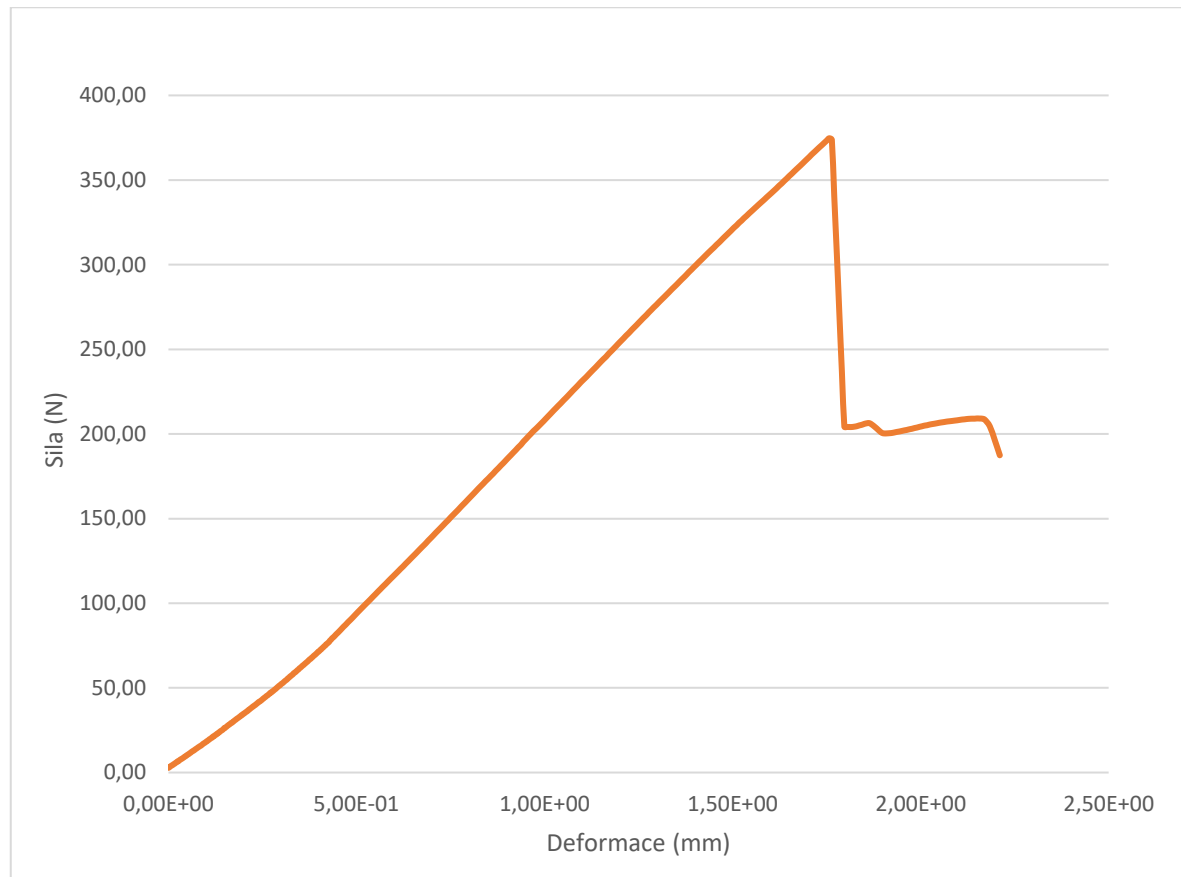
	dL při F{lo max}	dL(kor.) při F	dL při F	F{lo max}	dL lom.	dL lom.	DI lom.	W při F
Nr	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	Nmm
O44.1	1,9	1,8	0	345	3,6	3,6	3,2	323,74
O44.2	2,2	2,1	0,1	401	2,6	2,5	2,1	430,57
O44.3	2	1,9	0	409	2	1,9	0	401,16
O44.4	2,1	1,9	0,1	377	2,8	2,7	2,3	380,81
O44.5	2	1,9	0,1	370	2,7	2,6	2,2	373,22

Tabulka 16 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků O44

číslo	F{lo max} (N)		Výpočet
1	345	Aritmetický průměr	380,4
2	370	Grubbsův test pro 345 N	1,547874731
3	377	Grubbsův test pro 409 N	1,250542862
4	401	T_n 0,05	1,72
5	409	Směr. průměru	22,87006777

Výsledek hodnoty kritéria T u nejvyšší i nejnižší naměřené hodnoty F{lo max} souboru O44 byl nižší než hodnota T_n 0,05 pro pětičlenný soubor hodnot. Vybraný soubor hodnot neobsahoval žádnou odlehlou hodnotu.

12.8 Vzorky typu O s objemovým plněním 57%



Graf 11 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série O57

Tabulka 17 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série O57

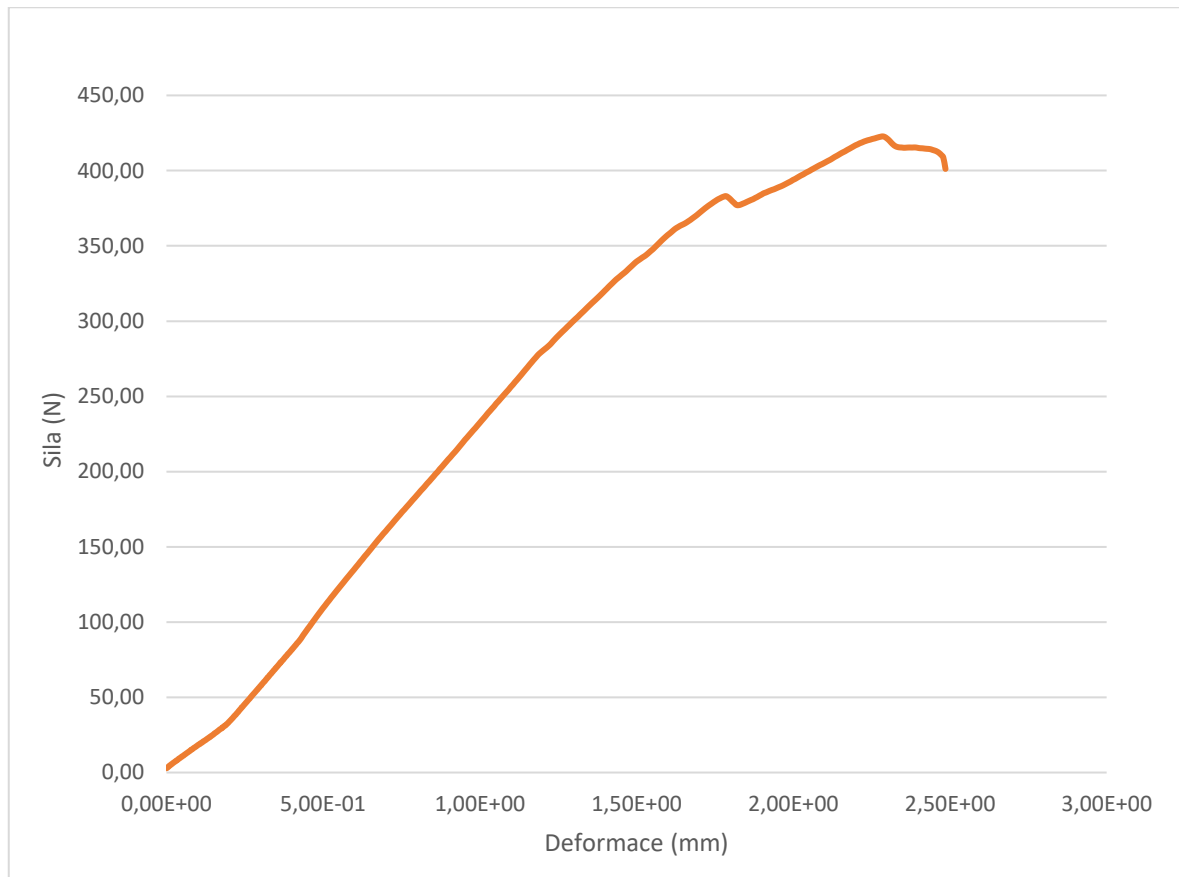
	dL při F{lo max}	dL(kor.) při F	dL při F	F{lo max}	dL lom.	dL lom.	DI lom.	W při F
Nr	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	Nmm
O57.1	1,5	1,5	0	329	2	2	1,4	243,2
O57.2	1,4	1,4	0	303	3,2	3,2	2,9	208,12
O57.3	1,4	1,4	0	313	2	1,9	1,5	216,49
O57.4	1,8	1,8	0	396	1,8	1,8	0	354,27
O57.5	1,8	1,7	0	375	2,2	2,1	1,3	319,83

Tabulka 18 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků O57

číslo	$F\{lo\ max\}$ (N)		Výpočet
1	303	Aritmetický průměr	343,2
2	313	Grubbsův test pro 303 N	1,112485535
3	329	Grubbsův test pro 396 N	1,461175031
4	375	$T_n\ 0,05$	1,72
5	396	Směr. průměru	36,1353013

Výsledek hodnoty kritéria T u nejvyšší i nejnižší naměřené hodnoty $F\{lo\ max\}$ souboru O57 byl nižší než hodnota $T_n\ 0,05$ pro pětičlenný soubor hodnot. Vybraný soubor hodnot neobsahoval žádnou odlehlou hodnotu.

12.9 Vzorky typu O s objemovým plněním 70%



Graf 12 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série O70

Tabulka 19 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série O70

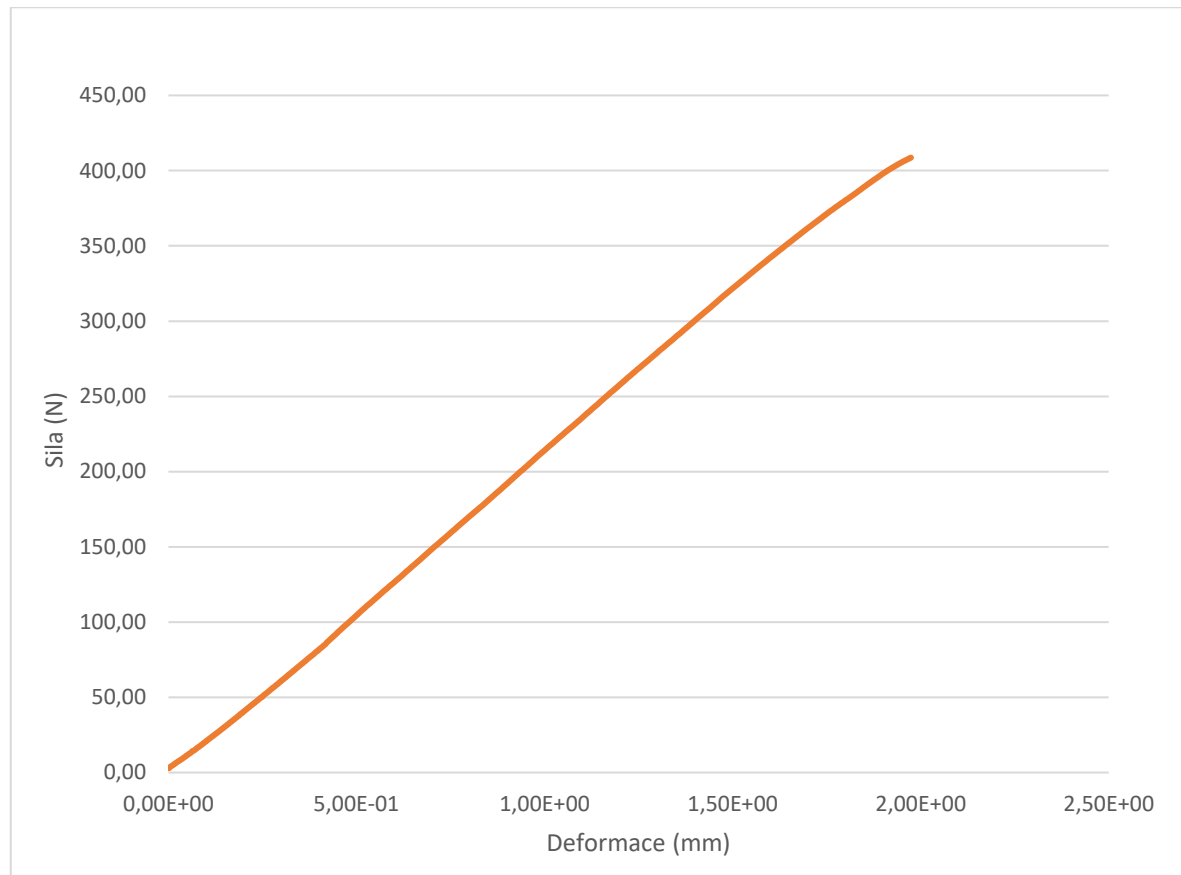
	dL při F{lo max}	dL(kor.) při F	dL při F	F{lo max}	dL lom.	dL lom.	DI lom.	W při F
Nr	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	Nmm
O70.1	2,2	2	0,4	382	2,4	2,2	0,9	455,79
O70.2	1,8	1,8	0,3	390	2,1	2,1	0,8	394,73
O70.3	2,2	2,1	0	507	3,4	3,3	2,9	538,02
O70.4	2,3	2,3	0,5	423	2,5	2,5	0,8	558,07
O70.5	2,1	2	0,1	494	2,3	2,2	0,3	538,9

Tabulka 20 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků O70

číslo	$F\{lo\ max\}$ (N)		Výpočet
1	382	Aritmetický průměr	439,2
2	390	Grubbsův test pro 382 N	1,098587047
3	423	Grubbsův test pro 507 N	1,302171359
4	494	$T_n\ 0,05$	1,72
5	507	Směr. průměru	52,06688007

Výsledek hodnoty kritéria T u nejvyšší i nejnižší naměřené hodnoty $F\{lo\ max\}$ souboru O70 byl nižší než hodnota $T_n\ 0,05$ pro pětičlenný soubor hodnot. Vybraný soubor hodnot neobsahoval žádnou odlehlou hodnotu.

12.10 Vzorky typu S s objemovým plněním 44%



Graf 13 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série S44

Tabulka 21 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série S44

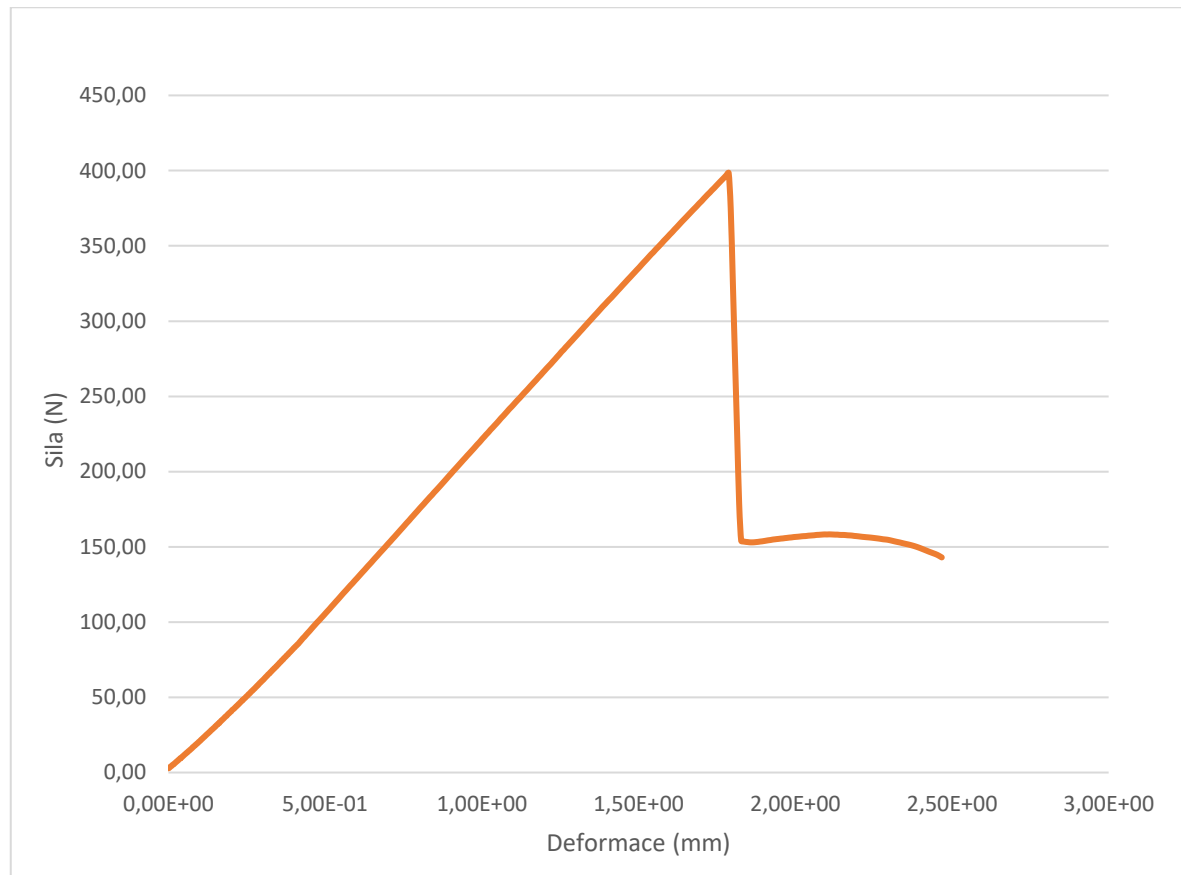
	dL při F{lo max}	dL(kor.) při F	dL při F	F{lo max}	dL lom.	dL lom.	DI lom.	W při F
Nr	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	Nmm
S44.1	1,7	1,7	0	376	1,7	1,7	0,1	325,70
S44.2	1,9	1,9	0,1	429	2	1,9	0,1	424,38
S44.3	2	1,9	0,1	409	2	1,9	0,1	413,80
S44.4	2	1,9	0,1	420	2	1,9	0,1	412,49
S44.5	1,8	1,8	0	389	1,8	1,8	0	350,57

Tabulka 22 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků S44

číslo	$F\{lo\ max\}$ (N)		Výpočet
1	376	Aritmetický průměr	404,6
2	389	Grubbsův test pro 376 N	1,462079033
3	409	Grubbsův test pro 429 N	1,247368126
4	420	$T_n\ 0,05$	1,72
5	429	Směr. průměru	19,56118606

Výsledek hodnoty kritéria T u nejvyšší i nejnižší naměřené hodnoty $F\{lo\ max\}$ souboru S44 byl nižší než hodnota $T_n\ 0,05$ pro pětičlenný soubor hodnot. Vybraný soubor hodnot neobsahoval žádnou odlehlou hodnotu.

12.11 Vzorky typu S s objemovým plněním 57%



Graf 14 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série S57

Tabulka 23 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série S57

	dL při F{lo max}	dL(kor.) při F	dL při F	F{lo max}	dL lom.	dL lom.	DI lom.	W při F
Nr	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	Nmm
S57.1	2,1	2,1	0	460	3,4	3,4	3	478,24
S57.2	1,5	1,5	0	347	2,7	2,7	2,2	263,39
S57.3	1,7	1,6	0	351	2,9	2,8	2,4	286,41
S57.4	1,8	1,8	0	398	2,5	2,4	1,8	352,45
S57.5	2	2	0	450	3,1	3,1	2,7	457,75

Tabulka 24 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků S57

číslo	$F\{lo\ max\}$ (N)		Výpočet
1	347	Aritmetický průměr	401,2
2	351	Grubbsův test pro 347 N	1,139762683
3	398	Grubbsův test pro 460 N	1,236495309
4	450	T_n 0,05	1,72
5	460	Směr. průměru	47,55375905

Výsledek hodnoty kritéria T u nejvyšší i nejnižší naměřené hodnoty $F\{lo\ max\}$ souboru S57 byl nižší než hodnota T_n 0,05 pro pětičlenný soubor hodnot. Vybraný soubor hodnot neobsahoval žádnou odlehlou hodnotu.

12.12 Vzorky typu S s objemovým plněním 70%



Graf 15 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série S70

Tabulka 25 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série S70

	dL při F{lo max}	dL(kor.) při F	dL při F	F{lo max}	dL lom.	dL lom.	DI lom.	W při F
Nr	mm	mm	mm	N	mm	mm	mm	Nmm
S70.1	2,2	2,1	0,6	400	3,8	3,6	3,4	512,48
S70.2	2	2	0,5	468	4,2	4,2	3,9	540,07
S70.3	1,4	1,4	0	397	3,2	3,2	2,9	275,84
S70.4	1,5	1,5	0	430	1,5	1,5	0	319,94
S70.5	2,1	2	0,1	617	3,1	3	2,6	643,17

Tabulka 26 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků S70

číslo	F{lo max} (N)		Výpočet
1	397	Aritmetický průměr	409
2	400	Grubbsův test pro 397 N	0,805387266
3	430	Grubbsův test pro 430 N	1,409427716
4	468	$T_n 0,05$	1,15
5	617	Směr. průměru	14,89966443

Výsledek hodnoty kritéria T u nejnižší naměřené hodnoty F{lo max} souboru S70 byl nižší než hodnota $T_n 0,05$ pro pětičlenný soubor hodnot, takže se nejedná o odlehlou hodnotu. Výsledek hodnoty kritéria T u nejvyšší naměřené hodnoty souboru tj. 617 N byl vyšší než hodnota $T_n 0,05$ pro pětičlenný soubor hodnot. Tato hodnota byla vyřazena ze souboru naměřených veličin a nadále jsem pokračoval s hodnotou 468 N. Výsledek Grubbsova testu pro nový soubor hodnot též překročil hodnotu $T_n 0,05$, činící pro čtyřčlenný soubor hodnotu 1,48.

Nadále byla hodnota 468 N vyřazena ze základního souboru a test pro nejvyšší hodnotu zopakován s hodnotou 430 N. Výsledky tohoto testu jsou v tabulce č.26. Zde je zřejmé, že ani Grubbsův test pro vybranou hodnotu nesplňuje tabulkové parametry $T_n 0,05$. Stejně jako u vzorků typu R 44%, ani zde nejde s jistotou vyhodnotit tento soubor zkušebních těles. Pro přesné vyhodnocení by bylo dobré rozšířit množství testovaných vzorků ideálně na dvojnásobek.

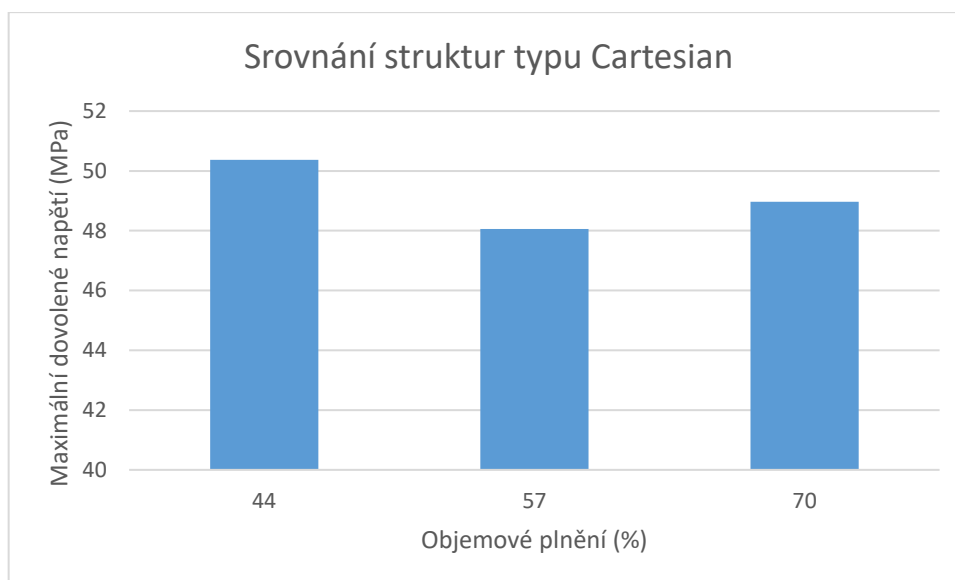
Hodnoty vyřazené ze souboru základních hodnot byly v tabulce č.26 vyznačeny tučnými číslicemi.

13 DISKUZE VÝSLEDKŮ

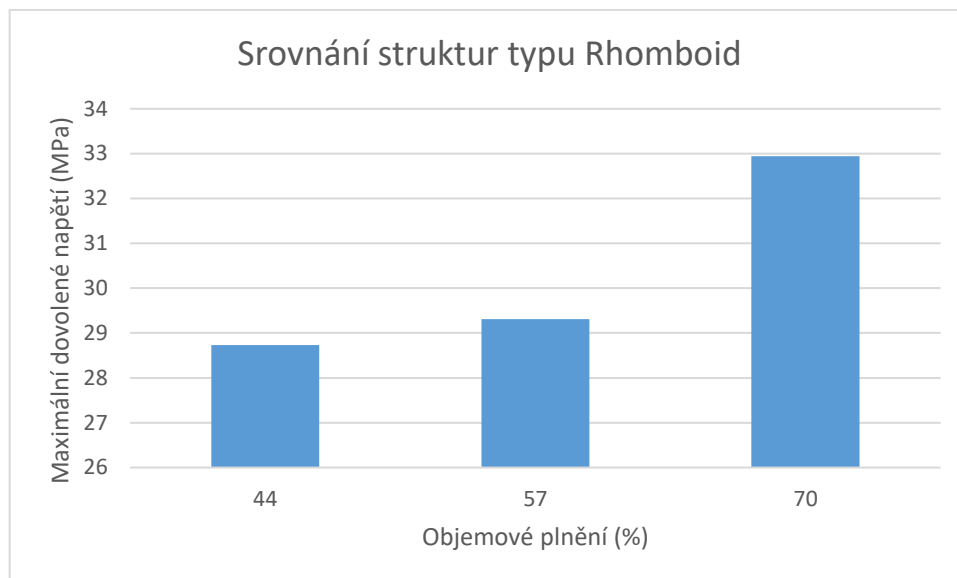
Ohybová zkouška byla provedena pro čtyři typy lehčení. Každá odlehčovací struktura byla nadále zkoumána ve třech objemových plněních. Zkouška byla provedena na celkovém množství 60 vzorků. Naměřené hodnoty byly zpracovány v programu Excel a následně vyhodnoceny spolu s grafy.

13.1 Porovnání struktur dle typu odlehčení

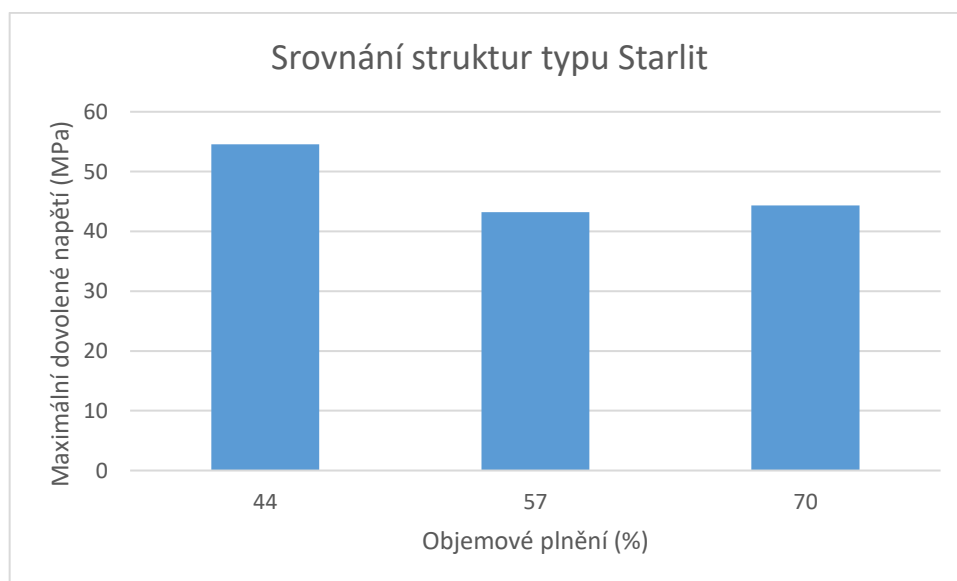
Na níže uvedených grafech můžeme vidět porovnání jednotlivých objemových plnění dle typů struktur. Pro potřeby názorného srovnání užití průměrnou hodnotu z dovoleného napětí měřených vzorků.



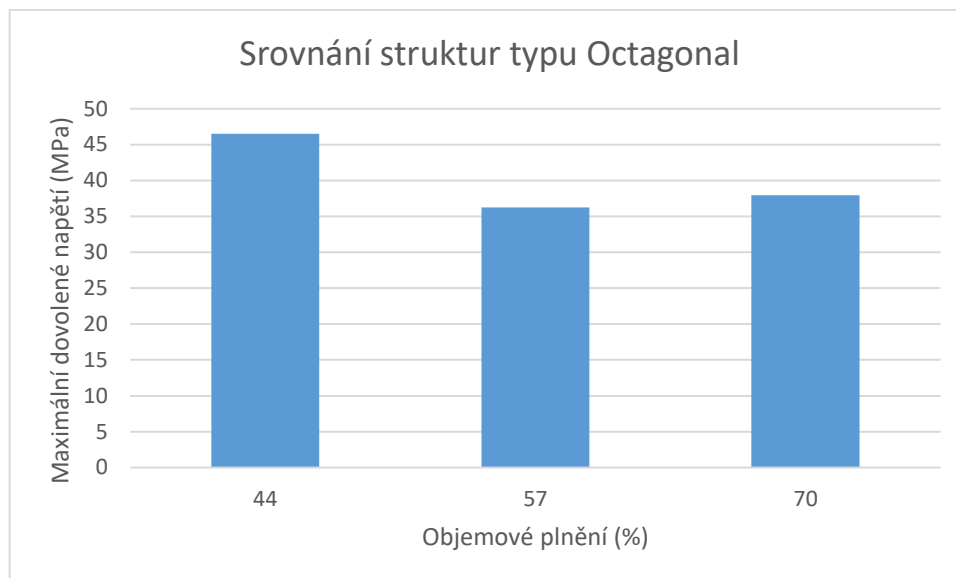
Graf 16 Srovnání minimálního dovoleného napětí objemových plnění struktury Cartesian



Graf 17 Srovnání minimálního dovoleného napětí objemových plnění struktury Rhomboid



Graf 18 Srovnání minimálního dovoleného napětí objemových plnění struktury Starlit



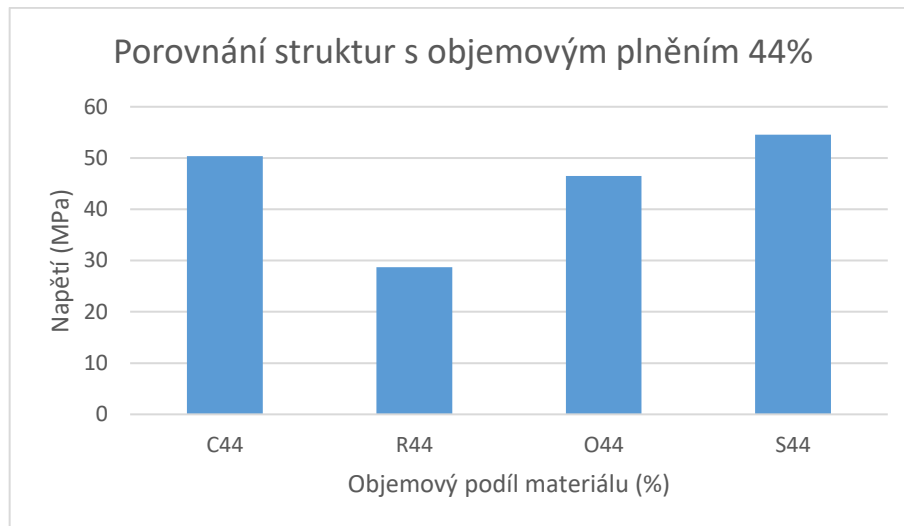
Graf 19 Srovnání minimálního dovoleného napětí objemových plnění struktury Octagonal

Grafy č.16,17,18,19 ukazují, že struktury s objemovým podílem 44 % dokáží přenášet větší napětí než vzorky s plněním 57 % a 70 %. Jediný typ lehčené struktury, u které dokáží přenášet zkušební tělesa s objemovým plnění 70 % nejvíce ohybového napětí, je typ Rhomboid. Tento typ má ovšem výrazně nižší dovolené napětí, než je tomu u ostatních struktur.

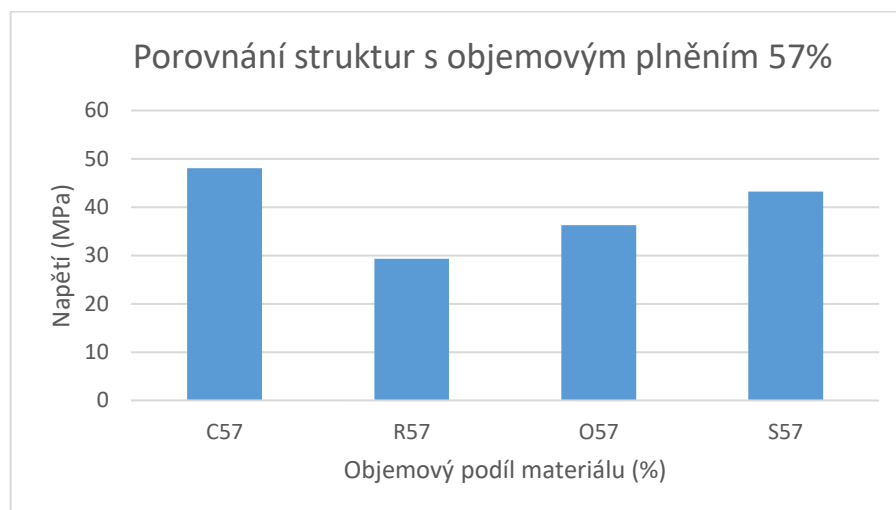
Obecně můžeme zkonstatovat, že struktury s objemovým plněním 44 % typu Cartesian, Starlit a Octagon jsou nejvhodnější pro namáhání ohybem, díky nízkému poměru použitého materiálu ku maximálnímu dovolenému napětí.

13.2 Porovnání souboru struktur podle objemových plnění

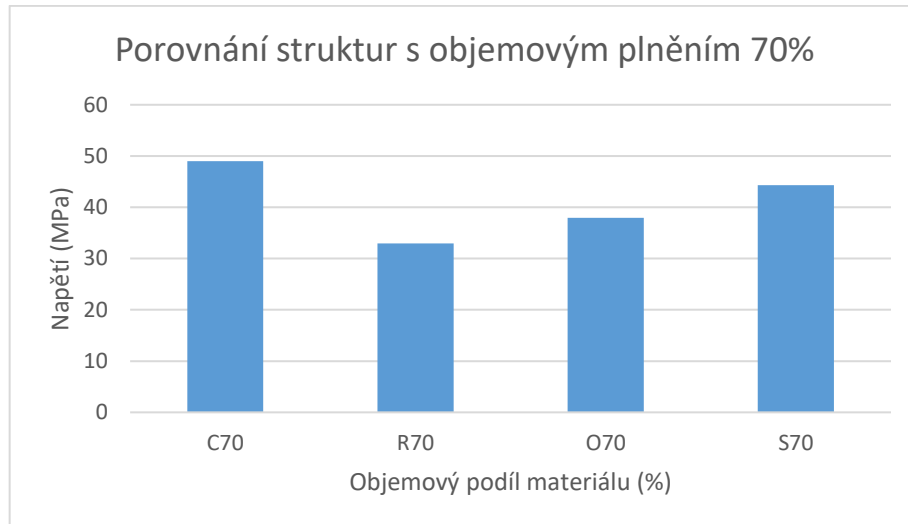
Na grafech níže vidíme porovnání jednotlivých typů porézních struktur dle objemového plnění. Pro potřeby názorného srovnání byla použita průměrná hodnota z dovoleného napětí měřených vzorků.



Graf 4 Srovnání průměrné hodnoty minimálního dovoleného napětí vzorků s objemovým plněním 44 % materiálu.



Graf 5 Srovnání průměrné hodnoty minimálního dovoleného napětí vzorků s objemovým plněním 57 % materiálu.



Graf 6 Srovnání průměrné hodnoty minimálního dovoleného napětí vzorků s objemovým plněním 70 % materiálu.

Výsledky grafů 4,5,6 ukazují, že pořadí jednotlivých struktur se s vzrůstajícím objemovým plněním nemění. Zde je zajímavá část, kdy při objemovém plnění 44 % dokáží vzorky s porézní strukturou Starlit odolat vyššímu zatížení, než vzorky typu Cartesian. Otázkou zůstává, jak by si jednotlivé porézní struktury při tomto objemovém plnění vedly, pokud by bylo testováno např. dvojnásobné množství vzorků.

Obecně můžeme přijmout hypotézu, že vzorky s porézní strukturou typu Cartesian prokazují v poměru k množství materiálu nejvyšší účinnost napříč objemovým plněním.

ZÁVĚR

Cílem mojí bakalářské práce bylo otestovat experimentální atypické odlehčené struktury na ohyb, které byly vyrobeny pomocí technologie FDM z materiálu ABS.

Jelikož je materiál ABS velmi náchylný na smrštění při zahřátí a kolísání okolní teploty, musel jsem vložit tiskárnu do uzavřeného boxu, kde se držela stálá teplota kolem 45 °C. Následně se při tisku těles objevil problém s pádem těles z tiskové podložky před dokončením a tím jejich nenávratné znehodnocení. Tento problém jsem vyřešil přidáním kontaktního materiálu mezi zkušební tělesa a tiskovou podložku, tzv. raft a aplikací adhezní vrstvy lepidla na tiskovou podložku. S těmito úpravami bylo již možné zkušební vzorky zdárně vytisknout. Tisk těles zabral dohromady 720 tiskových hodin.

Zkušební tělesa byla odzkoušena na univerzálním zkušebním stroji Zwick 1456.

Výsledky jsem poté zpracoval a vyhodnotil v programu Excel. Při vyhodnocování se objevil problém s vyšším rozdílem naměřených hodnot u struktur typu R44 a S70. Vzhledem k těmto rozdílům nebylo možné s přesností určit mechanické vlastnosti v ohybu daných struktur. Řešením tohoto problému by mohlo být vytisknutí další pětikusové série zkušebních těles stejného typu a tím pádem zvýšení testovaného množství. Další možností by bylo vytisknout tělesa na profesionální 3D tiskárně, např. 3ntr A4 s vyhřívanou komorou pro eliminaci vnitřních strukturních chyb testovacího tělesa.

Zpracované výsledky z ohybové zkoušky mě dovedli k překvapivému zjištění, že struktury s objemovým plněním 44 % materiálu poskytují lepší mechanické vlastnosti v ohybu, než je tomu u struktur s vyšším objemovým plněním.

Struktura, která podávala nejlepší výsledky napříč objemovým spektrem je struktura typu Cartesian. O něco málo horší mechanické vlastnosti v součtu poskytuje struktura Starlit u které je zajímavé, že její vzorky s objemovým plněním 44 % nabízí mechanické vlastnosti, které jsou stejné nebo mírně vyšší, než je tomu u vzorků typu Cartesian. Myslím si, že by bylo do budoucna zajímavé tyto struktury porovnat znovu s vyšším množstvím testovaných vzorků

Struktura Octagonal poskytuje mírně nižší mechanické vlastnosti, než je tomu u struktury Starlit. Lehčená struktura Rhomboid je velmi zajímavá, ne tak svými nízkými mechanickými vlastnostmi vzhledem k ostatním strukturám, jako spíš tím, že vykazuje opačný trend od

ostatních měřených struktur a to takový, že její mechanické vlastnosti rostou spolu s množstvím objemového plnění materiálu.

Z pohledu do budoucnosti se mi zdají být struktury typu Cartesian, Starlit i Octagonal zajímavé a mohly by být vhodným předmětem dalšího zkoumání.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. Výrobní inženýrství a technologie. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 9788074544712.
- [2] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. Začínáme s 3D tiskem. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-802-5148-761.
- [3] HAAG, Matthias a Johannes LUTZ. 3D printing: Professional knowledge [online]. Nördlingen: Johannes Lutz, 2019 [cit. 2020-05-16]. ISBN 978-3-00-061866-6. Dostupné z: <https://www.buch.3ddruck-wissen.de/>
- [4] STŘÍTESKÝ, Ondřej, Martin BACH a Josef PRŮŠA. Základy 3D tisku [online]. Praha: Prusa Research s.r.o., 2019 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
- [5] PRŮŠA, Josef. Příručka 3D Tiskaře. 1. Praha: Prusa Research s.r.o., 2019.
- [6] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KRÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-802-4742-731.
- [7] MELOUN, Milan. Statistické zpracování experimentálních dat v chemometrii, biometrii, ekonometrii a v dalších oborech přírodních, technických a společenských věd. Praha: Plus, 1994. Plus (Plus). ISBN 80-852-9756-6.
- [8] Statické zkoušky krátkodobé. [Http://ufmi.ft.utb.cz/](http://ufmi.ft.utb.cz/) [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [9] Tiskové struny pro FDM/FFF. [Https://3dwiser.com](https://3dwiser.com) [online]. Praha: 3DWiser, 2019 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/spotrebni-material-pro-3d-tiskarny/tiskove-struny/>
- [10] HOMOLA, Jan. 3D tisk. In: 3D tisk [online]. Brno: Nová média, c2014 [cit. 2017- 02- 03]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/3d-tisk/>
- [11] [Https://www.strojirenstvi.cz/vyhledavani?search=3Dtisk](https://www.strojirenstvi.cz/vyhledavani?search=3Dtisk) [online]. Brno: Nová média, 2020 [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/>
- [12] Univerzální zkušební stroj Zwick 1456 [online]. In: . [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/docs-images/62/47289440/images/70-0.jpg>

- [13] Gaussovo normální rozdělení s určitými hodnotami: Inductiveload – self-made, Mathematica, Inkscape [online]. In: . [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3817954>
- [14] TOEWS, M. W. Gaussovo normální rozdělení: Vlastní dílo, based (in concept) on figure by Jeremy Kemp [online]. In: . [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1903871>
- [15] ZUZA, Mikolas. Vše o tryskách s různým průměrem [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/vse-o-tryskach-s-ruzny-m-prumerem/>
- [16] Výška vrstvy vs průměr trysky [online]. In: . [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://josefprusa.cz/wp-content/uploads/2018/05/layer_height_cz.jpg
- [17] Rychlost tisku při stejné výšce vrstvy. [online]. In: . 2018 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://josefprusa.cz/wp-content/uploads/2018/05/3hprint_CZ-1.jpg
- [18] Vliv na mechanické vlastnosti [online]. In: . 2018 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://josefprusa.cz/wp-content/uploads/2018/05/impact_resistance_cz.jpg
- [19] Stringing/nitkování [online]. In: . 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/wp-content/uploads/2019/02/P1211040-1024x683.jpg>
- [20] B&H MakerBot 1.75mm PLA Filament [online]. In: . 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://sttic.bhphoto.com/images/images2500x2500/1406298010_1070383.jpg
- [21] Tříbodový (vlevo) a čtyřbodový systém ohybové zkoušky. [online]. In: . 2016 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [22] Porézní medium - Porous medium. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://cs.qwe.wiki/wiki/Porous_medium
- [23] ŠENK, Vít. Keramické porézní materiály - příprava, struktura a vlastnosti. VUT Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Jaroslav Cihlář.
- [24] ŠUBA, Oldřich. Mechanické chování těles. Vyd. 4. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. ISBN 978-80-7318-792-7.
- [25] Materiálové listy [online]. 2020 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/pages/data-sheets>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

RP Rapid prototyping – rychlá výroba prototypů

STL Standard Triangulation Language – formát podporovaný 3D tiskárnami

SLA Stereolitografie – technologie Rapid prototyping

RepRap Replicating rapid prototyper – znamená schopnost sebereplikace a rychlého prototypování

FFF Fused filament fabrication – výroba z roztaveného filamentu

FDM Fused deposition modeling – výroba vytlačováním modelu

ABS Akrylonitrilbutadienstyren – amorfní termoplastický kopolymer

PLA Polylactic Acid – kyselina polymléčná

PET / PET-G – polyetylén tereftalát–glykol

PC – Polykarbonát

PA / PA 12 – Polyamid/Nylon

ASA (akrylonitril–styren–akryl)

obr. – Obrázek

tj. – to je

např. – například

tzv. – takzvaný

apod. – a podobně

tzn. – to znamená

[mm] – Milimetry

[%] – procento

[°C] – stupně celsia

[mm³] – milimetry krychlové

F_{max} – maximální síla

l – vzdálenost reakcí

Momax – maximální ohybový moment

σ – napětí v ohybu

σ_D – dovolené napětí v ohybu

W_0 – modul průřezu v ohybu

L_p – Rozpětí podpor v mm

Směr. průměru – směrodatná odchylka průměru

T_n – soubor všech tabulkových hodnot pro vyhodnocení Grubbsova testu

T_5 – soubor tabulkových hodnot pro normální přesnost vyhodnocení Grubbsova testu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Zkušební tělesa připravená na export do G-codu v programu PrushaSlicer.	12
Obrázek 2 - Poloprofesionální jedno-materiálová tiskárna MK3S od společnosti Prusha Research s.r.o.....	14
Obrázek 3 Profesionální vícemateriálová 3D tiskárna Ultimaker S3 od společnosti Ultimaker, typ technologie: FDM [9].....	16
Obrázek 4 Pohled zblízka na tři vrstvy vytištěné postupně (zleva doprava) v rozlišení 100 mikronů, 200 mikronů a 300 mikronů [2].....	18
Obrázek 5 Ukázka odlišné struktury výtisku při rozdílném nastavení šířky vrstvy. [16]	18
Obrázek 6 Vliv šířky trysky na konečnou velikost výtisku při zachování jednotné výšky vrstvy [17].....	19
Obrázek 7 Výrazně stringovaný výrobek [19].....	21
Obrázek 8 Navíjecí šablona pro přípravu vinutí pro rotor generátoru. Funkční výrobek z barveného materiálu PET-G	23
Obrázek 9 Cívky s různě barevnými tiskovými strunami pro tiskárny typu FDM [20]	24
Obrázek 10 Geometricky definovaná porézní struktura typu Gyroid.....	30
Obrázek 11 Pilotní vzorky tří typů struktur, se kterými se dále setkáme v této práci. Technologie výroby FDM, materiál PLA.	31
Obrázek 12 Tříbodový (vlevo) a čtyřbodový systém ohybové zkoušky [21].....	33
Obrázek 13 Univerzální zkušební stroj Zwick 1456 [12].....	36
Obrázek 14 Ukázka jedné zbylé špulky materiálu použité na výrobu zkušebních těles. Napravo od ní leží lepící tyčinka značky Kores.....	37
Obrázek 15 Raft zkušebních těles.....	39
Obrázek 16 Použité nastavení podpěr a raftu v PrushaSliceru	40
Obrázek 17 Ukázka orientace a rozložení vzorku typu S na zkušebním stroji Zwick 1456.....	41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 vybrané struktury na experimentální testování v ohybu.....	42
Tabulka 2 Modul průřezu v ohybu W_0	44
Tabulka 3 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série C44.....	48
Tabulka 4 Statistické vyhodnocení pro souhlas vzorků C44.....	48
Tabulka 5 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série C57.....	49
Tabulka 6 Statistické vyhodnocení pro souhlas vzorků C57.....	50
Tabulka 7 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série C70.....	51
Tabulka 8 Statistické vyhodnocení pro souhlas vzorků C70.....	51
Tabulka 9 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série R44.....	52
Tabulka 10 Statistické vyhodnocení pro souhlas vzorků R44.....	53
Tabulka 11 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série R57.....	54
Tabulka 12 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků R57.....	55
Tabulka 13 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série R70.....	56
Tabulka 14 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků R70.....	57
Tabulka 15 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série O44	58
Tabulka 16 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků O44.....	58
Tabulka 17 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série O57	59
Tabulka 18 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků O57.....	60
Tabulka 19 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série O70	61
Tabulka 20 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků O70.....	62
Tabulka 21 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série S44.....	63
Tabulka 22 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků S44	64
Tabulka 23 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série S57	65
Tabulka 24 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků S57	66
Tabulka 25 Výsledky ohybové zkoušky vzorků série S70.....	67
Tabulka 26 Statistické vyhodnocení pro soubor vzorků S70	68

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Vliv šířky trysky na rázovou houževnatost zkušebních těles [18]	20
Graf 2 Gaussovo normální rozdělení [14]	26
Graf 3 Gaussovo normální rozdělení [14]	27
Graf 4 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série C44	47
Graf 5 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série C57	49
Graf 6 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série C70	50
Graf 7 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série R44	52
Graf 8 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série R57	54
Graf 9 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série R70	56
Graf 10 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série O44	57
Graf 11 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série O57	59
Graf 12 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série O70	61
Graf 13 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série S44	63
Graf 14 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série S57	65
Graf 15 Průběh ohybové zkoušky vybraného vzorku ze série S70	67
Graf 16 Srovnání minimálního dovoleného napětí objemových plnění struktury Cartesian	69
Graf 17 Srovnání minimálního dovoleného napětí objemových plnění struktury Rhomboid	70
Graf 18 Srovnání minimálního dovoleného napětí objemových plnění struktury Starlit	70
Graf 19 Srovnání minimálního dovoleného napětí objemových plnění struktury Octagonal	71

SEZNAM PŘÍLOH

CD ROM