

Studium mechanických vlastností dílů vyrobených aditivní technologií

Petr Krahula

Bakalářská práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Petr Krahula
Osobní číslo: A20785
Studijní program: B0714A150006 Aplikovaná informatika v průmyslové automatizaci
Specializace: Inteligentní systémy s roboty
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Studium mechanických vlastností dílů vyrobených aditivní technologií
Téma práce anglicky: Study of Mechanical Properties of Parts Produced by Additive Manufacturing

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši v oblasti 3D tisku a mechanických zkoušek.
2. Navrhněte a vyrobte zkušební tělesa.
3. Navrhněte a proveďte jednotlivé testy.
4. Statisticky vyhodnoťte naměřená data.
5. Diskutujte získané výsledky.

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

Seznam doporučené literatury:

1. Ian GIBSON, David ROSEN a Brent STUCKER. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.
2. Andreas GEBHARDT a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
3. Vishu SHAH. *Handbook of Plastics Testing Technology*. New York: John Wiley & Sons, 1998. ISBN 0-471-18202-8.
4. Jana KUBANOVÁ. *Statistické metody pro ekonomickou a technickou praxi*. Bratislava: STATIS, 2004. ISBN 80-85659-37-9.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Aleš Mizera, Ph.D.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Michaela Karhánková**
Ústav bezpečnostního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **16. prosince 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2023**

doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 12. prosince 2022

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že 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;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že 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 totožné.

Ve Zlíně, dne

Petr Krahula, v. r.
podpis studenta

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá mechanickými vlastnostmi materiálů vyrobených aditivní technologií. Teoretická část je zaměřena na historii, nové využití a vysvětlení principu 3D tiskáren, konkrétně na SLA, SLS a FDM. Dále jsou popsány mechanické zkoušky a jejich principy. V praktické části lze nalézt postup výroby a mechanického testování. Kromě toho také výsledky mechanických zkoušek vybraných materiálů filamentů vytištěných na 3D tiskárnách FDM, FFF a vstříkáním. Cílem bakalářské práce je zhodnocení výsledků mechanického testování materiálů 3D tiskáren.

Klíčová slova: 3D tiskárna, mechanické testování, aditivní technologie, zkušební stroje

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the mechanical properties of materials produced by additive technology. The theoretical part focuses on the history, new applications and explanation of the principles of 3D printers, specifically SLA, SLS and FDM. Furthermore, mechanical tests and their principles are described. In the practical part, the manufacturing and mechanical testing procedure can be found. In addition, the mechanical test results of selected filament materials printed on FDM, FFF and injection molding 3D printers are also presented. The aim of the bachelor thesis is to evaluate the results of mechanical testing of 3D printer materials.

Keywords: 3D printer, mechanical testing, additive technologies, testing machines

Poděkování

Rád bych chtěl poděkovat panu Ing. Alešovi Mizerovi, Ph.D. za trpělivost a skvělou spolupráci při vedení této bakalářské práce, jeho ochotu a odborné rady. Taktéž velké poděkování patří mé rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

ÚVOD	7
I TEORETICKÁ ČÁST	8
1 3D TISK	9
1.1 PRINCIPY A METODY TISKU	11
1.1.1 SLA	11
1.1.2 SLS.....	13
1.1.3 FDM.....	14
1.2 NOVÉ TECHNOLOGIE V OBLASTI 3D TISKU	15
1.2.1 Tisk za pomoci hub	15
1.2.2 Domy z 3D tisku	16
1.2.3 Zelené zdi	17
1.2.4 Nejmenší 3D tiskárna	18
1.2.5 Basketbalový míč za pomoci 3D tisku.....	19
1.2.6 3D tisk v lékařství	19
2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	21
2.1 ZKOUŠKA TAHEM	23
2.2 ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	25
2.3 RÁZOVÁ ZKOUŠKA V OHYBU	27
II PRAKTICKÁ ČÁST	29
3 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	30
4 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	31
4.1 MODELOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	31
4.2 PŘÍPRAVA NA TISK ZKUŠEBNÍCH TĚLES	32
4.3 3D TISKÁRNY A MATERIÁL	34
4.3.1 Materiál	34
4.3.2 3D Tiskárny.....	35
5 PRŮBĚH MECHANICKÝCH ZKOUŠEK	37
5.1 ZKOUŠKA VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	37
5.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA A OHYBOVÁ ZKOUŠKA	38
6 VÝSLEDKY MECHANICKÝCH ZKOUŠEK	41
6.1 ZKOUŠKA RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI	41
6.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA – STRUNA FILAMENTU.....	43
6.3 TAHOVÁ ZKOUŠKA – ZKUŠEBNÍ TĚLESO	43
6.4 OHYBOVÁ ZKOUŠKA.....	45
7 DISKUZE VÝSLEDKŮ	46
ZÁVĚR	50
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	51
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	55
SEZNAM OBRÁZKŮ	56
SEZNAM TABULEK	58

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá tématem mechanického testování materiálů vyrobených aditivní technologií. Aditivní technologie nebo jak se také nazývá 3D tisk se v poslední době stala velice populární a může se stát naší budoucností v mnoha odvětvích. V dnešní době je již možné pořídit si tiskárnu jak pro naše vlastní potřeby, tak pro firemní účely. Proto je důležité znát vlastnosti těchto materiálů, které zjistíme za pomoci mechanických zkoušek.

Mechanické zkoušky jsou tu s námi už dlouhou dobu. V průmyslovém odvětví jsou nepostradatelné. Každý produkt musí být vyroben ze vhodného materiálu, který obstojí vlivům působícím na produkt.

Teoretická část se nejdříve zabývá aditivními technologiemi. Její historií od prvních 3D tiskáren, přes jejich vynálezce, metody nebo první výrobky. Dále je zaměřena na princip jednotlivých metod. Nejprve jsou krátce popsány programy, které tiskárny využívají, avšak jsou nedílnou součástí pro vypracování a přípravu modelů. Následně jsou popsány postupy výroby z jedněch nejpoužívanějších metod jako SLA, SLS, FDM. Také jejich zařazení, výhody, nevýhody nebo nové využití aditivní technologie v oborech jako například stavebnictví, lékařství. Druhá část teorie pojednává o vlastnostech materiálů, dělení mechanických zkoušek až po samotný princip vybraných zkoušek, tj. zkouška tahem, tvrdosti a rázová zkouška v ohybu.

Cílem praktické části je porovnání výsledků vytištěných materiálů. Praktická část také znázorňuje postup výroby zkušebních těles, který začíná modelováním těles v CAD programech. Poté obsahuje popis materiálů a tiskáren, na kterých jsou vytištěny. Dále je vysvětlen postup prováděných mechanických zkoušek a číselně nebo graficky znázorněny jejich výsledky. Výsledky z testování můžou sloužit pro následnou výrobu výrobků při výběru vhodného materiálu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

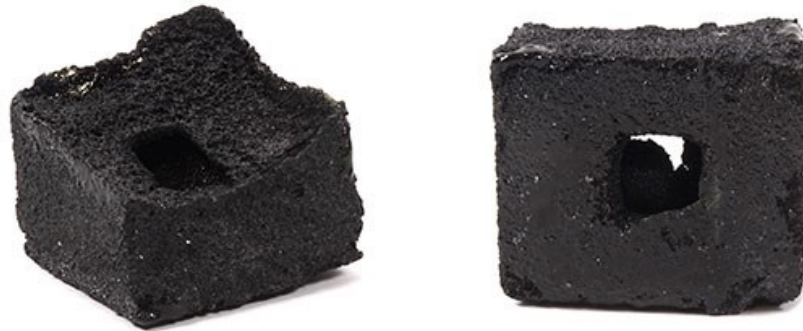
1 3D TISK

3D tisk je způsob pro tvorbu trojrozměrných předmětů za pomoci 3D tiskárny. Tenhle způsob tisku je také známý pod názvem aditivní výroba. To znamená, že materiál je nanášen po vrstvách. První zmínka o 3D tisku je z 80. let 20. století v Japonsku. Přišel s ní Hideo Komada. Jeho myšlenka spočívala ve vyrábění modelů nanášením vrstev fotocitlivé pryskyřice na sebe a následném vytvrzení ultrafialovým světlem. Tu si však nenechal patentovat i přesto je uváděn jako vynálezce 3D tisku. Toho využil v roce 1986 Charles Hull, který zdokonalil myšlenku Komady a podal si patent na stereolitografii neboli SLA. Metoda spočívala ve vytvrzení vrstvy po vrstvě. V roce 1988 založil společnost na tiskárny s názvem 3D System Corporation, jejich modely se staly základem vývoje 3D tisku či CNC strojů a dodnes se zabývá výrobou tiskáren. Na Obrázku 1 je zobrazena jejich první dostupná 3D tiskárna SLA-1, která na rozdíl od předchozích typů dokázala tisknout v rámci několika hodin. Dodnes je tiskárna vystavena v Národní síni slávy vynálezců ve Virginii. [1] [2]



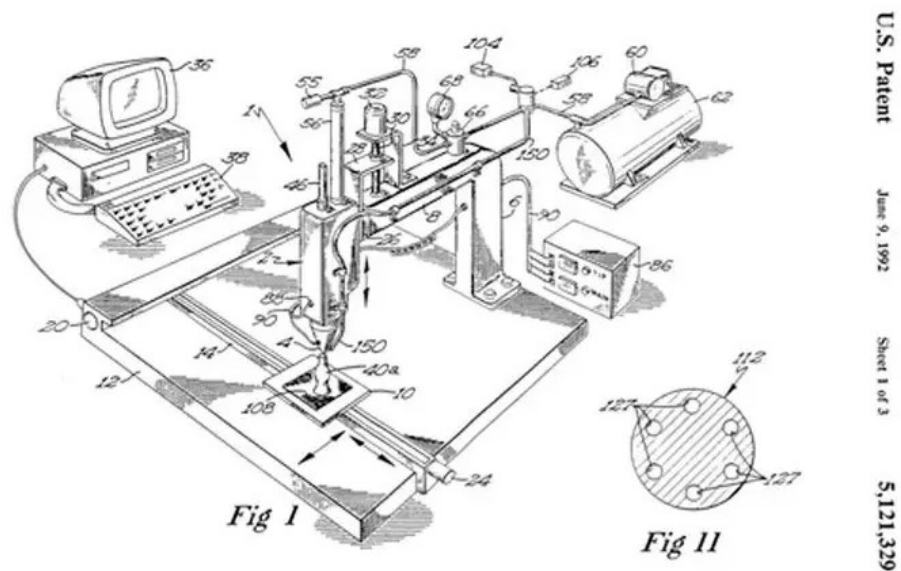
Obrázek 1 První SLA-1 3D tiskárna Appatarus z roku 1992 [3]

O rok později Carl Deckard Americký výrobce nábytku přemýšlel nad tím, jak vyrábět malé zakázkové díly. Přišel s metodou selektivního laserového sintrování. SLS využívá spékání prášku za pomoci laseru. Společně s Joe Beamanem sestrojili první SLS stroj zvaný Betsy. Prvním výtvozem tiskárny byla kostka, která jak vidíme na Obrázku 2, nebyla dokonalá tudíž má nerovný horní povrch. [1] [2]



Obrázek 2 První výrobek tiskárny Betsy [4]

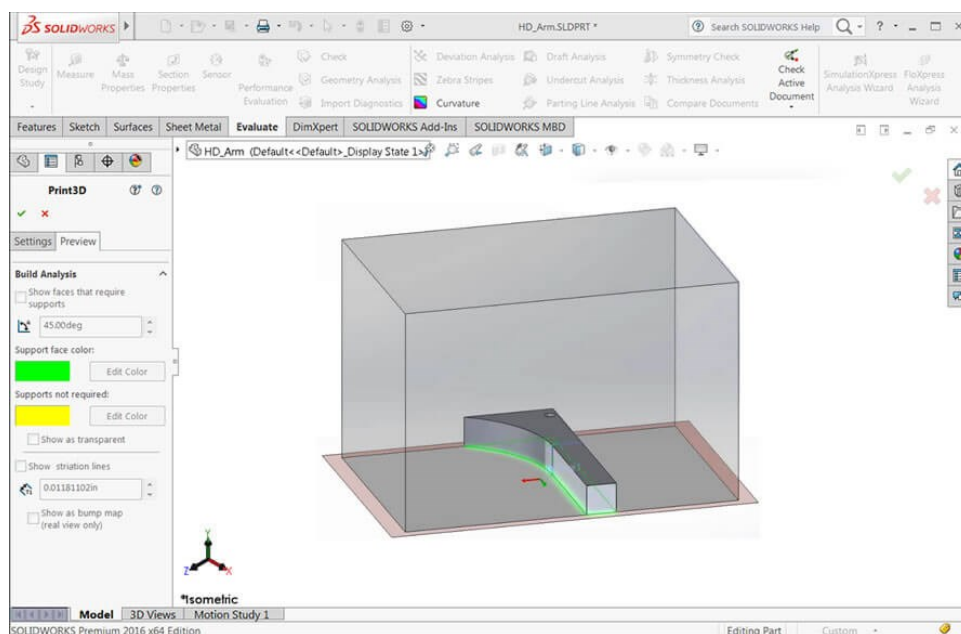
Ve stejné době jako SLS metoda byl vymyšlen také třetí základní typ tisku FDM. O to se postaral Scott Crump a od ostatních se liší vyhřívanou tryskou, která vytlačuje vlákno. Po uvolnění patentu veřejnosti se stala nejdostupnější. Tyto tři metody se staly základem pro vývoj 3D tisku a jeho metod. [1] [2]



Obrázek 3 Původní patent FDM [2]

1.1 Principy a metody tisku

3D tisk je proces, který za pomoci digitální předlohy vypracované ve specializovaných programech na počítači tiskne identický fyzický model. Programy jsou využívány pro realizaci výroby. Jsou rozděleny do dvou kategorií. CAD programy slouží přímo pro vymodelování výroby. Mezi nejpoužívanější CAD programy patří Fusion 360, Blender, SolidWorks. Spousta modelů je již vytvořena a dají se stáhnout z internetu. K tomu slouží Slicer, který se používá pouze pro přípravu tisku, již staženého 3D modelu. Nejznámější Slicer programy jsou PrusaSlicer, Cura, Simplify3d. Jakmile je model ve finální podobě, musí se převést do formátu g.code, se kterým tiskárna pracuje. G-kód obsahuje informace jako například souřadnice nebo rychlost pohybu. [5]



Obrázek 4 SolidWorks [5]

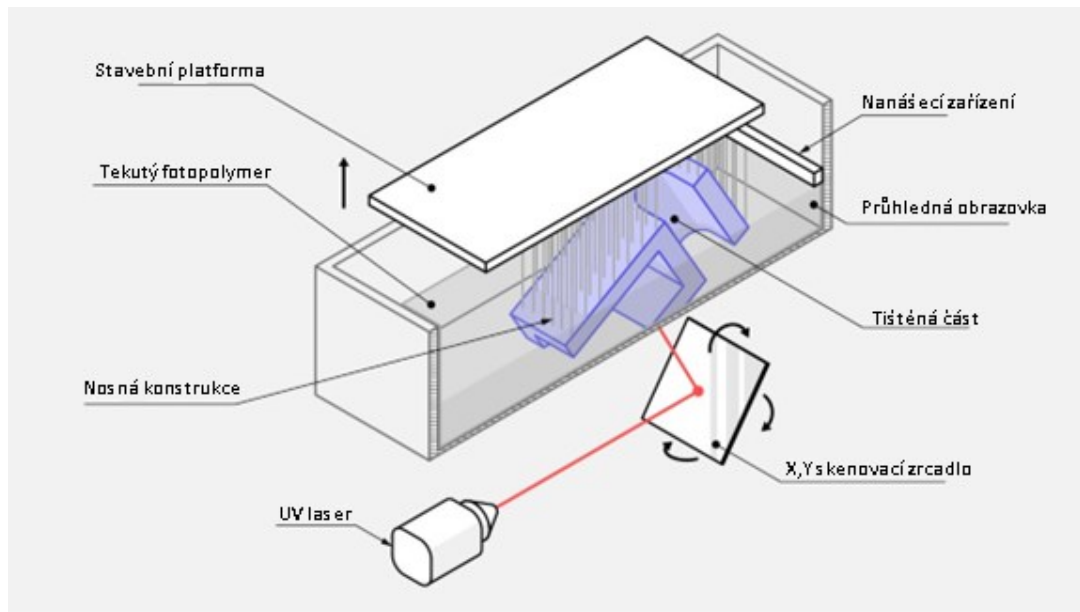
1.1.1 SLA

SLA neboli stereolitografie je jednou z nejpoužívanějších technologií aditivní výroby. Patří do skupiny fotopolymerizace. Jako materiál jsou použity různé druhy pryskyřice, které mají své specifické vlastnosti. [6]

Princip:

Nejprve je stavební platforma umístěna do nádrže s tekutým fotopolymerem do výšky jedné vrstvy ode dna kapaliny. UV laser vytvoří další vrstvu vytvrzením fotopolymerní pryskyřice

a následným tvrzením, které mezi sebou vytvoří pevné nerozbitné vazby. Laserový paprsek je zaostřen v předem stanovené poloze za pomoci zrcadel. Jakmile je celá plocha průřezu modelu naskenovaná, není díl zcela ve vytvrzeném stavu a je potřeba dalšího zpracování pod UV světlem. Tenhle proces je nevratný, tudíž díl není možné vrátit zpět do kapalné podoby. [6]



Obrázek 5 Schéma SLA [6]

Výhody:

- vysoká rozměrová přesnost a detaily dílů
- velmi hladký povrch
- používají speciální materiál jako jsou čiré, flexibilní, lité pryskyřice

Nevýhody:

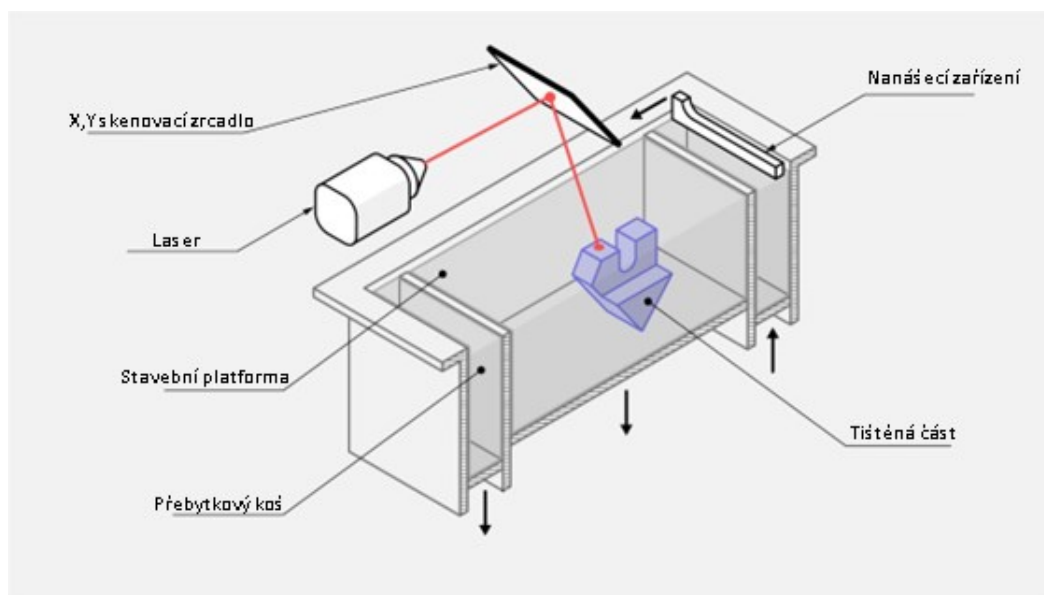
- výrobky jsou křehké
- díky slunečnímu záření se mechanické a vizuální vlastnosti časem zhorší
- nutné použití podpurných konstrukcí [6]

1.1.2 SLS

Selektivní laserové sintrování (SLS) patří do skupiny práškových fúzí. Při tisku se používají termoplastické polymery v práškové formě, které se za pomoci laseru spékají vrstvu po vrstvě. [7]

Princip:

Nejprve se prášek a stavební platforma zahřeje těsně pod teplotu tání polymeru. Následně pravítko nanese tenkou vrstvu na plochu. Dále CO₂ laser skenuje další vrstvu a spojuje částice polymerního prášku. Po dokončení skenování se platforma posune dolů a za pomoci pravítka se nanese další vrstva. Tenhle proces se opakuje, dokud není součást hotova. Po dokončení je výrobek zapouzdřen do nesintrovaného prášku. Před vyndáním dílu musí pouzdro vychladnout, to může trvat až 12 hodin. Nakonec je výrobek očištěn tryskou za pomoci stlačeného vzduchu a připraven k případnému následnému upravení nebo použití. [7]



Obrázek 6 Schéma SLS [7]

Výhody:

- výrobky mají dobré izotropní mechanické vlastnosti
- není potřebná žádná podpora dílů, díky čemuž lze vytvářet geometricky složité návrhy
- vynikající výrobní možnosti pro malou až středně sériovou výrobu
- zbytkový nesintovaný prášek je možno znovu použít

Nevýhody:

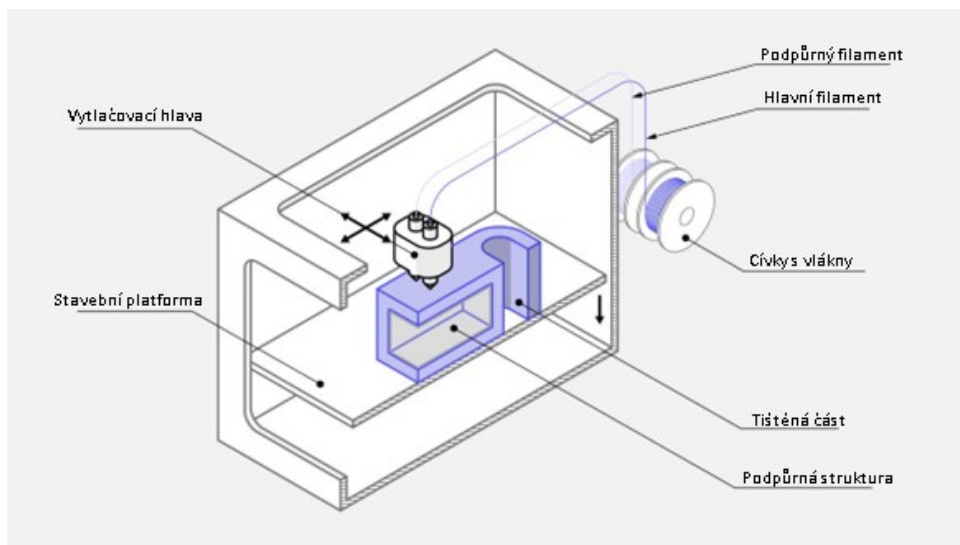
- nejdostupnější jsou pouze průmyslové systémy SLS, tudíž jsou delší dodací lhůty
- není zapotřebí dodatečné úpravy, jelikož díly mají zrnitý povrch a vnitřní poréznost
- obtížný tisk velkých rovných povrchů a malých otvorů, protože jsou náchylné k deformaci a nadměrnému sintrování [7]

1.1.3 FDM

Modelování tavené depozice (FDM) se také nazývá výroba tavených vláken (FFF). Jde o proces v oblasti vytlačování materiálů. Jde o vytlačování termoplastického polymeru (ABS, PLA, PETG, PEI) ve vláknech a nanášení vrstvy po vrstvě v předem stanovené dráze. FDM tvoří největší základnu 3D tiskáren a je nejrozšířenější ve většině odvětví průmyslu. [8]

Princip:

U 3D tiskáren FDM se digitální návrh rozdělí do vrstev a vytvoří strojový kód, který se poté nahraje přímo do stroje. Před samotným tiskem je nutné do tiskárny vložit cívku s termoplastickým vláknem. Jakmile se tryska rozzhává na požadovanou teplotu, začne vytlačovat vlákno přes vytlačovací hlavu. Hlava se pohybuje po osách X, Y, Z za pomoci tříosého systému, na kterém je připevněna. Roztavené prameny materiálu jsou vrstveny na sebe podél určené dráhy, následně se ochladí a ztuhnou. Často jsou k hlavě připevněny ventilátory pro urychlení chlazení. Po dokončení každé vrstvy se buď platforma posouvá dolů nebo vytlačovací hlava nahoru, aby bylo možné nanášet další vrstvu. Tenhle proces se dále opakuje, dokud není celý díl hotov. [8]



Obrázek 7 FDM tisk princip [8]

Výhody:

- nejmenší náklady na výrobu
- využití nejširší škály termoplastických materiálů
- nejkratší dodací lhůty výrobků

Nevýhody:

- nejmenší rozlišení v porovnání s jinými technologiemi tzn. tisk dílů s velmi malými detaily [8]

1.2 Nové technologie v oblasti 3D tisku

1.2.1 Tisk za pomoci hub

Londýnské Blast Studio vyvinulo novou metodu 3D tisku. Jako materiál se používá živé mycelium. Podařilo se jim vytisknout dvoumetrový sloup, který má zvlněnou strukturu. Je navržen tak, aby měl optimální podmínky pro růst kořenového systému hub. Skládá se ze směsi mycelia a odpadních kávových kelímků. Poté co se mycelium vytiskne do požadovaného tvaru, spotřebuje rozvlákněné papírové kelímky a roste. Následně vytvoří houby, které se dají jíst. Jakmile se struktura kořene vysuší, vznikne pevná konstrukce s izolačními a nehořlavými vlastnostmi. Firma do budoucna plánuje stavbu celé budovy. Tento typ tisku by

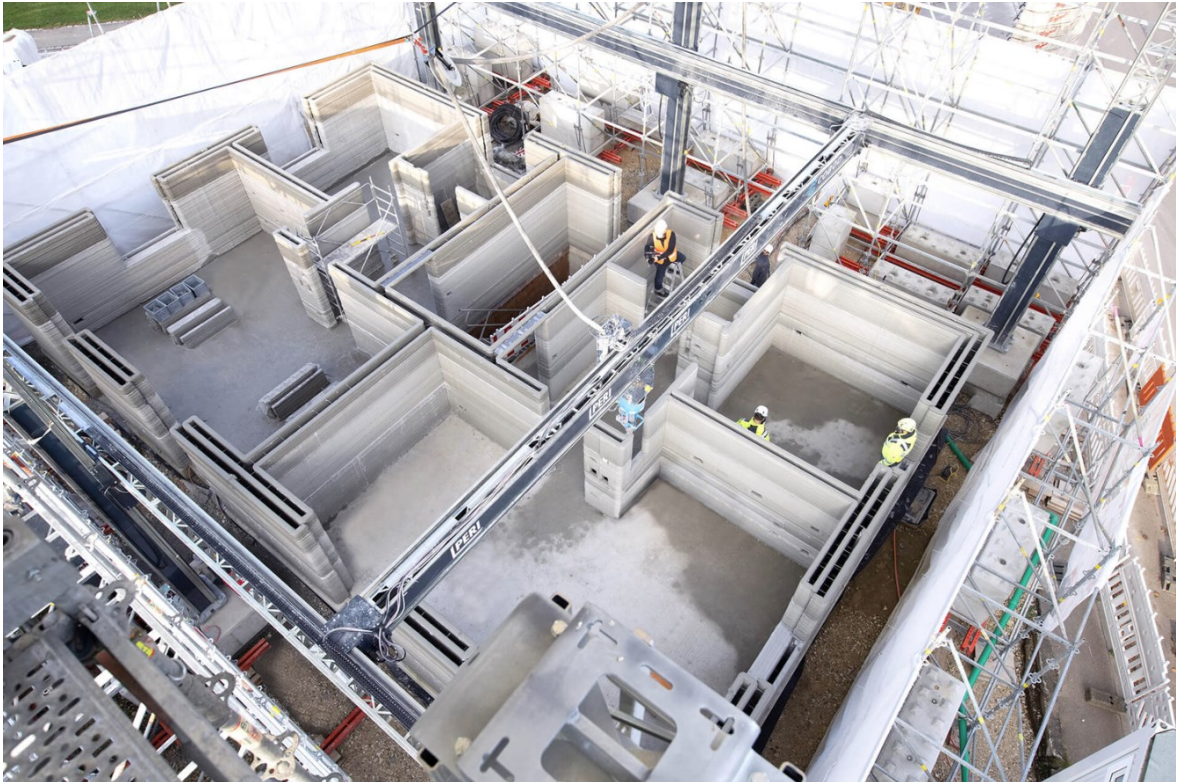
umožnil zbavení se odpadu a zároveň zajistit jídlo. Samotný proces začíná rozdrčením papírových kelímků a jejich rozvaření ve vodě, z čehož vznikne kaše. Následně se smíchá s myceliem a přírodními barvivy. Vzniklá směs v podobě pasty se nanáší tiskárnou vrstvu po vrstvě. Po vytisknutí se podhoubí nechá vyrůst ve vlhkém prostředí po tři až čtyři týdny. Poté se suší při 80 stupních Celsia pro zabití organismu, který zastaví růst a zpevní výrobek. Výrobky jsou elastické, lehké a následně recyklovatelné. Existuje také postup, který nezabije organismy pouze zastaví množení, tudíž se výrobek dokáže sám opravit za pomoci vody. [9]



Obrázek 8 Sloup z mycelia [9]

1.2.2 Domy z 3D tisku

V důsledku nedostatku pracovníků, vysoké ceny a také změny klimatu v celém světě je nutné vyvíjet ve stavebním odvětví. 3D konstrukční tisk se stal nejoblíbenější inovací. I když je tato technologie poměrně nová, je již úspěšně otestována na mnoha konstrukcích a domech. Stavění domů pomocí 3D tisku je schopnou konkurencí dnešních domů v životnosti, cenou a hlavně ekologii. Tisk probíhá vrstvu po vrstvě za pomoci velké přenosné tiskárny, která se dá různě nakonfigurovat a pracuje podél tří os. Jako materiál je použit beton, malta, zemina, polymery a recyklovatelné plasty. Účinnost této metody je vysoká díky malému omezení při výrobě, malému počtu pracovníků a tomu, že dům odpovídá digitální předloze je doba stavby velice krátká. Při procesu nedochází k vytváření odpadu, jelikož se využije přesně potřebné množství materiálu. Flexibilita designu je vysoká, díky možnosti lze dům jednoduše vytvořit nebo pozměnit v digitální formě. [10] [11]



Obrázek 9 3D tisk PERI [11]

1.2.3 Zelené zdi

Tato metoda byla vynalezena vědci z Univerzity of Virginia. Využívá tisků půdy se semeny rostlin. Postavené objekty ze začátku vypadají obyčejně jako ze surové země, ale po několika dnech semena vyklíčí a pokryje je zeleň. Metoda se v budoucnu může využívat pro stavení zelených stěn a střech, které mohou sloužit jako přirozená izolace, prevence proti povodním a také více rostlin a zelených ploch pro různé druhy zvířat. Půdní inkoust by mohl být zabudován do architektonických prvků, to by snížilo spotřebu stavebního materiálu s vyššími emisemi a nahradit je znovu použitelnými materiály. Používají se semena rozchodníku, který přežije s malým množstvím vody. [12]



Obrázek 10 3D vytištěná živá stěna [12]

1.2.4 Nejmenší 3D tiskárna

Nejmenší po domácku vyrobená 3D tiskárna byla představena na youtubovém kanále „My N Mi“. Tiskárna dosahuje rozměrů 18 x 30 x 40 milimetrů a váží 17 gramů. I přes tyto rozměry dokáže vyrábět kvalitní a detailní výrobky o rozměrech 11x11x17 milimetrů, přesností 0,135 milimetrů na ose XY a rozlišením vrstev mezi 0,005 a 0,3 milimetrů. Využívá fotopolymerizace pryskyřice za pomoci LCD obrazovky a pomocí malého motoru hýbe tiskovou deskou. Nádrž pro pryskyřici je nutno plnit injekční stříkačkou po kapkách. Tato tiskárna je určena pro tvorbu malých součástek pro elektronická zařízení. [13]



Obrázek 11 Nejmenší 3D tiskárna [13]

1.2.5 Basketbalový míč za pomoci 3D tisku

Společnost Wilson, která již dlouhodobě poskytuje profesionální vybavení sportovcům, nedávno představila inovaci v basketbalovém odvětví. Podařilo se jim navrhnout a vytisknout na 3D tiskárně prototyp basketbalového míče, který není potřeba plnit vzduchem. Níže na obrázku vidíme strukturu tzv. Airless basketbalového míče. Jeho struktura se skládá z šestihranných otvorů, které umožňují průchod vzduchu. Míč je tištěn metodou SLS. Rozdíl od jiných 3D tiskových strojů EOS je v použití vrstvy bílé práškové pryskyřice vytvrzené laserem, která umožnila vrstvení tenkých vrstev pro velkou detailnost. Nakonec za pomoci vyhlazení je povrch srovnán a sjednocen. [14]



Obrázek 12 Airless basketbalový míč [14]

1.2.6 3D tisk v lékařství

3D tisk již také slouží při těhotenství. V dnešní době je možnost tisku plodu mezi 20. až 31. týdnem těhotenství. V olomoucké nemocnici je již možné pořídit 3D kopii plodu, kterou si rodiče můžou nechat na památku. Gynekologové také využívají výrobky pro zjištění vrozených vad ještě nenarozeného dítěte. Konkrétně na obrázku vidíme, že plod má podezření na jednostranný rozštěp rtu a patra. Model dítěte je získán ultrazvukem, následně počítačově zpracován, aby byly detaily dobře vykreslené a velké množství dat je převedeno do formátu tiskárny. [15] [16]



Obrázek 13 Plod s obličejovým rozštěpem ve 30 týdnu [17]

2 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Zkoušky slouží k určení různých mechanických vlastností materiálů. Za pomoci jednoho testu jsme schopni zjistit jednu danou mechanickou vlastnost. Ale některé zkoušky dokážou určit i více vlastností najednou anebo naopak k určení jedné vlastnosti je zapotřebí více testů. Vlastnosti materiálů dělíme na fyzikální, mechanické, technologické, chemické. Při mechanických zkouškách jsou pro nás důležité právě mechanické vlastnosti. [18] [19]

Druhy vlastností materiálů podle vlastností			
Fyzikální:	Mechanické:	Technologické:	Chemické:
hustota	pevnost	svařitelnost	Odolnost proti korozi
teplota tavení	pružnost	slévateľnost	žárupevnost
teplota tuhnutí	tvárnost	obrobitelnost	žáruvzdornost
teplotní roztažnost	houževnatost	odolnost proti	
tepelná vodivost	síla	odolnost proti opotřebení	
elektrická vodivost	tvrdost, křehkost		
magnetické vlastnosti	tažnost		
	tečení		
	únava		
	tvárnost		

Tabulka 1 Druhy mechanických vlastností [20]

Mechanické vlastnosti:

Pevnost – Pevnost je schopnost materiálu odolávat deformaci nebo rozpadu při působení vnější síly.

Pružnost – Definuje se jako maximální energie, kterou lze absorbovat bez trvalé deformace při odstranění zátěže.

Houževnatost – Množství energie, kterou materiál absorbuje, než se plasticky deformuje bez lámání.

Tvrдост – Tvrдост je vlastnost odolat vnějším vlivům namáhání bez trvalé změny tvaru materiálu jako například poškrábání, řezání, vlačení, proražení.

Křehkost – Opak tažnosti udává, jak lehce se materiál zlomí při působení síly. Tyto materiály mají tažnost menší než 5 %.

Tažnost – Jde o deformaci materiálu, který je namáhán tahem a roste společně s teplotou.

Tečení – Jde o pomalou deformaci materiálu v čase za pomoci působení konstantní síly. V první fázi je deformace rychlá, v následující fázi je konstantní a ve třetí se zrychluje, dokud materiál neselže.

Únava – Únava je selhání nebo porušení materiálu za pomoci opakovaného namáhání.

Tvárnost – Schopnost materiálu měnit tvar působením vnější síly při deformaci bez porušení celistvosti materiálu. [21]

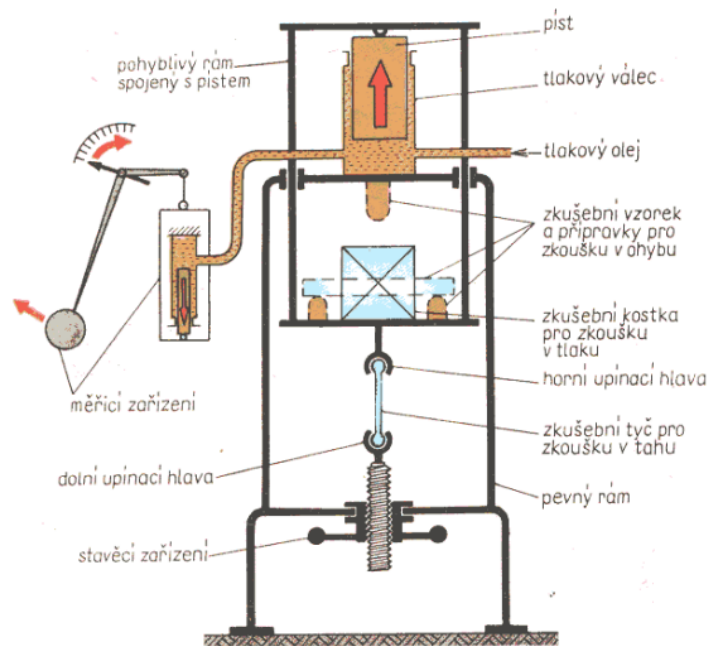
Primární účel zkoušek je zajistit bezpečnost konečné konstrukce a výrobků nebo také jejich inovací, proto jsou testy prováděny za podobných podmínek, kterým budou čelit finální produkty. Zkoušky dělíme na statické a dynamické (Tabulka 2.). Při statickém testování postupně vzrůstá zatěžovací síla, která vyvolá deformaci tělesa, dokud nedojde k porušení. Dále se statické rozdělují podle způsobu namáhání působící síly. Dynamické zkoušky využívají náhlého a proměnlivého působení na materiál. Lze je také dělit na destruktivní, při kterých je materiál trvale porušen a nedestruktivní. Teplota je také při testování důležitá a můžeme měřit při normální teplotě (20 °C), nízké nebo vysoké. [18] [19]

Dělení mechanických zkoušek		
Zatížení:	Krátkodobé:	Dlouhodobé:
Statické	Zkouška tahem Zkouška tlakem Zkouška ohybem Zkouška krutem Zkouška stříhem Zkoušky tvrdosti(statické)	Zkoušky tečení (creep)
Dynamické	Zkoušky tvrdosti (dynamické) Zkouška rázem v ohybu Zkoušky nízkocyklové únavy	Zkoušky vysokocyklové únavy

Tabulka 2 Dělení mechanických zkoušek [22]

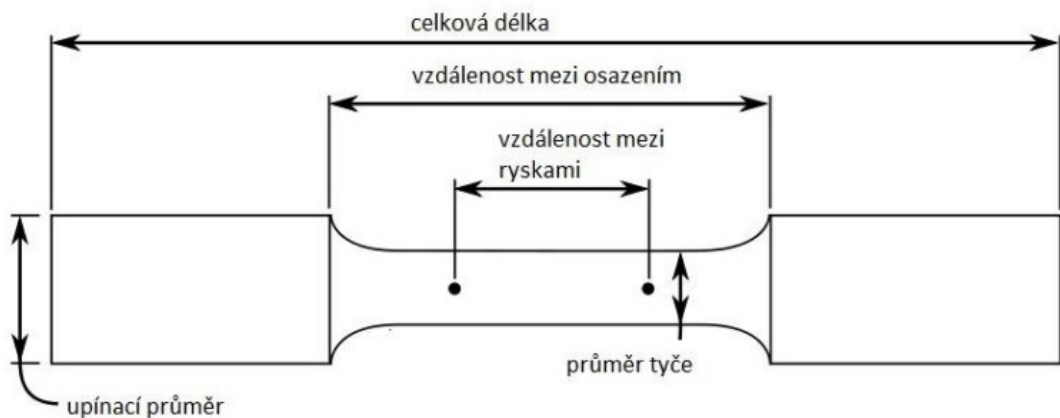
2.1 Zkouška tahem

Zkouška pevnosti v tahu je metoda pro stanovení vlastností při zatížení tahem, dokud se testovaný objekt neporuší. Zkušební tahový stroj dokáže vykonávat různé testy jako tah, tlak, ohyb, smyk atd. V průmyslu pomáhá přesněji zjistit trvanlivost, bezpečnost a kvalitu výrobku. Jak můžeme vidět na Obrázku 14, stroj se skládá ze dvou upínacích hlav. Jedna je pevně usazena a druhá je pohyblivá, aby působila tahem na materiál. Využívají se hydraulické nebo elektromagnetické pohony. Počítačové zařízení získává data ze senzorů a zpracovává je. Slouží také pro zadávání vstupních hodnot. [23] [24]

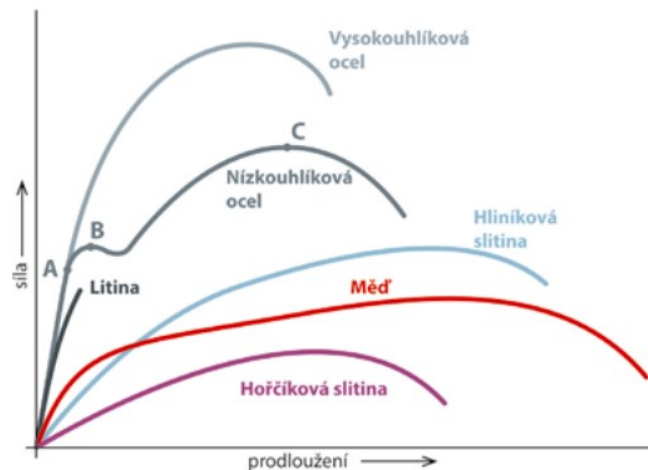


Obrázek 14 Schéma zkoušky tahem [25]

Ze získaných dat můžeme určit mez pružnosti, prodloužení, modul pružnosti, mez kluzu, pevnost v tahu a další vlastnosti materiálu v tahu. Testované materiály jsou kovové i nekovové. Vzorky musí být změřeny, aby rozměry dosahovaly potřebných norem a umístěny pod správným úhlem, jinak by došlo k ohybu při zkoušce. Tvar vzorku by měl být podle daných standardů válcovitý, listovitý tvar nebo psí kost (Obrázek 15). [23] [24]



Obrázek 15 Nákres vzorku tvaru psí kosti [24]



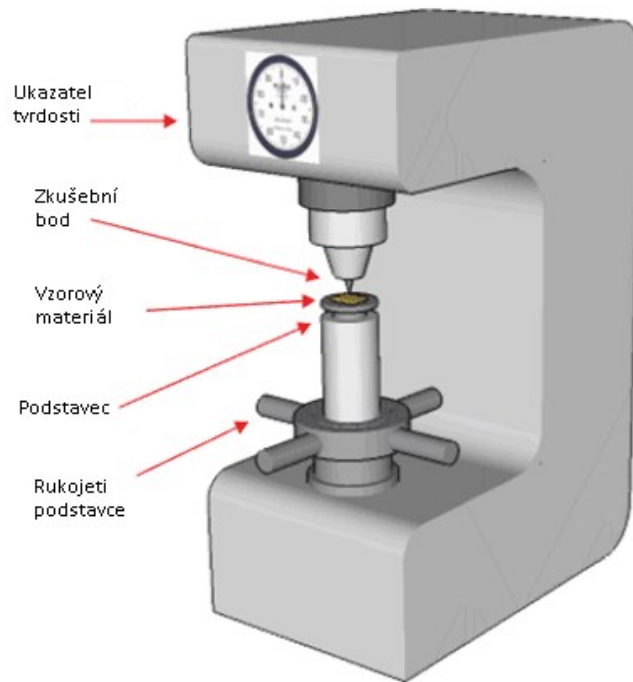
Obrázek 16 Diagram tahové zkoušky [25]

2.2 Zkouška tvrdosti

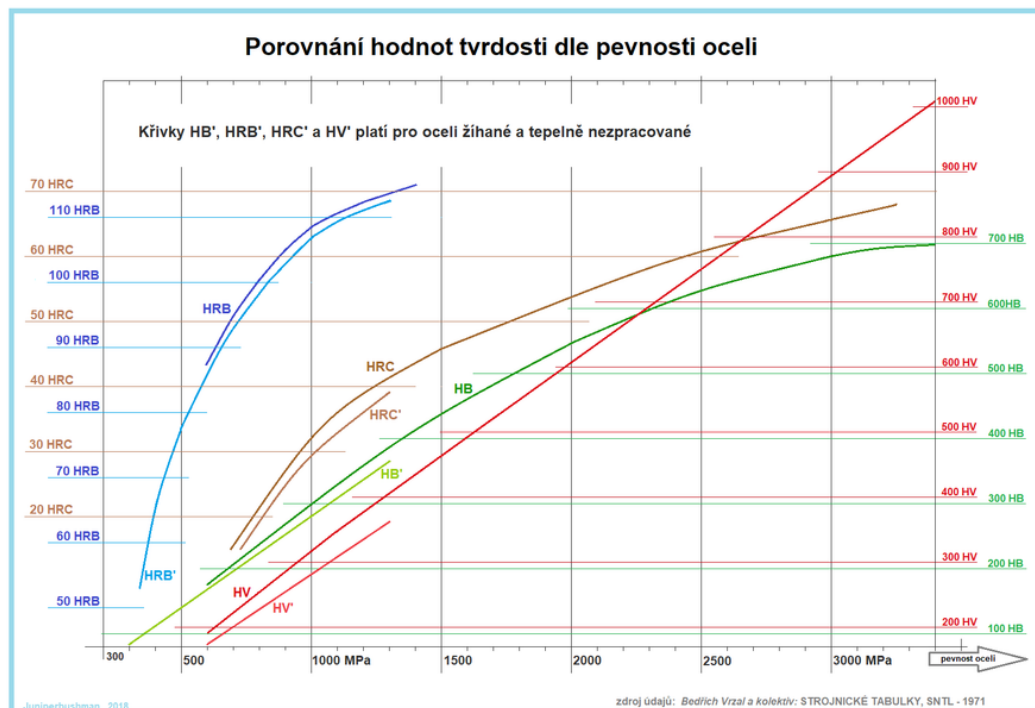
Tvrdość materiálů úzce souvisí s pevností. Některé aplikace vyžadují, aby materiál byl měkký a elastický. Jiné zase, aby byl materiál tvrdý a odolný. Hlavní typy testování tvrdosti závisí na mechanismu deformace, typu a tvaru indentoru. Mezi základní typy tvrdosti řadíme zkoušky dle Vickerse, Brinella, Rockwella a Shoreho. [18]

Rockwellova zkouška

Rockwellův tvrdoměr, mechanismus pro měření rozdílové hloubky byl vynalezen 1914 bratry Hughem a Stanleym ve Spojených státech. Používá se především pro kontrolu kvality a výběru materiálu. Na rozdíl od Brinellova a Vickersova testu se liší tím, že tvrdost materiálu je založena na rozdílu v hloubce indentoru ve dvou časech. Po vložení materiálu na základnu je přiveden do kontaktu s indentorem jako například diamantová nebo ocelová kulička nebo jiný tvar. Na testovaný objekt je aplikovaná předběžná malá síla a konstantně udržovaná po stanovenou dobu. Následně je změřena hloubka vtisku. Po měření je aplikovaná druhá konstantní celková síla po daný čas. Poté se síla sníží na předběžnou malou sílu. Znovu se konstantě udržuje a změří se hloubka vtisku. Indentor se odstraní ze zkušebního materiálu. Naměřený rozdíl mezi prvním a druhým vtiskem se použije k výpočtu Rockwellova čísla tvrdosti. [26] [27]



Obrázek 17 Stroj pro zkoušku tvrdosti [28]



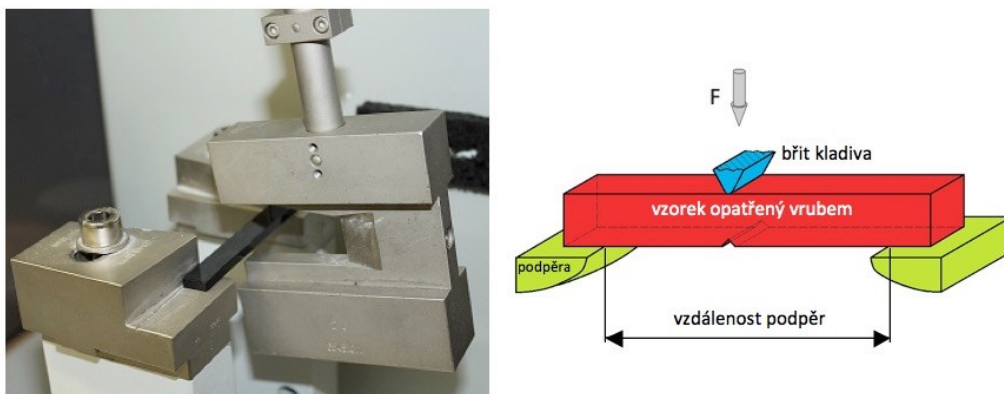
Obrázek 18 Graf tvrdosti dle pevnosti oceli [29]

2.3 Rázová zkouška v ohybu

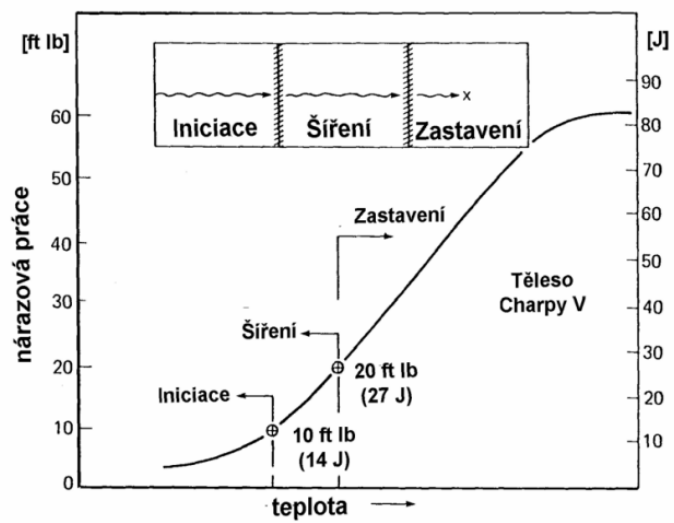
Rázová zkouška slouží pro předpověď chování materiálu při možnostech nárazového zatížení. Materiál se chová různě, mnoho z nich se rychle zhroutí v místě zlomu nebo rýhy. Nejvíce používaný test probíhá nárazy na tyč s vrubem visícím kladivem. Mezi nejznámější typy zkoušek řadíme Charpyho nárazový test a Izodův nárazový test. [18]

Charpyho kladivo

V roce 1896 přišel Russell s myšlenkou zbytkové lomové energie a vytvořil kyvadlový lomový test. George Charpy následně navrhl vylepšení stroje a přidal vrub do testovaného objektu. Tato zkouška slouží pro určení houževnatosti nebo schopnosti materiálu odolat lámání. Jde o rychlou deformaci, která určí množství energie absorbované materiálem během lomu. Testovaný objekt je umístěn na dvou podpěrách. Vzorky mohou být s vrubem tvaru U nebo V a také bez vrubu. V případě vzorku s vrubem je vrub umístěn směrem od kyvadla. Vrub by měl mít pravidelné rozměry a geometrii, aby nedošlo k ovlivnění výsledků. Následně se kladivo spustí dolů a narazí na objekt, který přerazí. Při nárazu předá kladivo část své kinetické energie, tudíž se nevrátí do stejné výšky jako na začátku. Rozdíl výšek je hodnota pro absorbovanou energii. Rychlá obsluha stroje, rychlé a levné výsledky dělají z Charpyho kladiva jedenu z nejpoužívanějších metod rázového testování v průmyslu. [30]



Obrázek 19 Princíp Charpyho kladiva [31]



Obrázek 20 Graf rázové zkoušky v ohybu [32]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je navržení zkušebních těles a jejich následná realizace za pomoci aditivních technologií. Za pomoci mechanického testování získání jejich vlastností ze statisticky vyhodnocených naměřených dat.

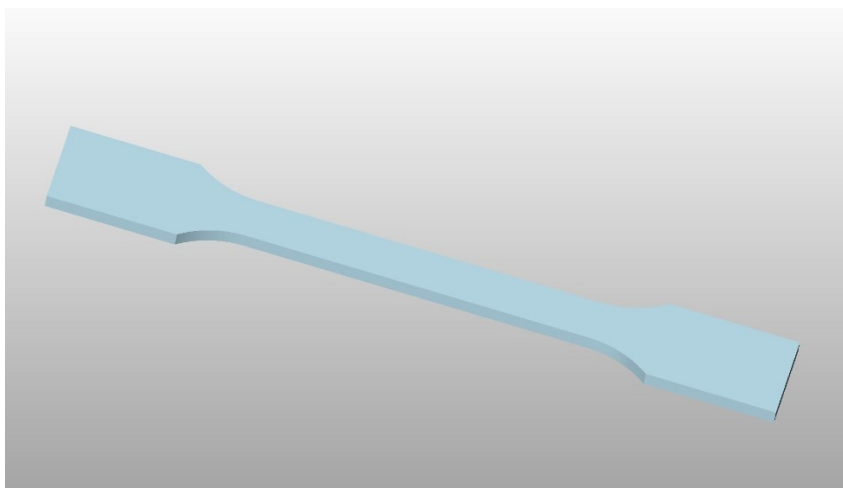
V rámci výroby zkušebních těles byly navrženy dvě tělesa různých tvarů. Každé těleso bylo vyrobeno ze dvou různých 3D tiskáren a vstřikovacího stroje, z čehož všechny pro výrobu používají jiný filament.

Při testování těles byly provedeny tři mechanické zkoušky, tj. ohyb, rázová houževnatost a tah. Z každé zkoušky byly získány data a následně statisticky vyhodnoceny. Dále byly porovnány výsledky jednotlivých materiálů.

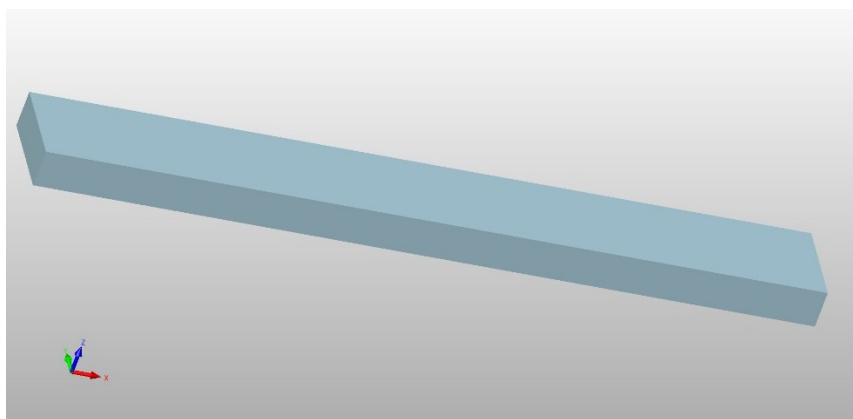
4 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

4.1 Modelování zkušebních těles

Byla navržena dvě jednoduchá zkušební tělesa za pomoci programu ZW3D 2023 Professional. Z mnoha programů pro 3D modelování byl vybrán právě ZW3D 2023 Profession z důvodu jeho jednoduchosti a rychlosti vzhledem ke geometrii modelů. Program využívá nejdříve 2D modelování a nastavení délek součástí. Následně pomocí tlačítka lze model převést do 3D podoby za pomoci nastavení výšky. Zkušební těleso tvaru kosti bylo navrženo podle normy ČSN EN ISO 527-2 (Obrázek 21). To znamená, že dosahuje rozměrů 170x10(20)x4 mm (délka, šířka (šířka úchopů), výška). Druhá součást je kvádr, který byl zhotoven dle normy ČSN EN ISO 179 (Obrázek 22). Tudíž jeho rozměry jsou 80x10x4 mm.



Obrázek 21 Vymodelované těleso tvaru kosti v programu ZW3D 2023 Profession



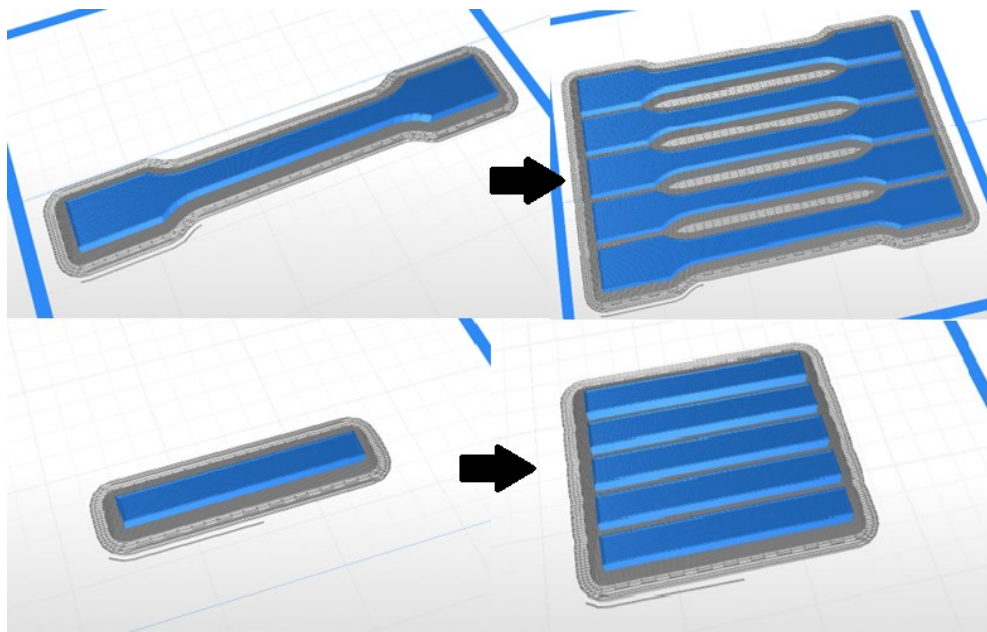
Obrázek 22 Vymodelované těleso kvádrů v programu ZW3D 2023 Profession

4.2 Příprava na tisk zkušebních těles

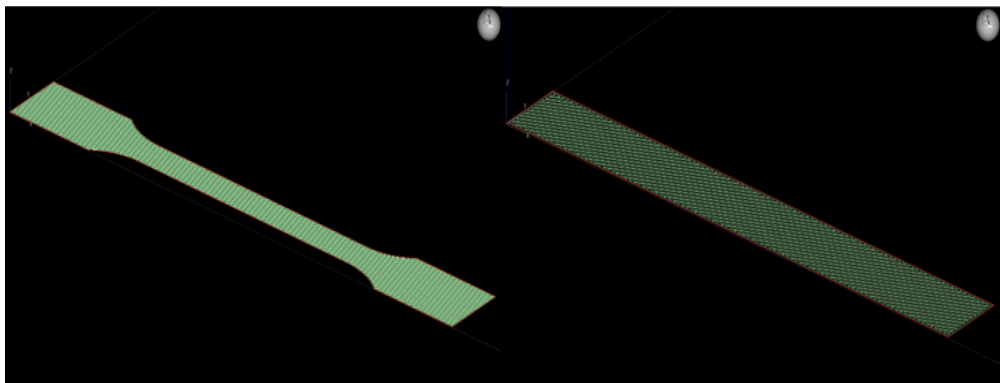
Pro tisk využívá každá 3D tiskárna svůj program, ve kterém se modely připraví pro samotný tisk. U tiskárny Zortax M200 jsem pracoval s programem Z-SUITE. Pro tiskárnu Stratasys Fortus 900mc byl použit program s názvem Control Center a Insight. Nejdříve bylo nutno nahrát dané modely do programu. Po nahrání byly součásti nastaveny pro tisk. Například výplň byla nastavena na 90 % (Obrázek 24). Důvodem je negativní dopad na vzhled povrchu u tištěné součásti, která by se mohla začít kroutit při 100 % výplni. Následně byly vhodně nastavené objekty znásobeny a vhodně umístěny (Obrázek 25). V programu Z-SUITE byla vidět šedá část, která představuje podložku (Obrázek 23). V programu byla také zobrazena odhadovaná doba výroby a také kolik bylo využito materiálu (Tabulka 3).

Odhadovaná doba výroby a množství materiálu				
Tiskárna	Model	Počet kusů	Odhadovaná doba výroby	Množství materiálu
Zortax M200	kost	1	1h 6m (66 minut)	5,42m (13g)
Zortax M200	kost	5	5h 7m (307 minut)	24,69m (59 g)
Zortax M200	kvádr	1	26m	2,05m (5 g)
Zortax M200	kvádr	5	1h 51m (111 minut)	8,45m (20 g)
Stratasys Fortus 900mc	kost	1	27m	12,21 cm ³
Stratasys Fortus 900mc	kvádr	1	12m	4,36 cm ³
Stratasys Fortus 900mc	kost, kvádr	10, 10	5h 56m (356 minut)	160,38 cm ³

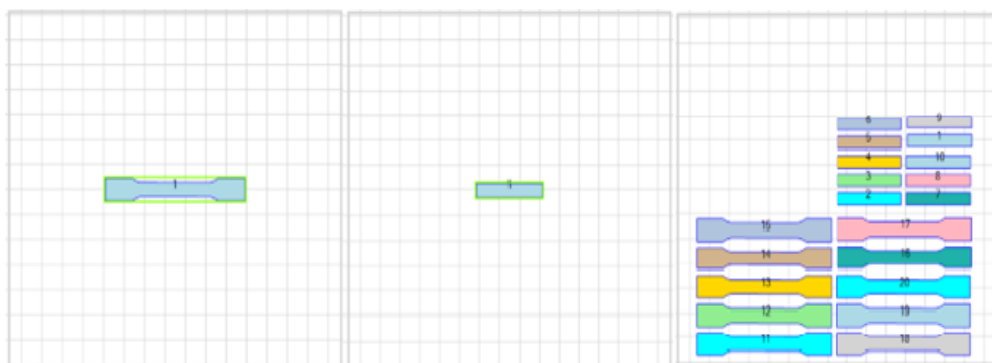
Tabulka 3 Odhadovaná doba výroby zkušebních těles



Obrázek 23 Z-SUITE duplikování těles



Obrázek 24 Insight tělesa s 90 % výplní



Obrázek 25 Control Center příprava těles pro tisk

4.3 3D tiskárny a materiál

4.3.1 Materiál

Zkušební tělesa byla vyrobena ze třech materiálů Z-ABS V2 Black, ABS M30 a HH-112 ABS. Byly použity struny o průměru 1,75 mm. Každý z materiálů má své jedinečné vlastnosti a možnosti využití (Tabulka 4). Materiály pro 3D tiskárny mají podobu struny uložené ve válcovém obalu, který se vkládá do zásobníku (Obrázek 26).

Mechanické vlastnosti použitých materiálů			
	Z-ABS V2 Black	ABS M30	HH-112 ABS
Modul v tahu	2300 MPa	2180 MPa	2700 MPa
Pevnost v ohybu	61 MPa	61 MPa	58 MPa
Roztažnost	2,5 %	4 %	8 %
Tepelná deformace (dle Vicata)	97 °C	99 °C	112 °C
Hustota	1,05 g/cm ³	1,04 g/cm ³	1,05 g/cm ³
Použití	Prototypy, pouzdra, figurky, koncepční modely	Funkční modely, prototypy, nástroje	Kryty a pouzdra pro aut. průmysl

Tabulka 4 Mechanické vlastnosti filamentů [33] [34] [35]



Obrázek 26 Filament ABS M30

4.3.2 3D Tiskárny

Stratasys Fortus 900mc je průmyslovou tiskárnou s vysokým výkonem a velkou přesností. Jedná se o FDM technologii. Dokáže produkovat díly o rozměrech až 914x610x914 mm. Pro tiskárnu Fortus byl využit filament ABS M30. Disponuje dvěma zásobníky pro filament, tudíž je možnost nepřetržitého provozu. Materiály pro tvorbu modelů disponují vlastnostmi jako je odolnost proti UV záření, teple, chemikáliím.



Obrázek 27 Stratasys Fortus 900mc

Zortrax M200 se řadí mezi profesionální, ale i hobby tiskárny, která využívá metody FFF. Tiskárna využívá vlastní software a filameny, ale dokáže tisknout i s filameny jiných značek. Pro tiskárnu Zortax byl použit filament Z-ABS V2 Black. Pracovní prostor tiskárny je o velikosti 200x200x180 mm.



Obrázek 28 Zortrax M200

Arburg allrounder 470 C je hydraulický vstřikovací stroj (Obrázek 29). Pro Arburg byl využit filament HH-112 ABS. V Tabulce 5 jsou uvedeny vstřikovací parametry.

Vstřikovací parametry	
Vstřikovací rychlost [mm/s]	100
Vstřikovací tlak [Mpa]	80
Tlak při dotlaku [Mpa]	60
Doba dotlaku [s]	15
Doba chlazení [s]	30
Teplota formy [°C]	60
Teplota válce 1 [°C]	230
Teplota válce 2 [°C]	235
Teplota válce 3 [°C]	240
Teplota válce 4 [°C]	245
Teplota trysky [°C]	250

Tabulka 5 Vstřikovací parametry



Obrázek 29 Arburg allrounder 470 C

5 PRŮBĚH MECHANICKÝCH ZKOUŠEK

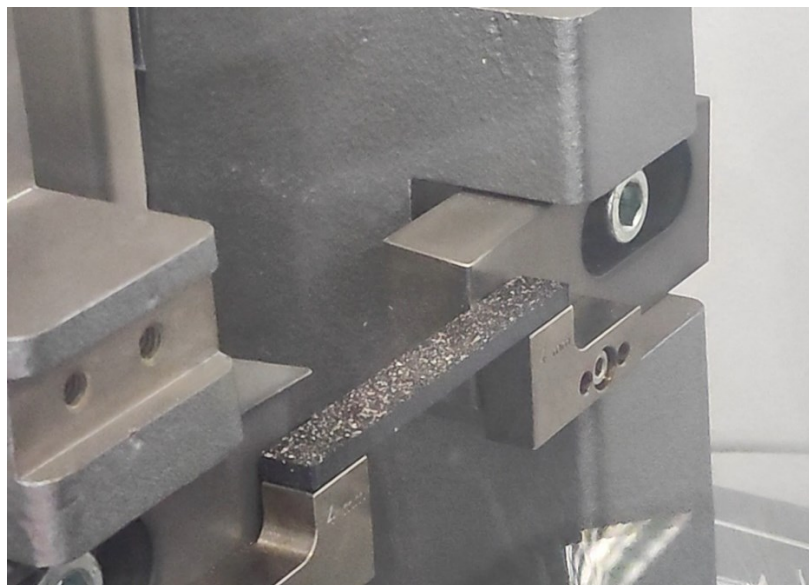
5.1 Zkouška vrubové houževnatosti

Zkouška vrubové houževnatosti byla prováděna na stroji zvaném Charpyho kladivo značky Zwick HIT50P (obrázek 30).



Obrázek 30 Charpyho kladivo

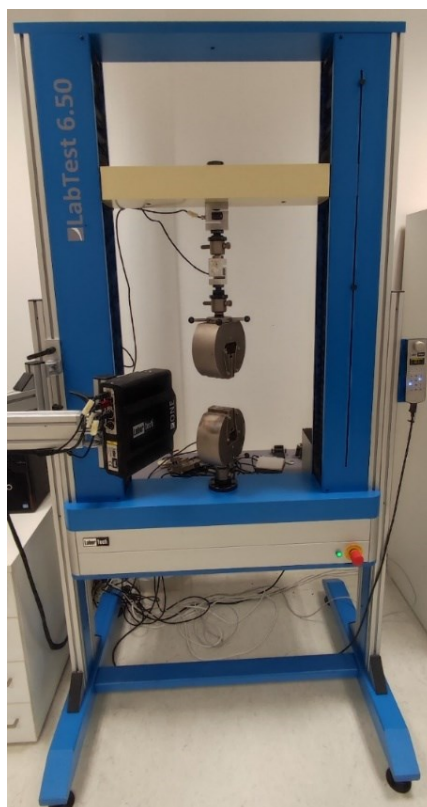
Nejdříve bylo nutno nastavit program přístroje na daný typ zkoušky. Po otevření ochranných dveří stroje bylo usazeno zkušební těleso tvaru kvádrů na základnu tak, aby se během nárazu nepohnulo (Obrázek 31). Jakmile byly ochranné dveře zavřeny, program v počítači se automaticky nastavil na provedení zkoušky pomocí tlačítka Spustit. Samotný stroj disponuje dvěma zelenými tlačítky daleko od sebe z bezpečnostních důvodů, kterými se spustí kladivo a provede se zkouška.



Obrázek 31 Umístění vzorku pro Charpyho kladivo

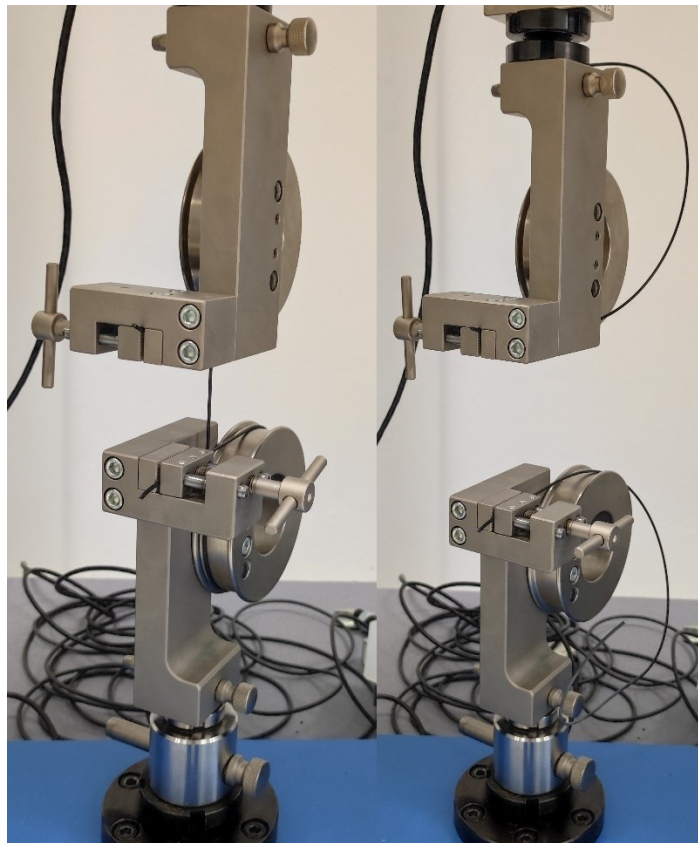
5.2 Tahová zkouška a ohybová zkouška

Pro tuto zkoušku byl použit zkušební stroj LabTest 6.50 s video extenzometrem od firmy LaborTech (Obrázek 32).



Obrázek 32 LabTest 6.50 s video extenzometrem

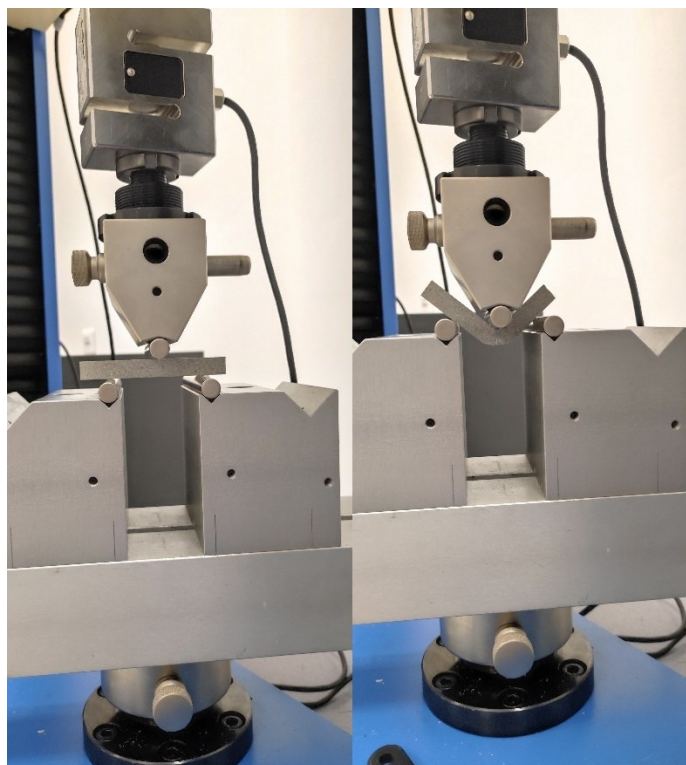
Tyto zkoušky se lišily pouze nastavci a případným nastavení programu před každou změnou pro daný typ zkoušky nebo tvaru vzorku. V případě struny filamentu byla struna obtočena kolem válcovitých částí a konce upevněny do malých čelistí tak, aby byla dostatečně napnutá (Obrázek 33). U vzorku tvaru kosti bylo těleso upevněno mezi dvě velké čelisti (Obrázek 34). Obě součásti musely být upevněny dostatečnou silou do čelistí, aby při testu nevyklouzly, což by způsobilo znehodnocení testu. Po spuštění stroje v programu byl testovaný objekt roztahován čelistmi, dokud neprasknul. V případě ohybu byla součást položena na střed základny. Poté byl testovaný materiál ohýbán za pomoci horní části stroje, která se sesouvala směrem dolů (Obrázek 35), dokud vzorek neprasknul nebo se nerozpadl na dvě části.



Obrázek 33 Tah filamentu před a po zkoušce



Obrázek 34 Tah zkušebního tělesa před a po zkoušce



Obrázek 35 ohyb zkušebního tělesa před a po zkoušce

6 VÝSLEDKY MECHANICKÝCH ZKOUŠEK

Z naměřených hodnot bylo provedeno statistické vyhodnocení. Pro každý materiál a zkoušku bylo uděláno deset opakování. Byly vypočítány tyto hodnoty (Tabulka 6).

X	Aritmetický průměr
m	Střední hodnota
s	Směrodatná odchylka
U_A	Nejistota typu A
min	Minimum
max	Maximum

Tabulka 6 Hodnoty statistického vyhodnocení

6.1 Zkouška rázové houževnatosti

Z naměřených hodnot pro zkoušku rázové houževnatosti je patrné, že vstříkovaný materiál HH-112 vydržel největší zatížení síly v průměru $897,5 \pm 8,4$ N. Naopak Z-ABS V2 dopadl při testování nejhůře s průměrnou hodnotou síly $411,8 \pm 24,7$ N, což je o více než 2x méně oproti vstříkovanému materiálu. Mezi těmito materiály se nachází materiál M30 s hodnotou $521,8 \pm 19,7$ N.

Statistika pro hodnoty síly Fmax [N]			
	Z-ABS V2 Black	ABS M30	HH-112 ABS
X	411,8	521,8	897,5
m	404,6	517,0	897,1
s	24,7	19,7	8,4
U _A	7,8	6,6	2,6
min	383,6	502,7	882,7
max	460,7	567,1	913,4

Tabulka 7 Statistika síly rázové houževnatosti

HH-122 se z pohledu pevnosti v rázu taktéž ukázal jako nejlepší. Jeho průměrná hodnota pevnosti v rázu činí $129,6 \pm 9,3$ kJ/m². Oproti dalším dvěma testovaným materiálům dosahuje vysokých hodnot až o 7-8x větších. Zde se oproti síle ukázal nejhorší materiál M30, jehož hodnoty jsou $15,7 \pm 1,7$ kJ/m².

Statistika pro pevnost v rázu ak [kJ/m²]			
	Z-ABS V2 Black	ABS M30	HH-112 ABS
X	17,5	15,7	129,3
m	17,6	15,1	129,9
s	1,5	1,7	9,3
U _A	0,5	0,6	2,9
min	15,5	13,7	110,7
max	20,1	18,4	143,3

Tabulka 8 Statistika pevnosti v rázu rázové houževnatosti

6.2 Tahová zkouška – struna filamentu

Tahová zkouška strun filamentů prokázala, že materiál M30 vydržel nejvíce dokud nepraskl, to je v průměru $102,4 \pm 5,4$ N. Jako druhý nejlepší se jeví Z-ABS V2 s $87,2 \pm 0,8$ N. Filament pro vstřikování se zde ukázal jako nejhorší a vydržel v pouhých $73,5 \pm 11,3$ N.

Statistika pro hodnoty síly Fmax [N]			
	Z-ABS V2 Black	ABS M30	HH-112 ABS
X	87,2	102,4	73,5
m	87,0	104,2	76,6
s	0,8	5,4	11,3
U_A	0,3	1,7	3,6
min	86,1	91,1	57,5
max	88,3	107,0	86,0

Tabulka 9 Statistika síly tahové zkoušky filamentu

6.3 Tahová zkouška – zkušební těleso

Při tahové zkoušce zkušebního tělesa je materiál HH-112 jednoznačně na prvním místě. Průměrná hodnota síly je $2133,6 \pm 8,7$ N. O téměř 2x menší hodnotu vydrželo těleso z filamentu M30. Na posledním místě je Z-ABS V2, které se lámalo při hodnotách v průměru $888,9 \pm 7,5$ N.

Statistika pro hodnoty síly Fmax [N]			
	Z-ABS V2 Black	ABS M30	HH-112 ABS
X	888,9	1202,5	2133,6
m	889,5	1204,3	2134,2
s	7,5	11,2	8,7
U _A	2,4	3,5	2,8
min	879,6	1186,3	2117,9
max	899,3	1220,1	2144,9

Tabulka 10 Statistika síly tahové zkoušky zkušebního tělesa

Jako nejlepší materiál, který dokáže odolávat deformaci při zatížení se prokázal HH-112. Jeho modul pružnosti nabýval průměrných hodnot $2204,0 \pm 41,6$ MPa. ABS M30 měl také poměrně vysokou odolnost $1866,8 \pm 18,5$ MPa. Naopak nejhůře odolával vzorek vyroben ze Z-ABS V2.

Statistika pro modul pružnosti Et [MPa]			
	Z-ABS V2 Black	ABS M30	HH-112 ABS
X	1207,3	1866,8	2204,0
m	1206,7	1833,8	2206,2
s	17,5	58,6	41,6
U _A	5,5	18,5	13,2
min	1174,2	1800,3	2148,6
max	1232,0	1967,2	2259,6

Tabulka 11 Statistika modulu pružnosti zkoušky filamentu

6.4 Ohybová zkouška

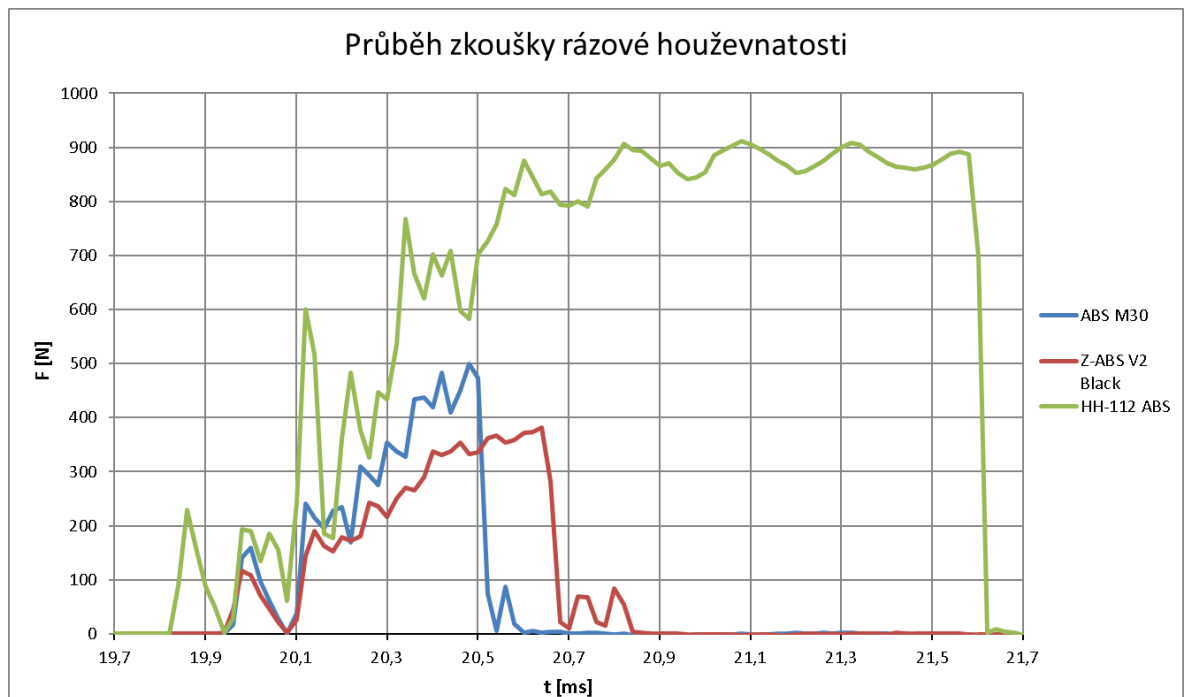
Nejvyšší průměrná síla se u ohybu prokázala u vstřikovaného materiálu $574,8 \pm 2,9$ N. ABS M30 vydržel sílu do $390,4 \pm 5,0$ N. Jako nejhorší se ukázal Z-ABS V2.

Statistika pro hodnoty síly Fmax [N]			
	Z-ABS V2 Black	ABS M30	HH-112 ABS
X	278,7	390,4	574,8
m	278,3	390,7	575,4
s	5,7	5,0	2,9
U_A	1,8	1,6	0,9
min	270,3	382,7	568,1
max	289,1	397,1	577,8

Tabulka 12 Statistika síly ohybové zkoušky

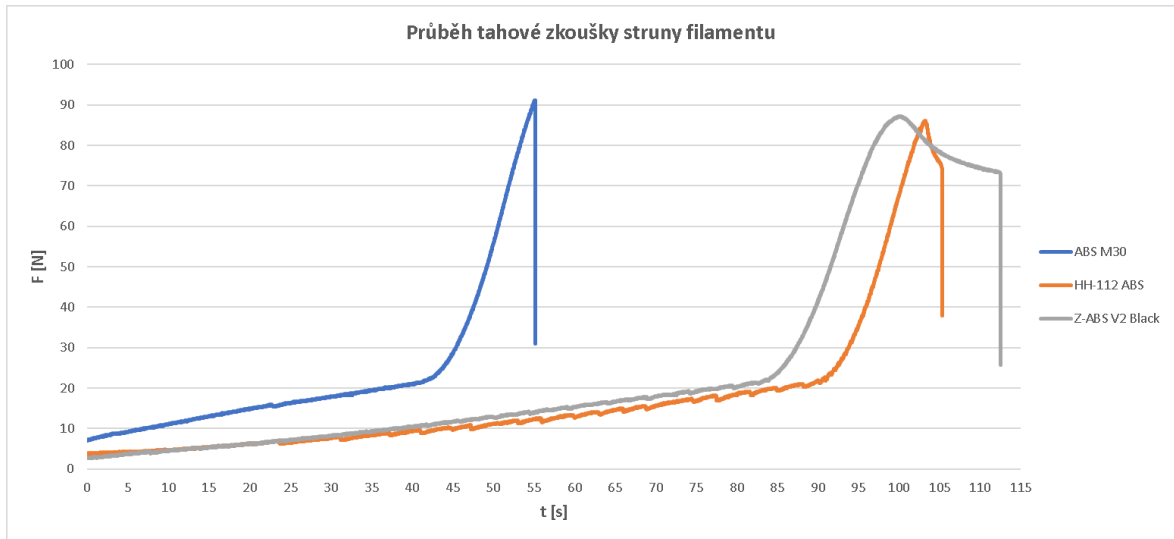
7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V grafu Obrázek 36 pro průběh zkoušky vrubové houževnatosti můžeme vidět, že na vstříkovaný materiál HH-112 byla vyvíjena největší síla a trvalo nejdéle zkušební těleso přerazit. Nejmenší síla byla potřeba na těleso ze Z-ABS V2, avšak čas pro rozlomení byl delší než u materiálu M30.



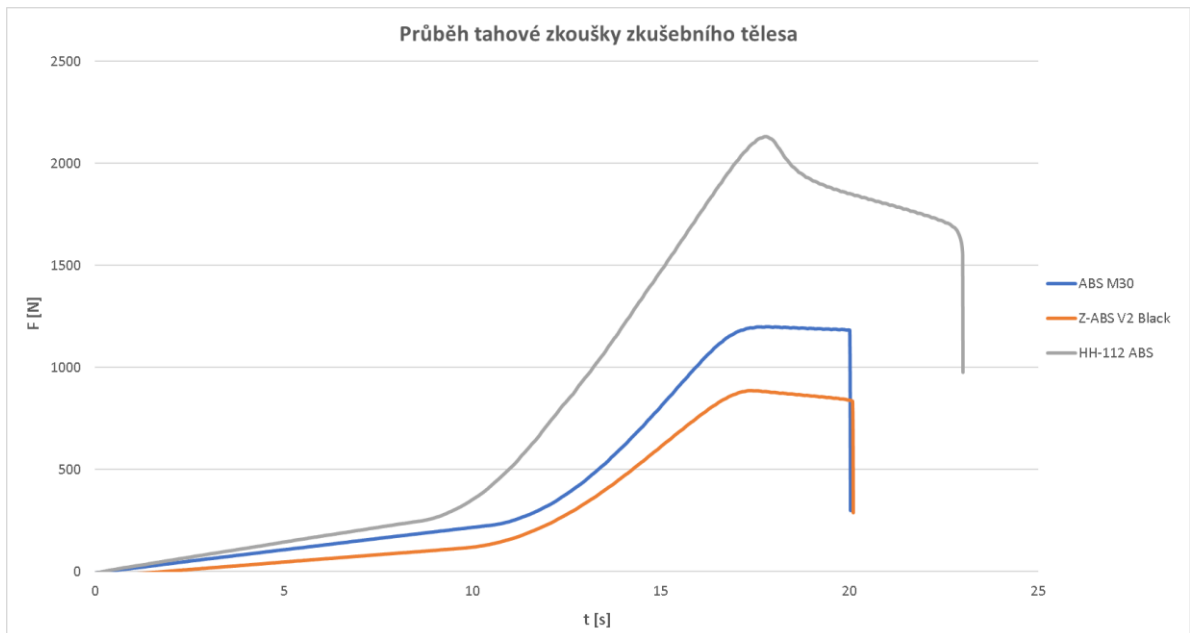
Obrázek 36 Graf rázové houževnatosti

Průběh tahové zkoušky pro strunu filamentu (Obrázek 37) ukázal, že pro utrnutí filamentu M30 je zapotřebí nejvyšší síly, avšak struna se hned přetrhla. Největší tažnost struny můžeme vidět u materiálu Z-ABS V2.



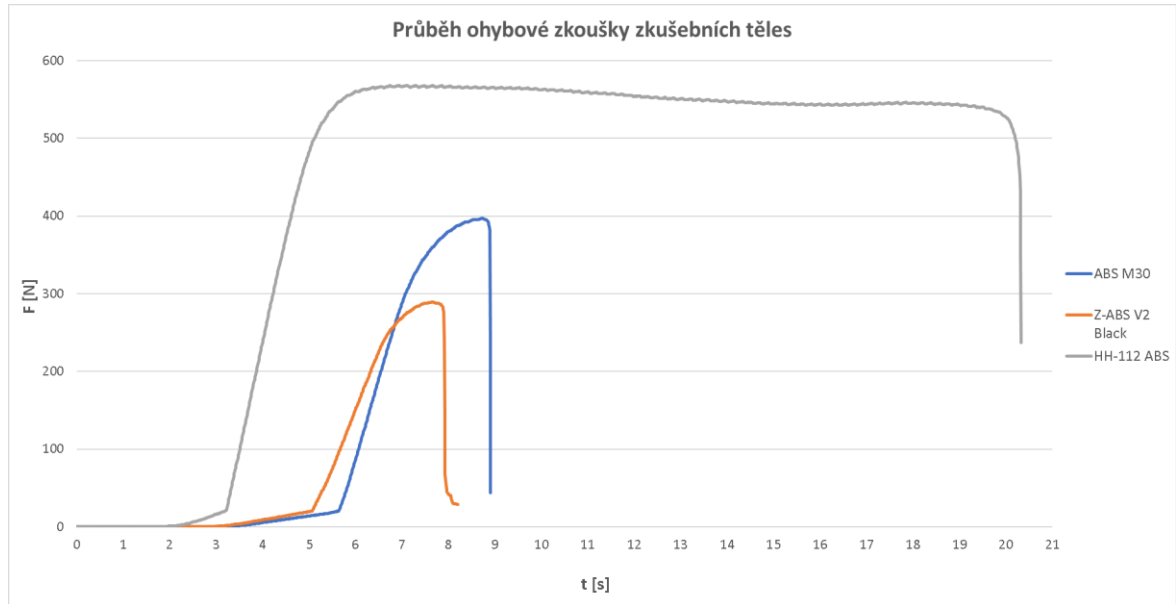
Obrázek 37 Graf tahové zkoušky filamentu

Tahová zkouška zkušebního tělesa (Obrázek 38) prokázala, že na vstříkovaný materiál HH-112 působila největší síla. Jako u jediného z materiálů zde můžeme vidět větší tažnost tělesa. Materiál M30 a Z-ABS V2 se natahoval téměř stejnou dobu, ale na těleso vyrobeno ze Z-ABS V2 byla vyvíjena nejmenší síla.



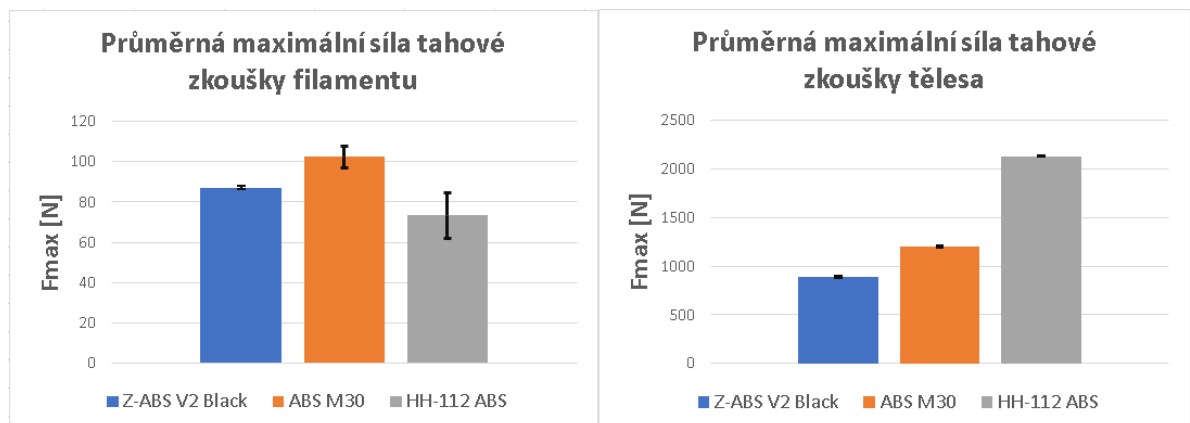
Obrázek 38 Graf tahové zkoušky zkušebního tělesa

HH-122 u průběhu ohybové zkoušky (Obrázek 39) jednoznačně vede. Působila na něj 2x větší síla než na těleso z materiálu Z-ABS V2 a ohyb trval nejdéle. Z-ABS V2 a M30 se hned zlomily.



Obrázek 39 Graf ohybové zkoušky

V grafu Obrázek 40 vidíme rozdíly sil potřebných pro přetržení struny filamentu a zkušebního tělesa. Jsou vidět velké rozdíly. U struny je nejvyšší síla vyvinuta na materiál M30 na rozdíl od tělesa, kde se řadí na druhé místo. Těleso z materiálu HH-112 je jednoznačně nejpevnější, ale jako filament je nejslabší.



Obrázek 40 Grafy tahových zkoušek filamentu a zkušebního tělesa

Při ohybové zkoušce se zkušební těleso z materiálu M30 rozlomilo na dvě části a rozletělo se do prostoru (Obrázek 42), což by mohlo být nebezpečné. Tělesa z filamentu Z-ABS V2 a HH-112 naopak zůstaly vždy jednotné (Obrázek 41, 43).



Obrázek 41 HH-112



Obrázek 42 ABS M30



Obrázek 43 Z-ABS V2

Z naměřených dat a grafů můžeme jednoznačně určit, že vstříkovaný materiál HH-112 je mechanicky nejlepší i když jako samotný filament byl nejhorší. Na zkušební tělesa z tohoto materiálu působila největší síla při každé zkoušce a také vydržel nejdéle, než se rozlomil. Opakem jsou zkušební tělesa vyrobená ze Z-ABS V2, která vždy praskla při nejmenší vyvinuté síle. Jen při zkoušce vrubové houževnatosti trvalo déle, než se zlomila tělesa z filamentu M30.

Pro výrobu produktů je zřejmé, že ze třech testovaných materiálů je právě vstříkovaný materiál HH-112 ideální z důvodů jeho nejlepších mechanických vlastností. Avšak jednalo by se o sériovou výrobu, protože příprava vstříkovacího stroje je časově náročná. Stroj pro výrobu využívá forem, do kterých je vstříkován granulát. Ty je nutno nejdříve vyrobít pro daný produkt a také je potřeba stroj při každé změně nastavit.

Bavili bychom se o kusové výrobě, pro tu by byl nejlepší materiál, který se umístil na druhém místě z pohledu mechanických vlastností, tj. ABS M30. Jelikož 3D tiskárny jsou velmi flexibilní při výrobě. Je možno tisknout výrobky různých tvarů a jednoduše umožňují změnu tisku.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala návrhem testovacích těles, jejich výrobou pomocí aditivních technologií a následným testováním mechanických vlastností. Na základě dosažených výsledků, které byly statisticky vyhodnoceny a vzájemně porovnány, byl vybrán mechanicky nejlepší materiál.

V teoretické části bakalářské práce byly popsány začátky 3D tisku, jeho postupy a principy a nové aplikace aditivních technologií. V práci je také popsáno mechanické testování od vlastností materiálů přes dělení mechanických zkoušek po samotné principy vybraných z nich.

V praktické části byly nejdříve navrženy dvě zkušební tělesa. Těleso tvaru kosti a jednoduchý kvádr pro daný typ zkoušky. Tyto tělesa byly následně vytištěny pomocí aditivních technologií. 3D tiskárny využívaly metody FDM, dále byl použit vstříkovací stroj. Jednotlivé tiskárny při výrobě pracují s vlastními materiály, jako jsou ABS M30, Z-ABS V2 Black a HH-112 pro vstříkování. Všechny mají odlišné vlastnosti, ať už jako samotný filament tak následně po vytištění výrobku. Filamenty a vytištěná zkušební tělesa byly následně testovány mechanickými zkouškami. Pro tyto účely byly využity stroje Zwick HIT50P a LabTest 6.50. Filamenty byly testovány v tahu. Zkušební tělesa byla testována v tahu, ohybu a rázové houževnatosti. Pro tah byly použity vzorky tvaru kosti. Testování kvádrových vzorků proběhlo na Charpyho kladivu a následně v ohybu.

Naměřená data z těchto zkoušek byla dle zadání nutno statisticky vyhodnotit. Z každé zkoušky byla vyhodnocena síla potřebná k přetrhnutí tělesa na dvě části. Dále z testu rázové houževnatosti byla vyhodnocena pevnost v rázu a u tahové zkoušky to byl modul pružnosti. Z každého měření byl také získán průběh síly působící na těleso v podobě grafu.

V poslední části bakalářské práce se dospělo k závěru, že ačkoliv byl vstříkovaný filament HH-112 mechanicky nejhorší oproti dalším dvěma testovaným materiálům, tak po výrobě tělesa vstříkováním byly jeho mechanické vlastnosti jednoznačně nejlepší. Jako druhé se jevily zkušební tělesa z materiálu ABS M30 a v poslední řadě Z-ABS V2.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2022* [online]. 3dsourced.com, 2021 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.3dsourced.com/guides/history-of-3d-printing/>
- [2] *Additive manufacturing*. Second edition. Boca Raton ; London ; New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2020. ISBN 978-1-03-223859-3.
- [3] *HISTORIE 3D TISKU* [online]. www.fs.cvut.cz [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/historie-3d-tisk/>
- [4] *SELECTIVE LASER SINTERING HIGH TEMPERATURE WORKSTATION* [online]. www.thestoryoftexas.com [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.thestoryoftexas.com/discover/artifacts/selective-sintering-high-temperature-workstation-spotlight-10-1-19>
- [5] *Programy pro 3D tisk* [online]. for3dtisk.cz [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://for3dtisk.cz/programy-pro-3d-tisk-blog/>
- [6] *What is SLA 3D printing?* [online]. www.hubs.com [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>
- [7] *What is SLS 3D printing?* [online]. www.hubs.com [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3d-printing/>
- [8] *What is FDM (fused deposition modeling) 3D printing?* [online]. www.hubs.com [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>
- [9] *Blast Studio 3D prints column from mycelium to make "architecture that could feed people"* [online]. www.dezeen.com, 2022 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.dezeen.com/2022/01/18/blast-studio-tree-column-mycelium-design/>
- [10] *Step into the future – 3D-printed houses are here and in high demand* [online]. designwanted.com [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://designwanted.com/3d-printed-houses/>

- [11] *Towards Sustainable and Affordable Housing: Is 3D Printing the Future or the Present?* [online]. www.archdaily.com, 2022 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.archdaily.com/979103/towards-sustainable-and-affordable-housing-is-3d-printing-the-future-or-the-present>
- [12] *University of Virginia 3D-prints living soil walls that sprout greenery* [online]. www.dezeen.com, 2022 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.dezeen.com/2022/09/05/university-of-virginia-3d-printed-soil-seed-walls/?li_source=LI&li_medium=rhs_block_1
- [13] *The Smallest 3D Printer in the World Is No Bigger Than a Match* [online]. www.3dnatives.com, 2023 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/the-smallest-3d-printer-in-the-world-240220234/#!>
- [14] *Wilson Introduces the First-Ever 3D-Printed Airless Basketball* [online]. mymodernmet.com, 2023 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://mymodernmet.com/wilson-3d-printed-airless-basketball/>
- [15] *Olomoucká porodnice tiskne 3D model nenarozeného dítěte, stojí 1130 Kč* [online]. www.vitalia.cz, 2022 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.vitalia.cz/clanky/porodnice-olomouc-tiskne-3d-model-nenarozeneho-ditete/>
- [16] *3D tisk vyrobí i model plodu. Pomůže to třeba u vývojových vad, říká lékař* [online]. idnes.cz, 2022 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/olomouc/zpravy/rozhovor-lekar-petr-polak-3d-model-plodu-vyvojove-vady.A220509_664006_olomouc-zpravy_stk
- [17] *3D printed models in pregnancy and its utility in improving psychological constructs: a case series* [online]. threedmedprint.biomedcentral.com, 2022 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://threedmedprint.biomedcentral.com/articles/10.1186/s41205-022-00144-w>
- [18] *Mechanical Testing methods* [online]. www.kemet.co.uk [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.kemet.co.uk/blog/metallography/mechanical-testing-methods>

- [19] *WHAT IS MECHANICAL TESTING? (A COMPLETE GUIDE)* [online]. www.twi-global.com [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-mechanical-testing>
- [20] *Přehled vlastností a struktura materiálu* [online]. slideplayer.cz, 2012 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3270067/>
- [21] *14 Mechanical Properties of Materials With Examples* [online]. marinerspointpro.com [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://marinerspointpro.com/mechanical-properties-of-materials-examples/>
- [22] *ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLŮ* [online]. slideplayer.cz [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3118719/>
- [23] *Tensile Tester: The Complete Guide* [online]. www.testertextile.com, 2022 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.testertextile.com/tensile-tester-the-complete-guide/>
- [24] *1 Statická zkouška tahem* [online]. zamekkurim.cz [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: https://www.zamekkurim.cz/security/Dum%20-%20Digitalni%20ucebni%20materialy/13_Sada_Materialy_2/VY_32_INOVACE_13_05_Staticka_zkouska_tahem.pdf
- [25] *4.ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ* [online]. chemikalie.upol.cz [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf
- [26] *Principle of Rockwell Hardness Testing* [online]. www.phase2plus.com [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: https://www.phase2plus.com/principle_rockwell_hardness_testing/
- [27] *GUIDE TO ROCKWELL HARDNESS* [online]. yorksaw.com [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.yorksaw.com/rockwell-hardness/>
- [28] *TESTING MATERIALS IN INDUSTRY* [online]. technologystudent.com, 2012 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://technologystudent.com/joints/matsind1.html>
- [29] *Tvrdość kovů* [online]. wikipedia.org [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tvrdość_kovů

- [30] *Charpy impact test* [online]. www.zwickroell.com [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/industries/materials-testing/impact-test/charpy-impact-test/>
- [31] *Mechanické vlastnosti polymerů – dynamické rázové namáhání* [online]. publi.cz [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/11.html>
- [32] *HOUŤEVNATOST KOVOVÝCH MATERIÁLŮ A JEJÍ ZKOUŠENÍ* [online]. vut.cz, 2010 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=31398
- [33] *Novodur HH-112* [online]. albis.com, 2023 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.albis.com/en/products/download/doc/en/SI/styrolution/NovodurHH-112.pdf>
- [34] *ABS-M30* [online]. stratasys.com [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/fdm-materials/abs-m30/mds_fdm_abs-m30_0921a.pdf
- [35] *Z-ABS 2 TECHNICAL DATA SHEET* [online]. zortrax.com, 2020 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: https://cf.zortrax.com/wp-content/uploads/2020/09/Z-ABS_2_Technical_Data_Sheet_eng.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SLA	Stereolitografický tisk
CNC	Počítačové numerické řízení
SLS	Selektivní laserové sítování
FDM	Modelování tavení vytlačovaného materiálu
CAD	Počítačem podporovaný návrh
UV	Ultrafialové záření
CO ₂	Oxid uhličitý
FFF	Tisk tavením vlákna
PLA	Kyselina polyléčná (Polylaktid)
PETG	Polyethyltereftalát Glykol
PEI	Polyetherimid
LCD	Displej s tekutými krystaly
ABS	Akrylonitril-butadien-styrenový kopolymer
X	Aritmetický průměr
m	Střední hodnota
s	Směrodatná odchylka
U _A	Nejistota typu A

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 První SLA-1 3D tiskárna Appatarus z roku 1992 [3].....	9
Obrázek 2 První výrobek tiskárny Betsy [4]	10
Obrázek 3 Původní patent FDM [2]	10
Obrázek 4 SolidWorks [5]	11
Obrázek 5 Schéma SLA [6]	12
Obrázek 6 Schéma SLS [7].....	13
Obrázek 7 FDM tisk princip [8]	15
Obrázek 8 Sloup z mycelia [9]	16
Obrázek 9 3D tisk PERI [11]	17
Obrázek 10 3D vytištěná živá stěna [12]	18
Obrázek 11 Nejmenší 3D tiskárna [13]	18
Obrázek 12 Airless basketbalový míč [14].....	19
Obrázek 13 Plod s obličejovým rozštěpem ve 30 týdnu [17].....	20
Obrázek 14 Schéma zkoušky tahem [25]	24
Obrázek 15 Nákres vzorku tvaru psí kosti [24]	24
Obrázek 16 Diagram tahové zkoušky [25]	25
Obrázek 17 Stroj pro zkoušku tvrdosti [28].....	26
Obrázek 18 Graf tvrdosti dle pevnosti oceli [29]	26
Obrázek 19 Princip Charpyho kladiva [31]	27
Obrázek 20 Graf rázové zkoušky v ohybu [32].....	28
Obrázek 21 Vymodelované těleso tvaru kosti v programu ZW3D 2023 Profession..	31
Obrázek 22 Vymodelované těleso kvádrů v programu ZW3D 2023 Profession	31
Obrázek 23 Z-SUITE duplikování těles	33
Obrázek 24 Insight tělesa s 90 % výplní.....	33
Obrázek 25 Control Center příprava těles pro tisk	33
Obrázek 26 Filament ABS M30	34
Obrázek 27 Stratasys Fortus 900mc	35
Obrázek 28 Zortrax M200	35
Obrázek 29 Arburg allrounder 470 C	36
Obrázek 30 Charpyho kladivo	37
Obrázek 31 Umístění vzorku pro Charpyho kladivo	38
Obrázek 32 LabTest 6.50 s video extenzometrem.....	38

Obrázek 33 Tah filamentu před a po zkoušce.....	39
Obrázek 34 Tah zkušebního tělesa před a po zkoušce.....	40
Obrázek 35 ohyb zkušebního tělesa před a po zkoušce.....	40
Obrázek 36 Graf rázové houževnatosti.....	46
Obrázek 37 Graf tahové zkoušky filamentu	47
Obrázek 38 Graf tahové zkoušky zkušebního tělesa	47
Obrázek 39 Graf ohybové zkoušky	48
Obrázek 40 Grafy tahových zkoušek filamentu a zkušebního tělesa	48
Obrázek 41 HH-112.....	49
Obrázek 42 ABS M30.....	49
Obrázek 43 Z-ABS V2	49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Druhy mechanických vlastností [20]	21
Tabulka 2 Dělení mechanických zkoušek [22]	23
Tabulka 3 Odhadovaná doba výroby zkušebních těles	32
Tabulka 4 Mechanické vlastnosti filamentů [33] [34] [35]	34
Tabulka 5 Vstřikovací parametry	36
Tabulka 6 Hodnoty statistického vyhodnocení	41
Tabulka 7 Statistika síly rázové houževnatosti	42
Tabulka 8 Statistika pevnosti v rázu rázové houževnatosti	42
Tabulka 9 Statistika síly tahové zkoušky filamentu	43
Tabulka 10 Statistika síly tahové zkoušky zkušebního tělesa	44
Tabulka 11 Statistika modulu pružnosti zkoušky filamentu	44
Tabulka 12 Statistika síly ohybové zkoušky	45