

DYNAMICKÉ ZKOUŠKY 3D TIŠTĚNÝCH TĚLES

Halenčák Tomáš

Bakalářská práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš Halenčák**
Osobní číslo: **T20729**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Dynamické zkoušky 3D tištěných těles**

Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerše
2. Výroba vzorků technologií 3D tisku
3. Provedení dynamické zkoušky vyrobených těles
4. Závěr a zhodnocení řešené problematiky

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

Seznam doporučené literatury:

GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HOTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Cincinnati: Hanser Publications, [2016]. ISBN 9781569905821.

GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Second edition. London: Springer, [2015]. ISBN 9781493921126.

Charles Bell. 2014. *Maintaining and Troubleshooting Your 3D Printer* (1st. ed.). Apress, USA. ISBN:978-1-4302-6809-3

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Strnad**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

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

Ve Zlíně dne 23. února 2022

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 užit 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 skládá ze dvou částí. Popisuje různé typy dynamických zkoušek, které se využívají pro zjištění mechanických vlastností 3D tištěných těles. Dále je také obsahem této práce popis metod 3D tisku a zkoušky Charpyho kladivem. V první části je vysvětlen důvod, princip a využití dynamických zkoušek, včetně průběhu různých metod 3D tisku. V druhé polovině práce je popsán průběh a výsledek provedené zkoušky Charpyho kladivem, včetně detailního popisu zvolených materiálů. Výsledné hodnoty jsou mezi sebou porovnány, seřazeny do tabulek a zaneseny do grafů.

Klíčová slova: mechanické zkoušky, dynamické zkoušky 3D tištěných těles, 3D tisk, zkouška Charpyho kladivem

ABSTRACT

This two part thesis describes different types of dynamic testing used for determining mechanical properties of 3D printed objects. This thesis also includes the description of the 3D printing methods and the description of the Charpy impact test. In the first part there is the explanation of the cause, the principle and the use of dynamic testing, including the process of the different 3D printing methods. In the second half of the thesis there is the process and the conclusion of the conducted Charpy impact test, including detailed description of the chosen materials. Final test results are compared to each other, sorted into tables and shown graphically.

Keywords: mechanical testing, dynamic testing of 3D printed objects, 3D print, Charpy impact test

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Janu Strnadovi za praktické rady, cenné zkušenosti a vstřícný přístup při vypracovávání mé bakalářské práce a přátelům za podporu ve studiu.

Zároveň děkuji svým rodičům za to, že mi umožnili naplno se věnovat této bakalářské práci.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	12
1.1 MECHANICKÉ ZKOUŠKY MATERIÁLŮ.....	15
1.1.1 Statické zkoušky.....	16
1.1.2 Dynamické zkoušky	24
1.1.3 Únavové zkoušky	24
1.2 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ.....	27
1.3 ZKOUŠKY RÁZOVÉ.....	28
1.3.1 Zkouška vrubové houževnatosti.....	28
1.3.2 Rázová zkouška pádem	30
2 METODY 3D TISKU	31
2.1 FUSED DEPOSITION MODELING (FDM).....	31
2.1.1 Tiskové materiály:.....	37
2.1.2 FLEX.....	39
2.1.3 Kompozitní materiály.....	39
2.1.4 Fotopolymery (Pryskyřice)	39
2.1.5 Podpůrné materiály:	40
2.2 SELECTIVE LASER SINTERING (SLS).....	40
2.3 STEREOLITHOGRAPHY (SLA).....	42
II PRAKTICKÁ ČÁST	44
3 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	45
4 POUŽITÝ STROJ	46
5 TESTOVANÉ MATERIÁLY	48
5.1 AKRYLONITRIL-STYREN-AKRYL (ASA)	48
5.2 FILLAMENTUM NYLON CF15	48
5.3 FILLAMENTUM NYLON AF80	49
5.4 Z-ULTRAT	50
6 NÁVRH A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	51
7 PRŮBĚH ZKOUŠKY	54
8 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY	64
ZÁVĚR	67
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	68
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	71
SEZNAM OBRÁZKŮ	73
SEZNAM TABULEK	74

ÚVOD

V současné době se technologie 3D tisku využívá všude kolem nás. Jde o automatizovaný proces, který vytváří z navrhnutého digitálního 3D modelu skutečné reálné výrobky. Nejčastěji používanou technologií je metoda tisku Fused Deposition modeling (FDM), také známá jako Fused Filament Fabrication (FFF). Jedná se o aditivní způsob výroby, kdy dochází k postupnému přidávání materiálu vrstvu po vrstvě. Dodnes je tato technologie označována pod názvem Rapid Prototyping, protože dříve se používala převážně na rychlou výrobu prototypů. Výroba prototypu pomocí 3D tisku totiž umožňuje firmám levně otestovat produkt před větší finanční investicí a spuštěním hromadné výroby. Kvůli rychlosti výroby, ekonomické úspornosti a jednoduchému způsobu úpravy modelu tištěného výrobku, se technologie 3D tisku v nedávné době začala používat velmi často i v malosériové výrobě. Technologií 3D tisku stále přibývá včetně nových tiskáren i tiskových materiálů. Během posledních deseti let se stala tato metoda výroby velmi rozšířená a díky tomu je cenově dostupná i pro běžné domácí uživatele.

Tato bakalářská práce obsahuje rozdělení, popis jednotlivých druhů a průběh statických i dynamických zkoušek. Také popisuje výhody, nevýhody a využití základních technologií 3D tisku, jako jsou FDM, SLA a SLS. Zaměřuje se na dynamické zkoušení polymerních materiálů a věnuje se popisu jednotlivých komponentů 3D tiskárny, typům tiskových materiálů (filamentů) a jejich použití.

Obsahem praktické části této práce je popis použitého zkušebního zařízení (Charpyho kladiva), návrh a konstrukce normalizovaných zkušebních vzorků v programu CATIA a jejich následné vytištění na 3D tiskárně Zortrax M200 Plus. Dále je zde popsán průběh rázové zkoušky materiálů ASA, Z-ULTRAT, Nylon AF80 a Nylon CF15, včetně jejich charakteristiky. Praktická část je ukončena rozdělením výsledných hodnot měření jednotlivých materiálů do příslušných tabulek a grafů s následným vyhodnocením velikostí rázových a vrubových houževnatostí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Ke správnému a hospodárnému využití technických materiálů je nezbytné dobře znát jejich vlastnosti a umět je dobře identifikovat. Materiálové vlastnosti rozdělujeme na: fyzikální, chemické a mechanické. [2]

Fyzikální vlastnosti jsou např. hustota, bod tání, vodivost, koeficient tepelné roztažnosti. [2]

Mezi chemické vlastnosti patří např. korozivzdornost nebo žáruvzdornost. [2]

Mechanické vlastnosti udávají chování materiálů při různých způsobech zatížení a jejich zpracování, jako je pevnost, tažnost, odolnost proti opotřebení. [3]

Mechanické a fyzikální vlastnosti materiálů jsou dány jejich chemickým složením a vnitřní strukturou. Vlastnosti mohou být dále výrazně ovlivněny mechanickým nebo tepelným zpracováním. [1]

Mechanické a fyzikální vlastnosti jsou klíčovým faktorem, pro určení vhodného materiálu pro danou aplikaci. Téměř v každém případě konstruktér navrhuje součást tak, aby fungovala v daném rozsahu vlastností. Mnoho mechanických vlastností je vzájemně závislých, např. vyšší pevnost může být spojena s nižší tažností. [1]

Fyzikální vlastnosti:

- hustota,
- teplota tání a tuhnutí,
- teplota tavení,
- teplota lití,
- délková a objemová roztažnost,
- teplotní součinitel délkové a objemové roztažnosti,
- tepelná vodivost,
- elektrická vodivost,
- měrný elektrický odpor,
- supravodivost,
- magnetické vlastnosti. [2]

Chemické vlastnosti:

- odolnost proti korozi (korozivzdornost), [3]
- odolnost proti vysokým teplotám (žárovzdornost). [3]

Mechanické vlastnosti:

- tažnost,
- pružnost,
- tvrdost,
- pevnost,
- odolnost proti opotřebení. [2]

Tažnost:

Tažnost je schopnost materiálu plasticky se deformovat, aniž by došlo k porušení, a zachovat si nový tvar po odstranění zatížení. Tažnost se zjišťuje pomocí tahové zkoušky jako procento prodloužení nebo zmenšení plochy průřezu vzorku před porušením. Zkoušku tahem se také používá ke stanovení Youngova modulu neboli modulu pružnosti. Je to důležitý poměr napětí a deformace používaný v mnoha konstrukčních výpočtech. Schopnost materiálu odolávat praskání nebo lámání při namáhání určuje vhodnost materiálu pro další způsoby zpracování. Některé další procesy, jako je zpracování za studena, mají tendenci činit kov méně tvárným. [5,7,8]

Tuhost, pružnost:

Na rozdíl od materiálů, které vykazují plasticitu (změna tvaru není vratná), se pružný materiál po odstranění napětí vrátí do svého původního tvaru. Sklo je příkladem tuhého materiálu s vysokým modulem pružnosti, zatímco guma je materiál s nízkým modulem pružnosti. [5,7]

Lomová houževnatost:

Lomová houževnatost je schopnost materiálu odolat nárazu. Rázová odolnost se měří Charpyho zkouškou, při níž zatížené kyvadlo dopadá na normalizovaný vzorek. [6]

Tvrдост:

Tvrдост je vlastnost materiálu odolávat plastické deformaci. Vztahuje se také na jeho odolnost proti poškrábání, otěru nebo řezu. Tvrдост se měří řadou metod (Brinellova, Rockwellova a Vickersova), které měří hloubku a plochu vtisku tvrdšího materiálu do zkušebního tělesa. [4,6]

Plasticita:

Plasticita naopak od pružnosti charakterizuje schopnost určitého materiálu udržet svůj nový tvar při působení tvářecích sil. Materiály přecházejí z pružného chování na plastické na mezi kluzu. [6]

Únava materiálu:

Únava materiálu může vést k lomu při opakovaném nebo kolísavém namáhání, jehož maximální hodnota je menší než pevnost materiálu v tahu. Vyšší napětí urychlí dobu do poruchy a naopak. Mez únavy označuje maximální napětí, které materiál vydrží při daném počtu cyklů. U míry únavové životnosti se zatížení nemění a měří se, kolik cyklů zatížení materiál vydrží, než dojde k poruše. Únavová pevnost je důležitým hlediskem při navrhování součástí vystavených podmínkám opakovaného zatížení. [8,9]

Pevnost ve smyku:

Pevnost ve smyku je důležitá v aplikacích, jako jsou šrouby nebo nosníky, kde je důležitý směr i velikost napětí. Ke smyku dochází, když směrové síly způsobí, že se vnitřní struktura materiálu posune sama proti sobě na úrovni zrn. [3,7]

Pevnost v tahu:

Nejdůležitější vlastností materiálu je pevnost v tahu (mez pevnosti). Pevnost v tahu určuje velikost zatížení, které materiál vydrží, než dojde k jeho porušení. Mez pevnosti rozlišuje materiály křehké od materiálů tvárnějších. Velikost meze pevnosti v tahu se definuje v MPa. [2,7]

Pevnost v kluzu:

Pevnost v kluzu (mez kluzu) popisuje bod, po jehož dosažení se zatěžovaný materiál již nevrátí do původní polohy nebo tvaru. Deformace přechází z pružné do plastické. Stejně jako pevnost v tahu se mez kluzu udává v MPa. [7,9]

Odolnost proti opotřebení:

Odolnost proti opotřebení je schopností materiálu odolávat působení tření dvou materiálů o sebe (např. adheze, oděr, poškrábání, drážkování, zadírání). Pokud mají materiály různou tvrdost, mohou se účinky nejdříve projevit u měkčího tělesa. Válcování může způsobit oděr kvůli přítomnosti cizích materiálů. Odolnost proti opotřebení lze měřit jako množství ztracené hmotnosti při daném počtu cyklů otěru při daném zatížení. [3,7]

1.1 Mechanické zkoušky materiálů

Při výrobě a vývoji součástí není selhání materiálu žádnou vzácností (s vážnými důsledky pro bezpečnost). Mechanické nebo často destruktivní zkoušky jsou v mnoha průmyslových odvětvích nezbytnou součástí zajištění kvality. Mechanické zkoušky se ve většině případů provádějí za účelem stanovení číselných hodnot charakterizujících vlastnosti materiálu prostřednictvím standardního zkušebního uspořádání. Mechanické zkoušení zanechává materiál vzorku poškozený a ve většině případů nepoužitelný. [4,9]

Využití mechanického zkoušení materiálů:

- Měření mechanických vlastností materiálů pro kvalifikaci podle požadavků. [5]
- Získání důležitých údajů pro návrh nebo výzkum a vývoj. [5]

- Zajištění bezpečnosti konstrukcí a součástí. [5]
- Vyšetřování vadných součástí. [5]

Základní rozdělení mechanických zkoušek materiálů (podle způsobu namáhání zkušebního vzorku):

- Statické zkoušky (součást je zatěžována pozvolna).
- Dynamické zkoušky (součást je namáhána náhle).
- Únavové (cyklické) zkoušky (součást je opakovaně namáhána v tzv. cyklech).

Příklady mechanických zkoušek materiálů:

- zkoušky materiálů v tahu,
- zkoušky tlakem,
- zkoušky ohybu materiálů,
- rázové zkoušky materiálů,
- zkoušky ohybu materiálů,
- zkoušky tvrdosti materiálu. [8]

1.1.1 Statické zkoušky

Tyto zkoušky patří mezi nejpoužívanější a jsou základem pro stanovení pevnostních hodnot materiálu. Testovaný materiál je zatěžován pozvolna bez rázu. Patří sem zkoušky tahem, tlakem, ohybem, krutem a stříhem. Zkušební stroje se nazývají trhací stroje a mohou být jednoúčelové (jeden typ zkoušky) anebo univerzální (pro více typů zkoušek). [2,3]

Zkouška tahem:

Jedná se o nejrozšířenější typ statické zkoušky. Provádí se téměř u všech materiálů, protože z ní získáváme většinu základních hodnot potřebných pro výpočet konstrukčních prvků a pro volbu vhodného materiálu. Zkoušky tahem se provádí na zkušebních tyčích, které mají

tvary i rozměry normalizovány (ČSN 42 03 10). Tyto zkušební vzorky jsou buď kruhové nebo ploché, krátké nebo dlouhé. Zkušební tyče se liší tvarem hlav. Zvolí se podle vlastností testovaného materiálu a upínacího zařízení trhačního stroje, které je většinou vyměnitelné. Původní délka l_0 závisí na průřezu tyče a při kruhovém průřezu je rovna $10 \times d_0$. U krátkých tyčí je rovna $5 \times d_0$ (d_0 je původní průměr zkušební tyče). K tomu, abychom mohli změřit prodloužení tyče, se před zkouškou vyznačí rysky ve vzdálenosti 10 mm od sebe. Zkouškou tahem se zjišťuje pevnost v tahu, poměrné prodloužení, tažnost a nakonec zúžení (kontrakce) testovaného materiálu. [2,4,9]

V praxi se však používá smluvní jmenovité napětí R , protože se změna průřezu tyče zanedbává. Zatížení se počítá s počátečním průřezem zkušební tyče S_0 . [8]

Výpočet pevnosti v tahu:

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \left[\frac{N}{mm^2} = MPa \right] \quad (1)$$

F_{max} – síla při přetržení

S_0 – původní průřez zkušební tyče

Výpočet pevnosti v kluzu:

$$R_e = \frac{F_k}{S_0} \left[\frac{N}{mm^2} = MPa \right] \quad (2)$$

F_k – síla na mezi kluzu

S_0 – původní průřez zkušební tyče

Výpočet poměrného prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \left[\frac{mm}{mm} = 1 \right] \quad (3)$$

Výpočet tažnosti:

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 [\%] \quad (4)$$

Výpočet zúžení (kontrakce):

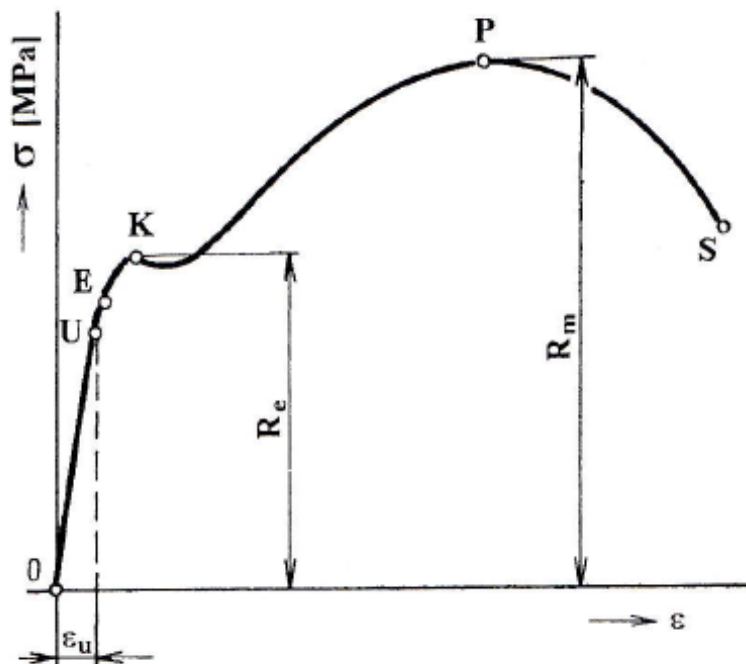
$$A = \frac{\Delta S}{S_0} \times 100 = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100 [\%] \quad (5)$$

L_0 – původní délka zkušební tyče

L_u – délka zkušební tyče po prodloužení

S_0 – původní průřez zkušební tyče

S_u – průřez zkušební tyče po prodloužení



Obr. 1: Pracovní diagram oceli [14]

- Mez úměrnosti **U** – do této meze platí Hookův zákon (napětí je přímo úměrné deformaci)
- Mez pružnosti **E** – smluvní hodnota napětí, na které dochází k trvalé deformaci
- Mez kluzu **K** - napětí, při kterém se zkušební tyč začne výrazně prodlužovat, aniž by dále stoupala zatěžující síla
- Mez pevnosti **P** – největší napětí, které snesl zkušební vzorek
- Bod **S** – bod, při které dojde k přetržení testovaného vzorku

Zkouška tlakem:

Testovaný vzorek se zatěžuje rostoucí silou do okamžiku, kdy dojde k jeho prasknutí (křehké materiály) nebo stlačení na určitou hodnotu (houževnaté materiály). Tento typ zkoušky se používá pro zjišťování pevnosti v tlaku R_{mt} převážně pro křehké materiály (např. šedé litiny, ložiskové kovy, keramika a různé stavební hmoty). Tato zkouška se pro oceli skoro vůbec neprovádí, protože jejich hodnoty meze pevnosti tahu a tlaku jsou velmi podobné, ve většině případech dokonce stejné. U této zkoušky mají zkušební tělesa tvar válečku o průměru 10 až 30 mm. U méně přesnějších zkoušek je výška válečku rovna průměru, naopak u přesnějších zkoušek je výška rovna (2,5 až 3) x d. Pro testování stavebních hmot se používají zkušební vzorky ve tvaru krychle. [2,7,9]

Výpočet pevnosti v tlaku:

$$R_{mt} = \frac{F_{max}}{S_0} \left[\frac{N}{mm^2} = MPa \right] \quad (6)$$

F_{max} – síla při přetržení

S_0 – původní průřez zkušební tyče

Výpočet poměrného zkrácení:

$$A_t = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 = \frac{h_0 - h_u}{h_0} \times 100 [\%] \quad (7)$$

h_0 – původní výška zkušební tělesa

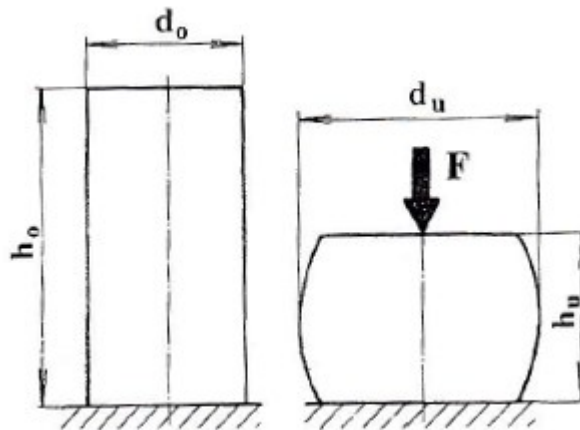
h_u – výška zkušební tělesa po zatížení

Výpočet poměrného příčného rozšíření:

$$Z_t = \frac{\Delta S}{S_0} \times 100 = \frac{S_u - S_0}{S_0} \times 100 [\%] \quad (8)$$

S_0 – původní průřez zkušební tělesa

S_u – průřez zkušební tělesa po prodloužení



Obr. 2: Zkouška tlakem [14]

d_0, h_0 – hodnoty zkušební vzorku před zahájením zkoušky

d_u, h_u – hodnoty zkušební vzorku po zatížení

Zkouška ohybem:

Používá se převážně pro křehké materiály (například pro šedé litiny). Houževnaté materiály se při této zkoušce neporuší. Testovaný vzorek je zkušební tyč kruhového průřezu, která je uložena na dvou podporách (vzdálenost mezi nimi je $20 \times d$) a zatížena silou uprostřed. [8]

Výpočet pevnosti v ohybu:

$$R_{mo} = \frac{M_{o_{max}}}{W_o} \left[\frac{N * mm}{mm^3} = MPa \right] \quad (9)$$

$M_{o_{max}}$ – maximální ohybový moment

W_o – modul průřezu v ohybu

Výpočet maximálního ohybového momentu:

$$M_{o_{max}} = \frac{F \times e}{4} [N * mm]$$

F – síla působící na zkušební těleso

e – vzdálenost mezi podpěrami

Výpočet modulu průřezu v ohybu:

- Pro kruhové průřezy:

$$W_o = \frac{\pi \times d^3}{32} [mm^3] \quad (11)$$

d – průměr zkušební tělesa

- Pro obdélníkové průřezy:

$$W_o = \frac{b \times h^2}{6} [mm^3] \quad (12)$$

b – šířka zkušební tělesa

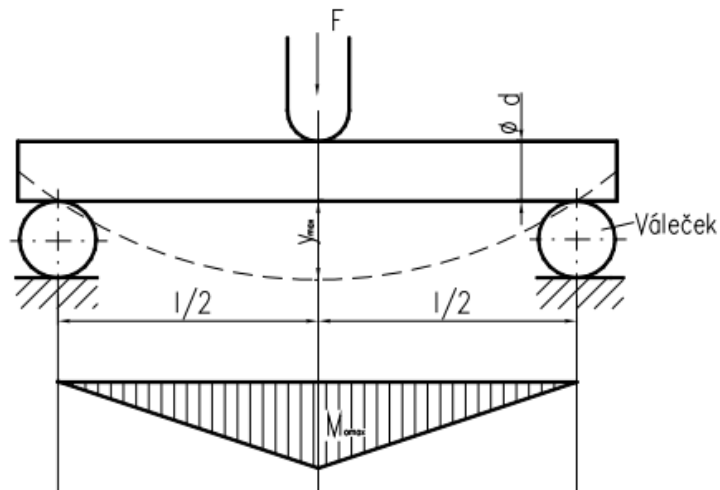
h – výška zkušební tělesa

Výpočet poměrného průhybu:

$$\varphi = \frac{y}{L} \times 100 [\%] \quad (13)$$

y – posunutí středové osy zkušební tělesa

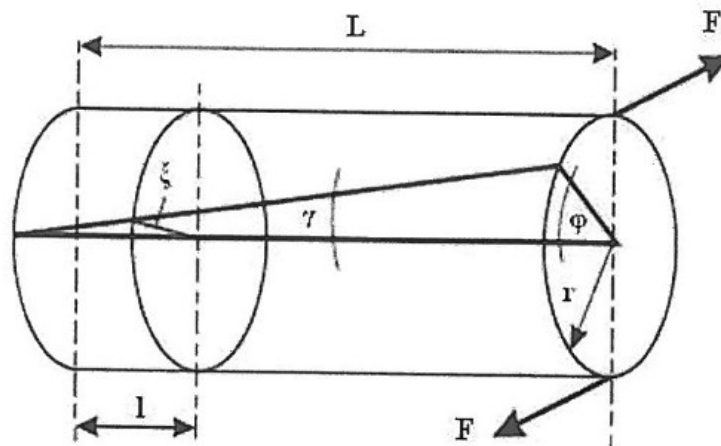
L – délka zkušební tělesa



Obr. 3: Zkouška ohybem [28]

Zkouška krutem:

Točivý moment působí na jeden nebo oba konce vzorku. Účelem torzní zkoušky je zjistit mez kluzu ve smyku, únavovou životnost v krutu, mez pevnosti ve smyku a modul přetržení ve smyku. Tyto hodnoty jsou podobné jako hodnoty naměřené tahovou zkouškou a jsou důležité pro návrh konstrukčních součástí. [7,8]



Obr. 4: Zkouška krutem [29]

Výpočet pevnosti v krutu:

$$R_{mk} = \frac{M_k}{W_k} \left[\frac{N * mm}{mm^3} = MPa \right] \quad (14)$$

M_k – kroutící moment

W_k – modul průřezu v krutu

Výpočet maximálního kroutícího momentu:

$$Mk_{max} = F \times d \ [N * mm] \quad (15)$$

F - zatěžující síla

d – průměr zkušební tělesa

Výpočet modulu průřezu v krutu pro kruhové průřezy:

$$W_k = \frac{\pi \times d^3}{16} \ [mm^3] \quad (16)$$

d – průměr zkušební tělesa

Výpočet poměrného zkroucení:

$$\vartheta = \frac{\varphi}{L_0} \left[\frac{rad}{mm} \right] \quad (17)$$

φ – úhel natočení

L_0 – původní délka zkušební tyče

Zkouška stříhem:

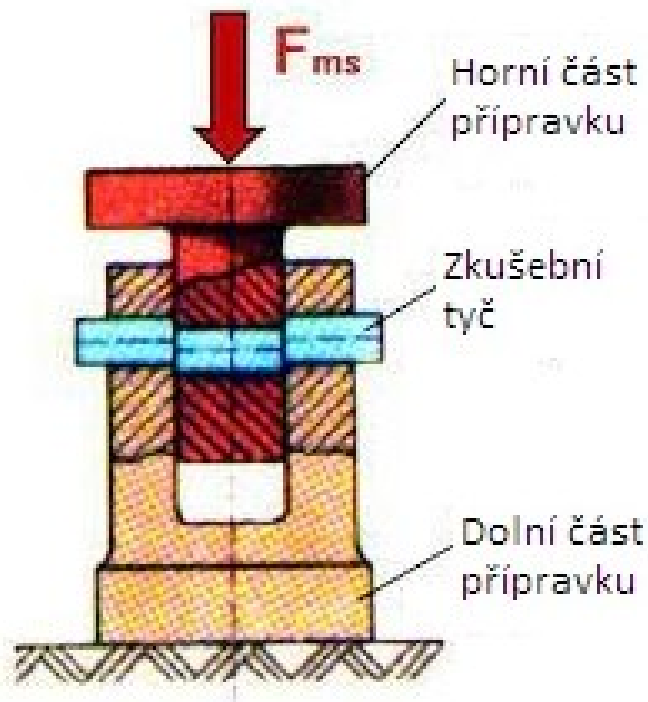
Zkoušky stříhem se používají ke stanovení smykové deformace a smykového napětí. Tato zkouška se většinou provádí na speciálních přípravcích. U tvárných materiálů se nepoužívá, protože platí, že pevnost ve stříhu R_{ms} je rovna (0,8 až 1) x R_m (mezi pevnosti v tahu). Proto se zkoušky stříhem (zkoušky smykem) dělají u materiálů, jako jsou dřeva, slídy, lepenky. [7,9]

Výpočet pevnosti ve stříhu (smyku):

$$R_{ms} = \frac{F}{2 \times S} \left[\frac{N}{mm^2} = MPa \right] \quad (18)$$

F – zatěžující síla

S – průřez zkušebního tělesa



Obr. 5: Schéma stroje pro zkoušku stříhem [7]

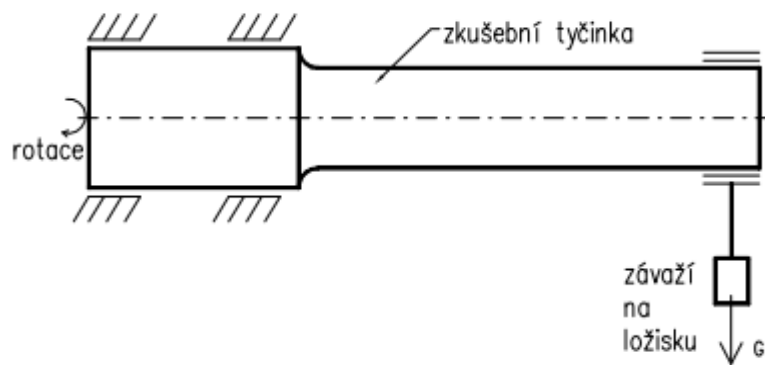
1.1.2 Dynamické zkoušky

Přestože síly nedosahují mezi statické pevnosti materiálu, tak velmi často dochází při dynamickém namáhání k porušení materiálu. Proto je úkolem těchto zkoušek zjistit, jak se různé materiály chovají při působení dynamického namáhání. [9]

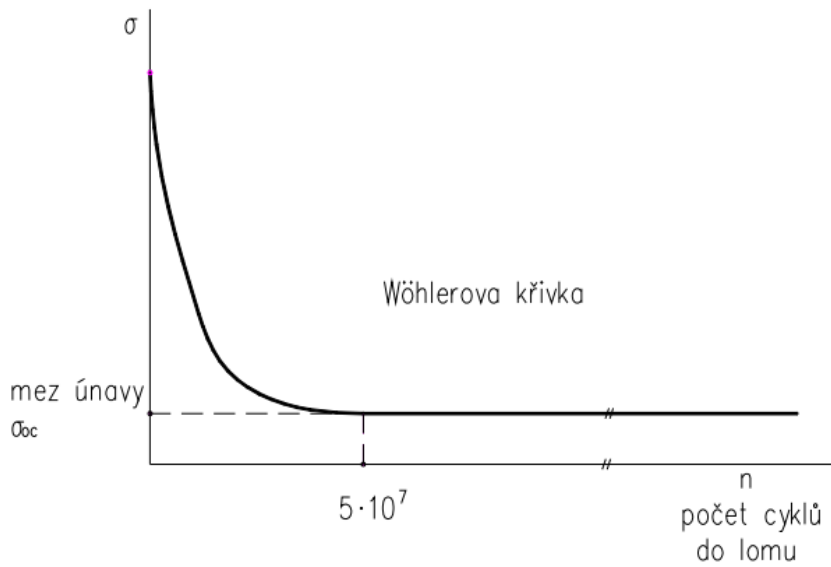
1.1.3 Únavové zkoušky

Únavové zkoušky, častěji nazývané jako cyklické, slouží k určení hranice počtu cyklů, kdy dochází k porušení zkušební vzorku. Toto poškození je označováno jako únavový lom.

Tomuto jevu nepředchází žádná plastická deformace a součást najednou křehce praskne. K mikro trhlinám dochází v místech největší koncentrace napětí (např. v místech vrubu). Vruby vznikají při jakékoli změně průřezu a při změně materiálových vlastností (zápichy, otvory, závity, velké drsnosti povrchu, svary a materiálové vady). Cyklické zkoušky se provádějí na zkušebních vzorcích (tyč hladká nebo s vrubem) na zařízeních umožňujících opakované zatížení (např. ohyb během rotace, nebo na pulsátorech). Naměřené údaje se zaznamenávají do grafu, který se nazývá **Wöhlerova křivka**. Wöhlerova křivka znázorňuje závislost mezi počtem zatěžovacích cyklů, které zkušební vzorek vydržel před objevením lomu, a mezi únavy zkušebního materiálu. [5,7,8]



Obr. 6: Zkušební vzorek [10]

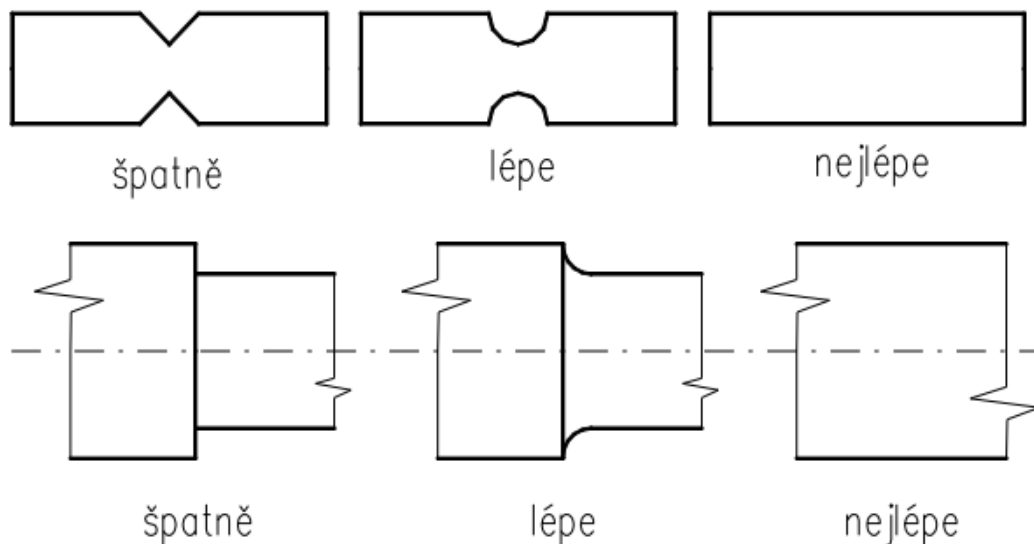


Obr. 7: Wöhlerova křivka [10]

Mez únavy (σ_{oc}) – je napětí, které vzorek vydrží při nekonečném počtu cyklů.

Smluvní mez únavy – je napětí, které vzorek vydrží při smluveném počtu cyklů.

Na tuto mez únavy má vysoký vliv drsnost povrchu, ale především velká koncentrace napětí (vruby). Proto se snažíme u součástí cyklicky namáhaných vyhýbat vrubům. [8]



Obr. 8: Příklady vrubů [10]

Mez únavy snižuje:

- konstrukční vruby,
- povrchové vady a trhliny,
- drsnost povrchu,
- koroze,
- svary. [6]

Mez únavy zvyšuje:

- zušlechtnění materiálu,
- vyleštění povrchu,
- odstranění vrubu,
- zpevnění povrchu (válečkování). [6]

1.2 Dynamické zkoušky polymerních materiálů

Existuje pět hlavních tříd experimentů pro měření viskoelastického chování:

- Přechodná měření: creep a relaxace napětí.
- Nízkofrekvenční vibrace: metody volných kmitů.
- Vysokofrekvenční vibrace: rezonanční metody.
- Nenucené vibrace nerezonanční metody.
- Metody šíření vln. [11,12]

Dynamická charakterizace elastomerních materiálů a polymerů vyžaduje použití sofistikovaných přístrojů s vysoce přesnými snímači zatížení, snímači posunutí a deformačními snímači. Pro zkoušky polymerů se používá servohydraulický stroj a dynamický mechanický analyzátor. V této oblasti se používají tenzometrické a piezoelektrické snímače zatížení na bázi křemene ke zkoumání zatížení, napětí, deformace

a k záznamu zkušebních dat. Vedle kvalitního hardwaru je potřeba i velmi pokročilý software, který provádí všechny výpočty. [11,12]

Zkoušky při vysokých teplotách (např. tahové, tlakové, ohybové a únavové zkoušky) se používají ke stanovení tepelně pružného chování, tepelné odolnosti, výdrže a trvanlivosti polymerních materiálů. Zkoušky za zvýšených teplot se kombinují s mechanickými zkouškami, stárnutím vlivem prostředí a analytickými metodami řešení, aby se vyvinul a byl k dispozici rozsáhlý zkušební protokol pro hodnocení materiálů a součástí. [12]

Ke studiu dynamických vlastností vytvrzených a nevytvrzených pryžových směsí se používá speciální reometrický přístroj. Tento přístroj se skládá z generátoru kroutícího momentu, oscilátoru a zařízení pro měření zatížení. Úhlové torzní deformace vzorku a zatížení generované v měniči se vyhodnocují pomocí snímačů zatížení, snímačů posunutí a rotačních snímačů. [13]

1.3 Zkoušky rázové

Nejnámější a nepoužívanější rázovou zkouškou je zkouška vrubové houževnatosti, která se provádí hlavně u ocelí. Zkušební vzorky se v některých případech opatřují vrubem (ocelové i plastové), protože by jinak nemuselo dojít k porušení materiálu. Nejčastěji používaným zařízením je Charpyho kladivo. Mezi další rázové zkoušky patří zkoušky pádem (padostroj) a tvrdosti (kladívko Poldi). [7]

1.3.1 Zkouška vrubové houževnatosti

Jde o zkoušku, kdy otočné rameno se závažím dopadá na normalizovaný zkušební vzorek. Rázová zkouška měří množství energie absorbované vzorkem. [4]

Standardní vzorek s vrubem Charpy-V je 55 mm dlouhý, 10 mm čtvercový a na jedné straně má 2 mm hluboký vrub s poloměrem hrotu 0,25 mm. Za určitých okolností lze zkoušet Charpyho vzorky menších rozměrů s tloušťkou menší než 10 mm. Obvykle se při jedné teplotě zkoušejí tři vzorky a výsledky se zprůměrují. Alternativně se zkoušky provádějí při různých teplotách, aby se vytvořila křivka přechodu od tvárnosti ke křehkosti. [4,8,9]

Je třeba zdůraznit, že Charpyho zkoušky jsou kvalitativní, výsledky lze porovnávat pouze mezi sebou nebo s požadavkem ve specifikaci. To znamená, že je nelze použít ke

komplexním důležitým a přesným výpočtům, ale spíše se používají k hrubému odhadu vhodného materiálu pro danou úlohu. [4,8]

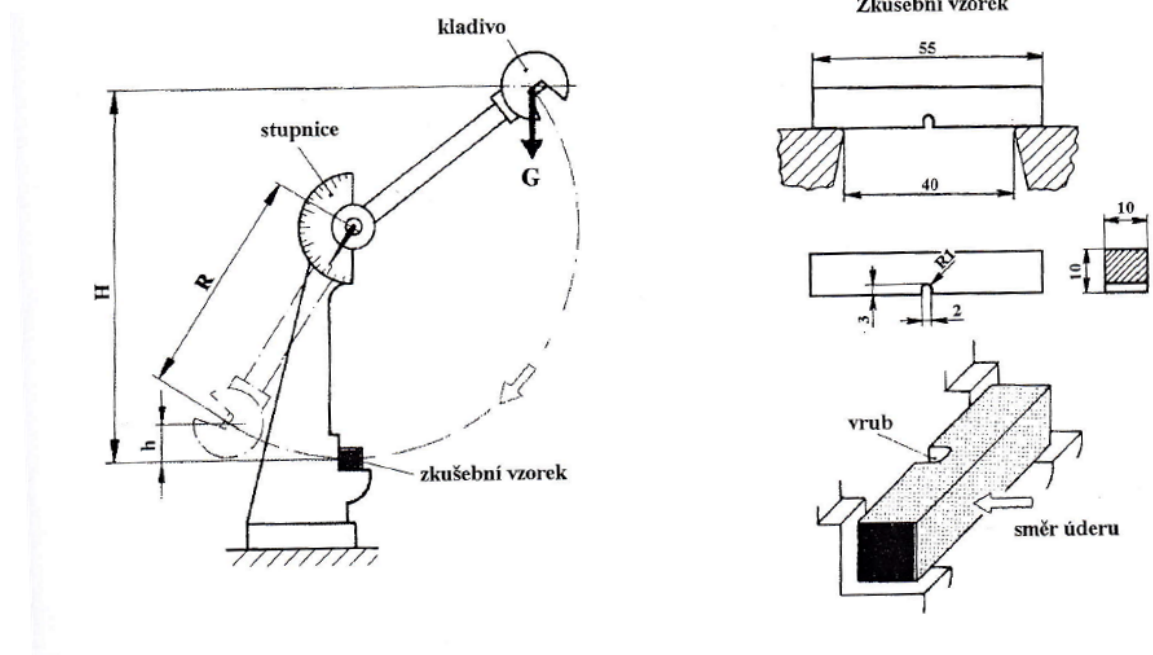
Výpočty:

- **Nárazová práce:**

$$KU = G \times (H - h) [J] \quad (19)$$

- **Vrubová houževnatost:**

$$KCU = \frac{KU}{S_0} \left[\frac{J}{cm^2} \right] \quad (20)$$



Obr. 9: Charpyho rázová zkouška [14]

Popis Charpyho kladiva [14]:

- G – hmotnost kladiva,
- H - počáteční poloha kladiva,
- h - konečná poloha kladiva,
- S_0 - průřez zkušební vzorku

1.3.2 Rázová zkouška pádem

Používá se pro měření rázové houževnatosti polymerů a provádí se na speciálních zařízeních (padostroje). Padostroje umožňují zvolit libovolnou energii a rychlost padajícího tělesa (ocelová kulička nebo čidlo) na zkušební vzorek. Hmotnost padajícího tělesa lze zvyšovat přidáváním dodatečných závaží. K provedení zkoušky se použije série deseti zkušebních vzorků. Cílem je zjistit zátěž, při které dojde k lomu minimálně poloviny vzorků. [5,8]

- **Energie:**

$$W = G \times h \quad (21)$$

G – tíha závaží [g]

h – výška pádu [mm]



Obr. 10: Padostroj [15]

2 METODY 3D TISKU

Přímá výroba součástí (Rapid Prototyping)

Pojmem Rapid Prototyping označujeme všechny činnosti, které vedou od formulace požadavků výrobku až k jeho finální výrobě. Důvody použití systému Rapid Prototyping jsou rychlé zavádění nových výrobků na trh, ověření reakce zákazníků na nový výrobek, ověření různých verzí výrobku, podrobné a rychlé simulace funkcí výrobku, ověření snadnosti a postupu montáže. Charakteristickými vlastnostmi Rapid Prototypingu jsou rychlá výroba modelu, funkčního vzorku i prototypu přímo na základu souboru dat vytvořených při modelování výrobku na počítači, bez užití forem, zápustek, lisovacích a řezných nástrojů. U těchto technologií se výroba součástek provádí postupným přidáváním materiálu vrstvu po vrstvě, na rozdíl od obrábění, kde se výroba součástí uskutečňuje postupným odebráním materiálu ve formě třísek. [16,17]

Postup přímé výroby součástí (Rapid Prototypingu) je většinou následující:

- Vytvoření prostorového modelu výrobku na počítači. [16]
- Pomocí speciálního softwaru se vytvoří příčné řezy výrobku v rovinách vzdálených mezi sebou 0,05 až 0,2 mm (záleží na požadovaném tvaru a přesnosti rozměrů součástí). [17]
- Výsledná data nám pak řídí vlastní výrobní proces (doteď šlo jen o počítačové zpracování). [16]
- Zhotovení výsledného výrobku. [16]

2.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

Tato technologie umožňuje vytvářet prototypy ve velmi krátkém čase. Technologii FDM si nechala patentovat firma Stratasys. Tato metoda tisku je také známá jako Fused Filament Fabrication (FFF). Termoplastický materiál dosahuje bodu tání ve vytlačovací trysce, která se pohybuje nad vyhřívanou tiskovou podložkou a vytváří finální produkt vrstvu po vrstvě. Podle složitosti tištěného výrobku se při tvorbě programu vytváří podpěry. Ty jsou tištěny ze stejného nebo jiných materiálů, záleží na typu tiskárny. Po dokončení tisku se podpurný materiál mechanicky odstraní nebo rozpustí ve vodě. Jedná se o technologii, která umožňuje

tvorbu dílů a prototypů, jejichž výroba je tradičními metodami časově i ekonomicky náročná. [17,19]

Jako základní materiál se používá např. ABS, PETG, PEI a PEEK ve formě tiskových strun (filamentů). Doba tisku je závislá především na velikosti a požadované kvalitě hotového výrobku. Tisk FDM (FFF) implementuje stále více průmyslových odvětví. [19]

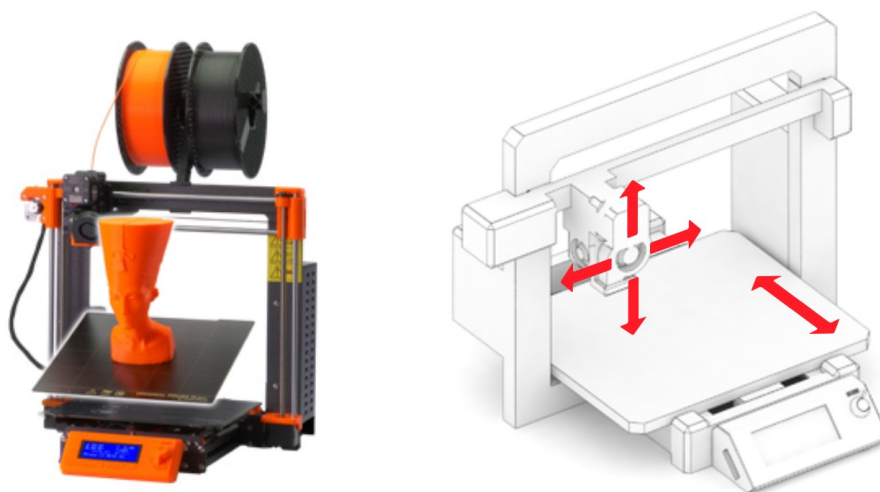
Volba FDM 3D tiskárny:

- Objem sestavy.
- Materiály (vlákna) dostupné pro tisk.
- Technické specifikace (extruder, rozlišení, rychlosti, automatická kalibrace stavební desky, detekci mimo filament a uzavřená komora).
- Servisová služba. [19]

Typy tiskáren:

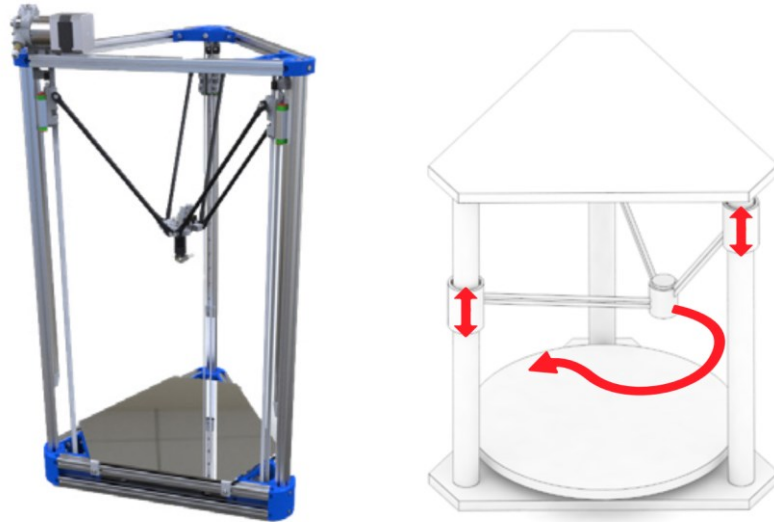
Podle způsobu pohybu tiskové hlavy (extruderu) v 3D prostoru dělíme FDM tiskárny na:

- **Kartézské** – tiskárna je založena na pohybu po 3 lineárních osách [17]



Obr. 11: Kartézská tiskárna [17]

- **Delta** – tisková hlava je zavěšena v místě styku tří ramen, rychlý tisk a velký prostor v ose Z, náročná konstrukce a kalibrace tiskárny [17]

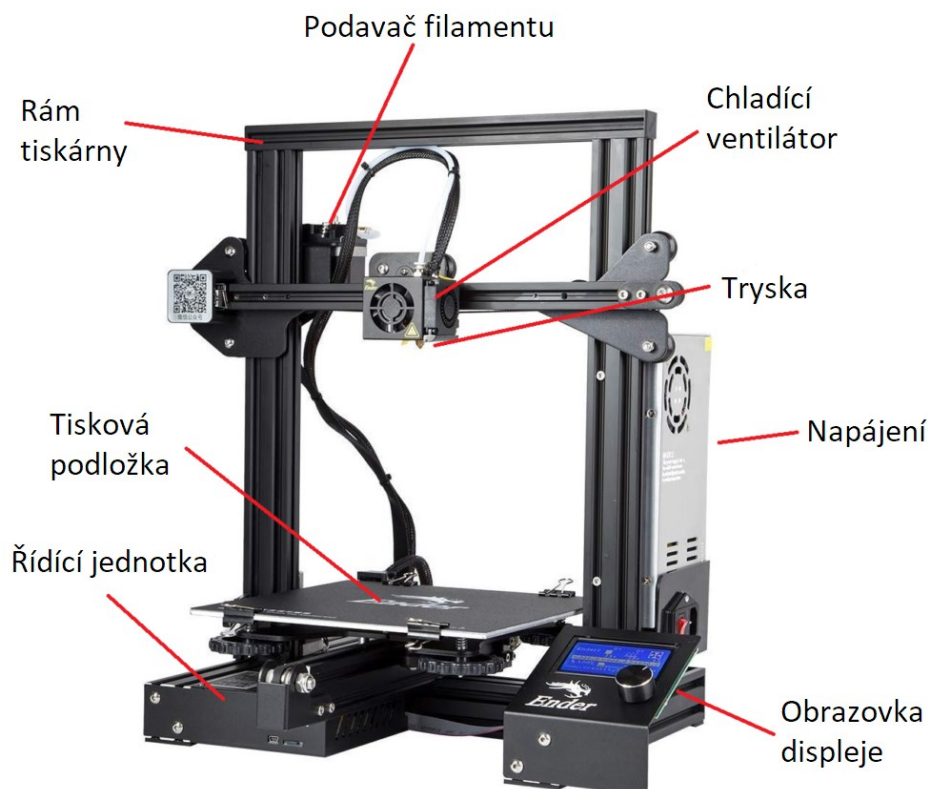


Obr. 12: Delta tiskárna [17]

- **Polar** – méně používané, velmi jednoduchá konstrukce, příprava digitálního modelu pro tisk komplikovaná [17]



Obr. 13: Polar tiskárna [17]

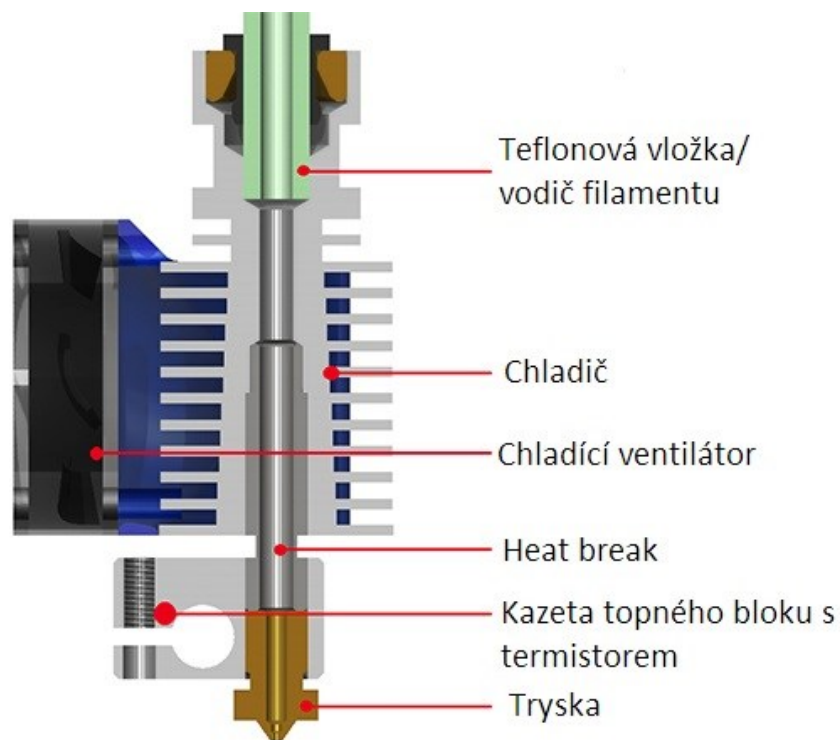
Komponenty FDM (FFF) tiskárny:

Obr. 14: Popis FDM kartézské 3D tiskárny [18]

Tisková hlava (extruder)

Skládá se z trysky, která je připevněna na elektricky vytápěnou komoru. Nanáší postupně jednotlivé vrstvy tiskového materiálu. Do tiskové hlavy je dodáván filament teflonovou trubičkou, který se elektrickým topným tělesem roztaví. Roztavená tisková struna je skrz trysku vytlačována ven na tiskovou podložku. [17]

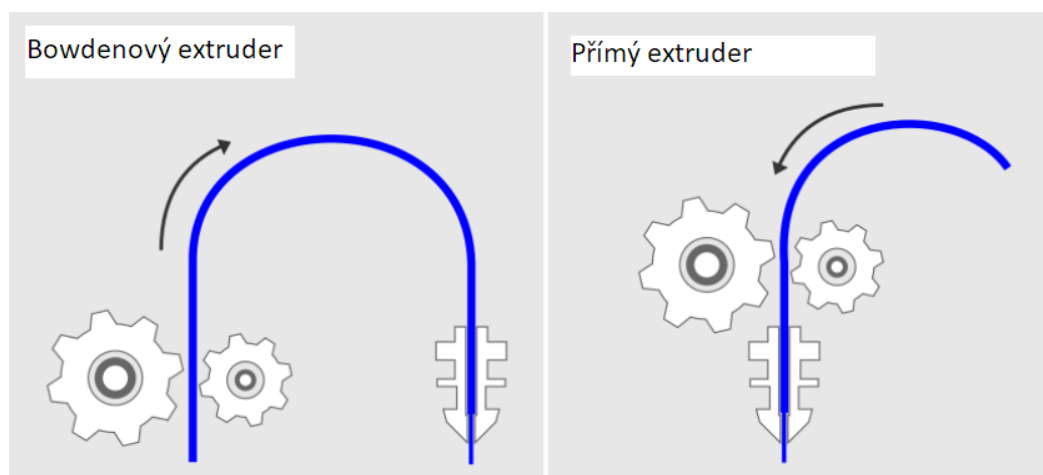
Heat break je izolační vložka, která je určena k omezení přenosu tepla z topné části do chladiče, aby nedošlo k předčasnému natavení filamentu. Vyrábí se například z mědi, keramiky, titanu a nerezových materiálů.



Obr. 15: Tisková hlava E3D V6 [27]

Přímé extrudery jsou umístěny nad pohyblivými částmi 3D tiskárny. Hmotnost krokového motoru zpomaluje pojezd a rychlost tisku, proto při tisku vysokou rychlostí může nastat snížení kvality tisku. [27]

Bowdenové tiskárny mohou oproti tomu dosáhnout mnohem lepší kvality tisku i při vyšší rychlosti. [27]



Obr. 16: Bowdenový extruder (vlevo), přímý extruder (vpravo) [27]

Tisková podložka

Určuje velikost pracovní plochy. Tiskové podložky mohou být vyhřívané i nevyhřívané. Důležitá je správná poloha podložky vůči tiskové hlavě, optimální teplota a přilnavost, která brání deformaci výrobku při tisku. Ke zlepšení přilnavosti se na podložku nanáší do prostoru tisku nejčastěji lepidlo, které se pak nejlépe očistí isopropylalkoholem. Tiskové podložky se vyrábí například magnetické, ocelové s oboustranným polyetherimidovým povrchem nebo na bázi PLA. [17,27]

Rám tiskárny

Rám je tvořen z nosníků, které tvoří tuhou konstrukci 3D tiskárny, aby nedocházelo k vibracím vznikajících při tisku. Rámy jsou nejčastěji vyrobeny z hliníkových profilů. [17]

Tryska

Privádí roztavený filament na tiskovou podložku. Mohou být ocelové kalené, mosazné i rubínové. Volba materiálu a průměru trysky záleží na použitém filamentu a požadavcích uživatele.

Chladicí ventilátor

Ochlazuje filament nad elektrickým topným tělesem v extruderu, aby nedocházelo k jeho předčasnému natavení.

Napájení

Dodává 3D tiskárně elektřinu.

Krokové motory

Zajišťují veškeré mechanické pohyby 3D tiskárny.

Řídící jednotka

Slouží k ovládání 3D tiskárny.

Obrazovka displeje

Slouží k ovládání řídicí jednotky tiskárny.

Výhody technologie FDM:

- **Snadná manipulace:** Zjednodušuje výrobní proces a umožňuje výrobcům testovat, měnit a nakonec vyrobit finální produkt v čase, který je rychlejší než u tradičních metod. [19]
- **Nákladově efektivní:** Ve srovnání s jinými typy 3D tisku je FDM levnější. Použité materiály jsou také levnější než materiály používané při SLS nebo SLA. [19]
- **Flexibilita při výběru materiálu:** FDM má k dispozici velké množství materiálů a všechny jsou cenově dostupné i výhodné. Je také možné použít výběr materiálů současně, což pomáhá vytvářet složité objekty, a zároveň je možné tisknout pomocí široké škály barev, které nabízejí všestrannost a flexibilitu. [19]
- **Méně následného zpracování** [19]

2.1.1 Tiskové materiály:

Plasty

Nejčastěji používané ve formě tiskových strun (filamentů) různých barev. Nejběžnějšími filamenty jsou PLA, PETG, ASA, ABS. [17]

PLA

Je polymer na bázi kukuřičného škrobu, díky tomu je za určitých podmínek rozložitelný biologicky. Není zdraví škodlivý a proto má využití např. ve školách. Používá se pro tisk prototypových modelů s jednoduchou geometrií. Přestože je považován za nejvíce základní

materiál, má v porovnání s ostatními běžnými polymery vysokou pevnost v tahu. Jeho nevýhodou je křehkost, při pádu nebo nárazu se snadno zlomí. [31]

PETG

Polyetylén - tereftalát s modifikovaným glykolem je nejčastěji používaný polymer ve světě. Využívá se pro výrobu převážně nádob a potravinových obalů. Díky přidávané modifikaci glykolu má jasnější barvu než běžný PET, lépe se tiskne a lze recyklovat. Je výrazný svým lesklým a hladkým povrchem. Má ideální vlastnosti pro výrobu funkčních prototypů i konečných výrobků. Jeho chemická odolnost nachází uplatnění v laboratořích i strojírenství. [31]

ABS

Akrylonitril-butadien-styren je jedním z nejvíce používaných polymerních materiálů. Je pevný, houževnatý, teplotně odolný a u výrobků vytváří kvalitní povrch. ABS prototypy se nejvíce podobají verzi finálního produktu včetně funkce. Podle teplotní odolnosti lze určit, které modely budou mít laboratorní, a které naopak výrobní využití. [31]

PMMA

Polymethylmetakrylát je syntetický polymer častěji označovaný jako plexisklo (akrylátové sklo). Tento materiál je čirý, vhodný pro venkovní použití. Nepodléhá korozi, je odolný vůči ultrafialovému záření, povětrnostním vlivům a většině dalších faktorů prostředí. PMMA patří mezi bezpečnější plasty, je recyklovatelný a neobsahuje Bisfenol A. Díky tomu je PMMA značně udržitelný. PMMA dokáže omezit přenos zvukových vln, proto je vhodným izolantem při stavbě prostor, jako jsou zvuková studia, knihovny, tiché místnosti a dokonce i automobily. Díky své odolnosti je skvělou náhradou skla při stavbě oken, nápisů a displejů. Jeho nevýhodou je menší odolnost vůči dražšímu a silnějšímu polykarbonátu. [23,24]

2.1.2 FLEX

Tyto filamenty jsou velmi ohebné a mají podobnou charakteristiku jako guma. Vyrábí se v několika stupních tvrdosti. Měkčí FLEX filamenty komplikují tisk. Hlavními FLEX filamenty jsou termoplastický polyuretan (TPU) a termoplastický elastomer (TPE). [17]

TPE

Termoplastické elastomery, které jsou často nazývané jako termoplastické kaučuky, se vyznačují svou vysokou pružností. Po vnější deformaci se vrací do svého původního tvaru. Jsou to směsi vyrobené z termoplastických polymerů zkombinované s gumovým materiálem obsahujícím přísady. [31]

TPU

Termoplastický polyuretan je jemný, silný a elastický materiál. Není toxický, má vysokou odolnost vůči olejům i tukům (záleží na příměsi) a je degradabilní. Používá se např. v automobilovém průmyslu, zdravotnictví a pro výrobu ochranných pouzder mobilních telefonů. [31]

2.1.3 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou filamenty s hlavní polymerní složkou a vedlejším plnivem. Takto plněné materiály se značí příponou fill. Plniva mohou být např. dřevo, měď, bronz, karbon a slouží k zlepšení mechanických vlastností finálního výrobku. Parametry tisku se volí podle plastového základu. [17]

2.1.4 Fotopolymery (Pryskyřice)

Využívají se pro technologii SLA. Pryskyřice jsou cenově nákladnější než filamenty. Výrobky metodou SLA nepraskají po vrstvách, ale lámou se jako sklo. Skládají se ze tří hlavních složek: jádro pryskyřice (monomery), fotoiniciátory (molekuly, které při působení UV světla iniciují vytvrzování) a přísady (např. barviva). [17]

2.1.5 Podpůrné materiály:

Podpěry se ve většině případech vyrábí ze stejného materiálu jako tištěný výrobek a po dokončení tisku se odlomí. Pokud tiskárna umožňuje použití více tiskových hlav současně, můžeme na podpěry použít rozpustný materiál, kterým je například Polyvinylalkohol (PVA) nebo Butenediol Vinyl Alcohol Copolymer (BVOH). Rozpustné podpůrné materiály jsou cenově dražší než tiskové materiály. [17]

PVA

Polyvinylalkohol je vodou rozpustný materiál nejčastěji využívaný s materiály PLA a PETG. Je vhodný pro použití v kancelářském prostředí. Díky rozpustnosti ve vodě, lze podpůrný materiál PVA odstranit z libovolného tvaru bez problému. Proto se používá k tisku komplexních dílů a výrobků. [31]



Obr. 17: Porovnání dílu FDM (vlevo) s dílem SLA (vpravo) [20]

2.2 Selective Laser Sintering (SLS)

3D tiskárny pro selektivní laserové slinování (SLS) využívají k výrobě dílů laser a termoplastický polymerní prášek. Kvůli vysokému výkonu laseru je považována za složitější než FDM i SLA. Tiskárny se skládají ze zásobníku prášku, tiskové podložky, zařízení pro opětovné nanášení prášku, laseru (CO₂, diodového nebo vláknového), sady galvanometrů,

sady ohříváčů a podavače prášku. Proces tisku začíná naplněním zásobníku na prášek určitým množstvím polymerního prášku. Poté se zásobník vloží do stroje, kde začne fáze zahřívání. Před tiskem se používají ohříváče, aby se prášek ohřál na teplotu těsně pod bodem tání. Tisk začíná nanesením jedné vrstvy prášku na tiskovou podložku. Laser vytvrdí požadované body v dané vrstvě, re-coater nanese novou vrstvu prášku a proces se opakuje, dokud není díl kompletní. [21]

Výhody:

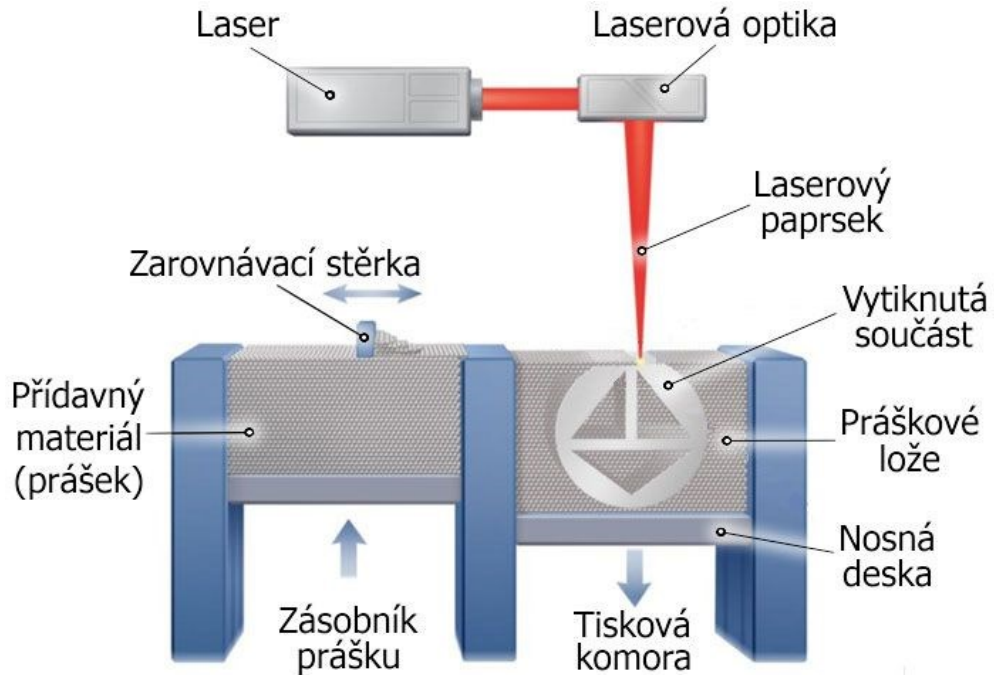
- Při výrobě dílů v zásobníku prášku působí nespečený prášek jako podpůrný materiál pro tištěný díl. Po vytištění dílu nezůstávají na jeho povrchu žádné stopy po podpůrném materiálu. Nespečený prášek stačí očistit kartáčem nebo vyfoukat vzduchem. [21]
- Zhruba 50% nespečeného prášku lze recyklovat. [21]

Nevýhody:

- Na rozdíl od FDM nelze díly vytištěné tiskárnou SLS použít hned po dokončení tisku. Díly musí vychladnout. [21]
- SLS vyžaduje velký výkon. [21]
- Vysoká cena. [21]

Seznam běžných SLS materiálů:

- Polyamid 12 (PA 12).
- Polyamid 11 (PA 11).
- Nylon plněný hliníkem.
- Nylon plněný sklem.
- Nylon plněný uhlíkovými vlákny. [21]



Obr. 18: Metoda SLS [30]

2.3 Stereolithography (SLA)

SLA je jednou ze tří základních technologií používaných při 3D tisku, spolu s technologií fused deposition modeling (FDM) a selektivním laserovým spékáním (SLS). Patří do kategorie pryskyřicového 3D tisku. Vysoce výkonný laser vytvrzuje tekutou pryskyřici v zásobníku a vytváří požadovaný 3D tvar. Tento proces převádí fotosensitivní kapalinu na 3D pevné plasty po vrstvách pomocí fotopolymerizace. [22]

Laser je nasměrován na příslušné souřadnice pomocí zrcadla řízeného počítačem. Laser je namířen nahoru na konstrukční podložku, která se postupně zvedá. Po nanesení první vrstvy se podložka zvedne podle tloušťky vrstvy (obvykle asi 0,1 mm) a laser vytvrdí další průřez. Proces se opakuje, dokud není celý díl kompletní. Pryskyřice, které se laser nedotkl, zůstává v nádobě a lze ji znovu použít. [22]

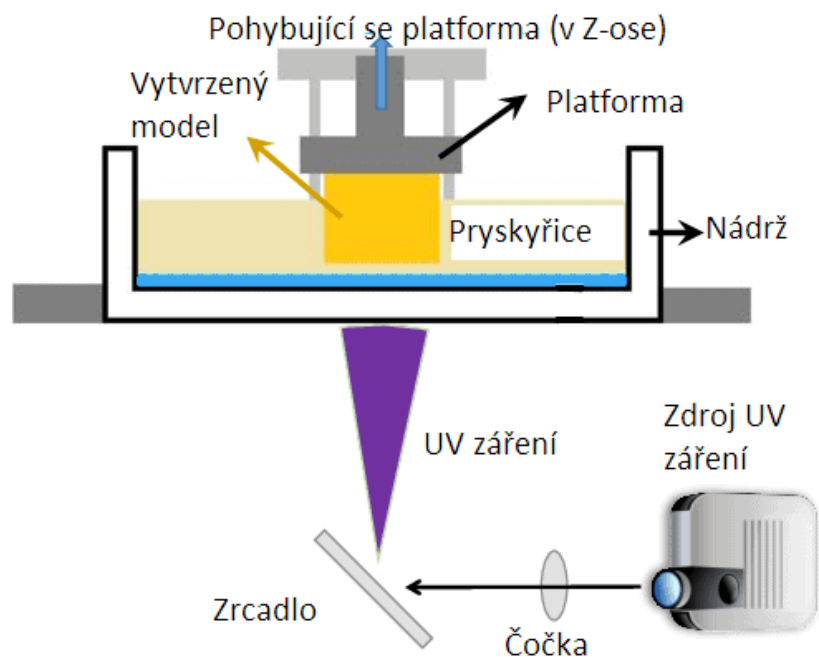
Na konci procesu je model vyjmut z tiskové podložky, omyt od přebytečné pryskyřice a umístěn do UV pece k finálnímu vytvrzení. Vytvrzování po tisku umožňuje objektům dosáhnout nejvyšší možné pevnosti a větší stability. [22]

Výhody:

- SLA je jednou z nejpřesnějších technik 3D tisku na trhu. [22]
- Prototypy lze vytvářet v mimořádně vysoké kvalitě, s jemnými detaily a složitými geometrickými tvary. Tloušťky vrstev lze vytvářet od 25 μm do 100 μm . [22]
- SLA má nejlepší rozměrové tolerance ze všech technologií rapid prototyping. [22]
- Tiskové plochy jsou hladké. [22]
- Pracovní prostor může být až 50x50x60 cm bez ztráty přesnosti. [22]

Nevýhody:

- Delší doba tisku. [22]
- Strmé úkosey a převisy vyžadují během stavby podpůrné konstrukce (podpěry). [22]
- Pryskyřice jsou poměrně křehké, a proto nejsou mechanické zkoušky vhodné pro funkční prototypy. [22]
- SLA nabízí omezený výběr materiálů a barev. Pryskyřice jsou často patentované a nelze je snadno zaměnit mezi tiskárnami různých značek. [22]



Obr. 19: Metoda SLA [32]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

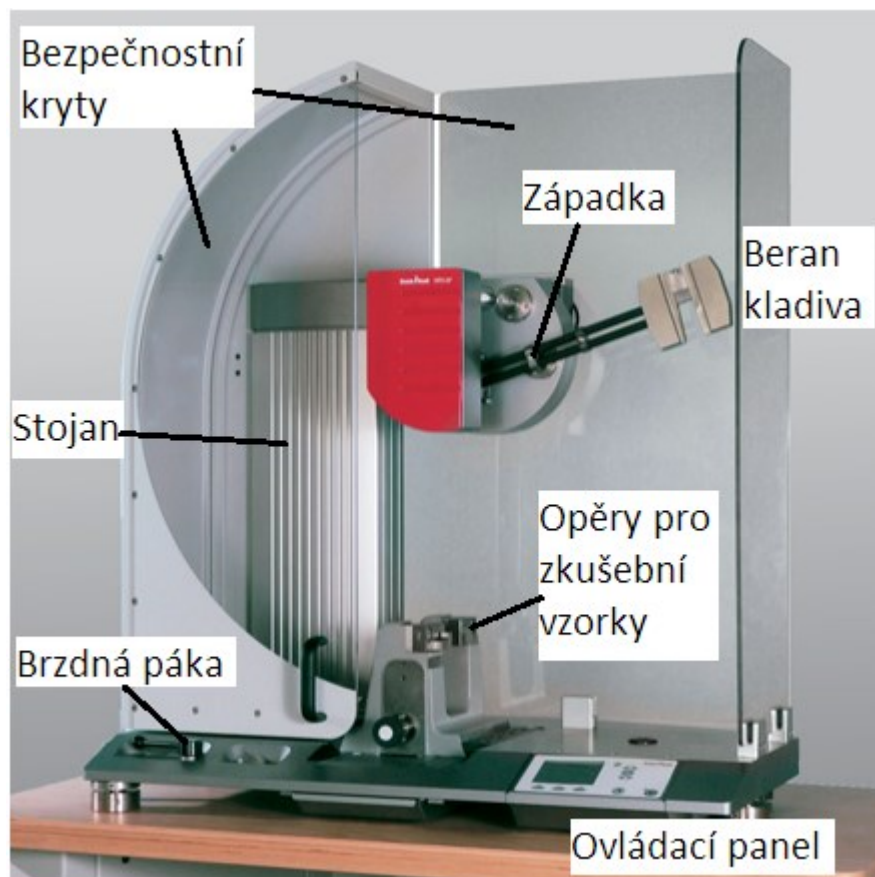
3 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce byly následující body:

- Vypracování literární rešerše.
- Výroba vzorků technologií 3D tisku.
- Provedení dynamické zkoušky vyrobených těles.
- Závěrečné vypracování a zhodnocení práce.

V navazující praktické části je podrobně popsán použitý stroj, definován postup vymodelování a výroby testovaných normalizovaných těles včetně postupu naměření výsledných hodnot rázových i vrubových houževnatostí námi zvolených materiálů. Na konci provedení zkoušky je možno z výsledné analýzy dat určit průměrné velikosti houževnatostí a jejich vzájemné porovnání.

4 POUŽITÝ STROJ



Obr. 20: Popis Charpyho kladiva ZwickRoell [33]

ZwickRoell HIT25P

Rázová zkouška Charpyho kladivem byla provedena na stroji od společnosti Zwick Roell s kyvadlem série HIT o maximální jmenovité energii 25 J. Tento stroj lze použít pro Charpyho a Izod rázové zkoušky nebo rázové zkoušky v tahu.

Tab. 1: Základní parametry HIT25P [33]

Označení:	1064351
Maximální energie:	25 J
Rozměry:	1080 x 1170 x 500 mm (včetně bezpečnostního zařízení)
Hmotnost:	258 kg
Napětí:	100 - 240 V
Frekvence:	50/60 HZ
Příkon:	70 W

Tab. 2: Technické parametry stroje ZwickRoell HIT25p [33]

Rázová zkouška	Norma	Energie (J)	Nárazová rychlost (m/s)	Výška pádu (mm)	Délka kyvadla (mm)	Úhel uvolnění kyvadla (°)	Hmotnost kyvadla (kg)				
Charpy	ISO 179	0,5	2,9 ($\pm 10\%$)	429,01	330	107,46	0,119				
		1					0,238				
		2					0,475				
		4					0,951				
		5					1,188				
		7,5					1,035				
	ASTM D 6110	15	3,8 ($\pm 10\%$)	739,07	400	147,96	2,070				
		25					3,449				
		0,5					3,46	610 (± 2 mm)	330	147,96	0,084
		1									0,167
		2,7									0,452
		5,4									0,903
		10,8									1,806
		21,6									3,612
Izod	ISO 180	1	3,5 ($\pm 10\%$)	609,73	330	147,96	0,167				
		2,75					0,460				
		5,5					0,920				
		11					1,840				
		22					3,679				
	ASTM D 256/ ASTM D 4812	1	3,46	610 (± 2 mm)	330	147,96	0,226				
		2,75					0,460				
		5,5					0,920				
		11					1,840				
		22					3,679				
V tahu	ISO 8256-A/ ISO 8256-B	2	2,9 ($\pm 10\%$)	429,01	330	107,46	0,475				
		4					0,951				
	ISO 8256-B	7,5	3,8 ($\pm 10\%$)	739,07	400	147,96	1,035				
		15					2,070				
		25					3,449				

5 TESTOVANÉ MATERIÁLY

5.1 Akrylonitril-styren-akryl (ASA)

ASA je styrenový polymer pevnější než ABS a proto je ideální nejen pro výrobu prvních funkčních prototypů, ale také pro výrobu zboží pro každodenní využití a výrobu nástrojů. [25]

Výhodami tohoto materiálu jsou dobrá rozměrová stabilita, odolnost proti vlivům počasí, vysoká schopnost zachování fyzikálních vlastností a nízká úroveň žloutnutí. [25]

ASA lze použít pro výrobu elektrických i elektronických zařízení. Neobsahuje zakázané látky, přesto se ale použití pro potravinářský a zdravotnický průmysl nedoporučuje. [25]

Tab. 3: Parametry pro tisk Akrylonitril-styren-akryl [25]

Pracovní teplota:	240-255 °C
Vyhřívaná podložka:	80-105 °C
Dostupné průměry filamentu:	1.75 mm a 2.85 mm
Doporučená rychlost tisku:	30-50 mm/s

5.2 Fillamentum Nylon CF15

Tento filament je vyroben z polyamidu 12 vyztuženého 15% frézovanými uhlíkovými vlákny. Je velmi pevný, tuhý s vysokou tepelnou i chemickou odolností a velkou stabilitou při zpracování. Vyznačuje se i dobrými reologickými vlastnostmi. Vlastnosti materiálu jsou zachovány i při nízkých teplotách. [25]

Díky plnivu, tento materiál také vyniká nízkou tepelnou roztažností. Je proto vhodný pro tisk často namáhaných dílů. Použití tohoto materiálu v potravinářském a zdravotnickém průmyslu se nedoporučuje. [25]

Tab. 4: Parametry pro tisk Nylon CF15 [25]

Pracovní teplota:	235-260 °C
Vyhřívaná podložka:	80-110 °C
Dostupné průměry filamentu:	1.75 mm a 2.85 mm
Doporučená rychlost tisku:	35-60 mm/s

5.3 Fillamentum Nylon AF80

Nylon AF80 Aramid je filament vyroben z polyamidu 12 s 8% výplní aramidových vláken. Tato výplň dodává materiálu tribologické vlastnosti (ovlivňující vzájemné působení tělesa, povrchu a prostředí při jejich pohybu) a zlepšuje odolnost proti opotřebení materiálu. Dále díky tomu odolává vyššímu statickému tlakovému zatížení než nevyztužený Nylon FX256. Také má vyšší tvrdost, tepelnou odolnost a lepší chemickou odolnost. Tyto dobré vlastnosti jsou zachovány i při nízkých teplotách. [25]

Výrobky z tohoto materiálu mohou být různorodé a záleží na finálních požadavcích uživatele. [25]

Vlastnosti tisku jsou několikanásobně vylepšeny díky přítomnosti aramidových vláken. Tento filament lze použít pro výrobu elektrických i elektronických zařízení. Neobsahuje zakázané látky i přesto se ale použití pro potravinářský a zdravotnický průmysl nedoporučuje. [25]

Tab. 5: Parametry pro tisk Nylon AF80 [25]

Pracovní teplota:	235-260 °C
Vyhřívaná podložka:	80-110 °C
Dostupné průměry filamentu:	1.75 mm a 2.85 mm
Doporučená rychlost tisku:	30-50 mm/s

5.4 Z-ULTRAT

Z-ULTRAT je filament na bázi ABS vyráběný společností Zortrax. Tištěné výrobky jsou trvanlivé, pevné s vynikající kvalitou povrchu. Používá se pro výrobu funkčních prototypů, namáhaných součástek, náhradních dílů a běžných spotřebních výrobků (sluchátka). Modely vytištěné z materiálu Z-ULTRAT mají delší životnost než díly vyrobené ze standardního ABS. Z-ULTRAT je odolný vůči vyšším teplotám a nárazům. Jeho výjimečná tvrdost umožňuje testování modelů ve funkčních zařízeních. [26]

Tento filament lze dodatečně zpracovat acetonem a mechanicky ošetřit. U tohoto materiálu je možné spolehlivě dosáhnout vlastností, které se vyskytují u předmětů vyráběných technologií vstřikování. Z- ULTRAT se vyrábí v 7 barvách a je ideální pro nízkonákladovou malosériovou výrobu. [26]

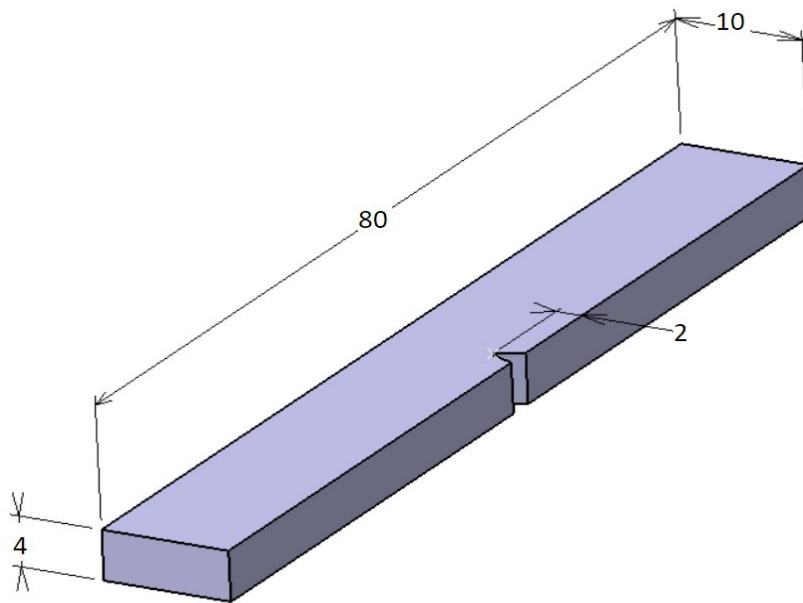
Tab. 6: Parametry pro tisk Z-ULTRAT [26]

Pracovní teplota:	220-270 °C
Vyhřívání	100-120 °C
Dostupné průměry filamentu:	1.75 mm
Doporučená rychlost tisku:	30-60 mm/s

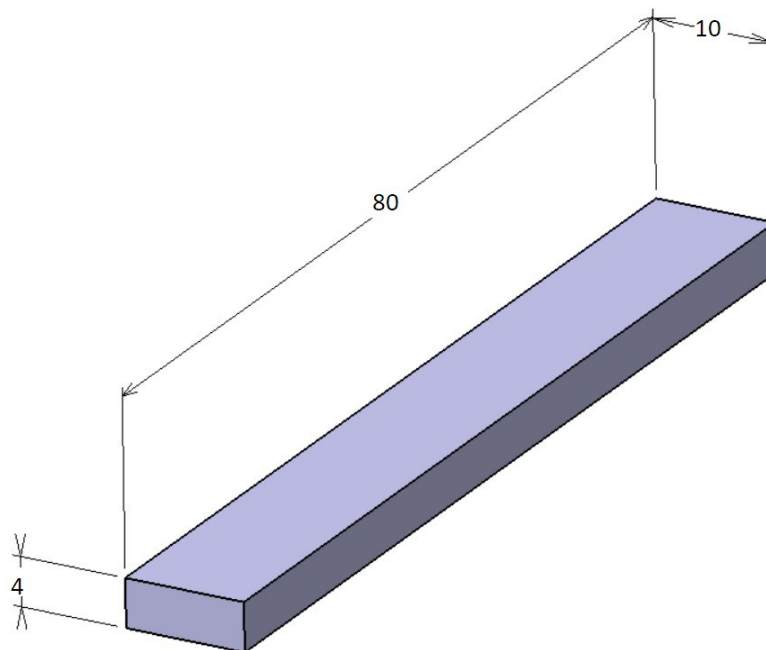
6 NÁVRH A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Vzorky byly nejprve vymodelovány v CAD softwaru CATIA V5R19 dle norem ČSN EN ISO 179-1 a uloženy ve formátu pro stereolitografii (stl). Následovně byly tyto modely vloženy do softwaru společnosti Zortrax s názvem Z-Suite (verze 2.25.0) s databází a základním nastavením pro tiskárnu Zortrax série M200 Plus a převedeny do formátu zcodex2 pro tisk.

Rozměry zkušebních vzorků: délka $l = 80 \pm 2$ mm, šířka $\text{š} = 10.0 \pm 0.2$ mm, tloušťka $t = 4.0 \pm 0.2$ mm, úhel vrubu 45° s poloměrem kořene vrubu $r_N = 0.25 \pm 0.05$ mm



Obr. 21: CATIA model zkušebního vzorku s vrubem



Obr. 22: CATIA model zkušební vzorku bez vrubu

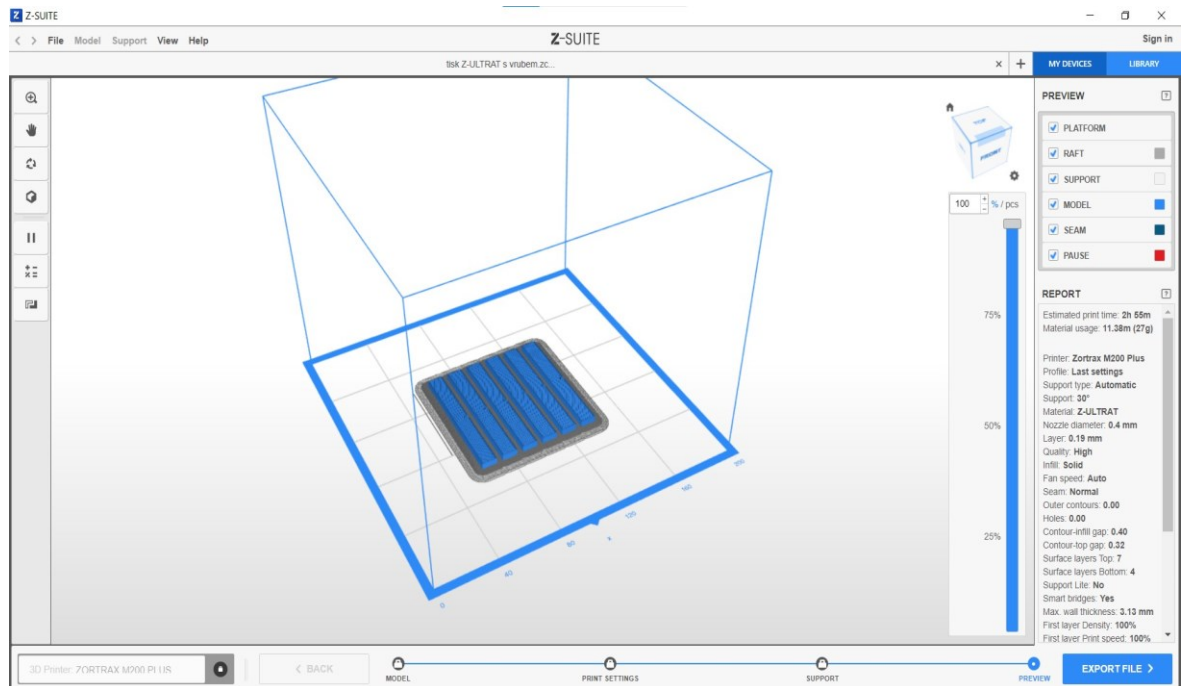
Parametry tisku byly nastaveny v softwaru Z-Suite pro jednotlivé materiály následovně:

Tab. 7: Nastavené teploty pro tisk materiálů

Materiál	Pracovní teplota (°C)	Teplota tiskové podložky (°C)
ASA	240	80
Z-ULTRAT	220	100
Nylon AF80	235	80
Nylon CF15	245	90

Pro všechny materiály byla nastavena 100 % výplň (infill) a tloušťka mezi vrstvami (layer) 0.19 mm. Průměr trysky (nozzle diameter) u použité tiskárny Zortrax M200 Plus je 0.4 mm.

Všechny zbylé parametry byly automaticky přednastaveny programem Z-Suite (verze 2.25.0).



Obr. 23: Sada vzorků s vrubem pro Z-ULTRAT v programu Z-Suite

Tisk zkušebních vzorků

Výroba zkušebních tělísek byla uskutečněna aditivní metodou 3D tisku technologií FDM na tiskárně Zortrax série M200 Plus.



Obr. 24: Tiskárna Zortrax M200 Plus [34]

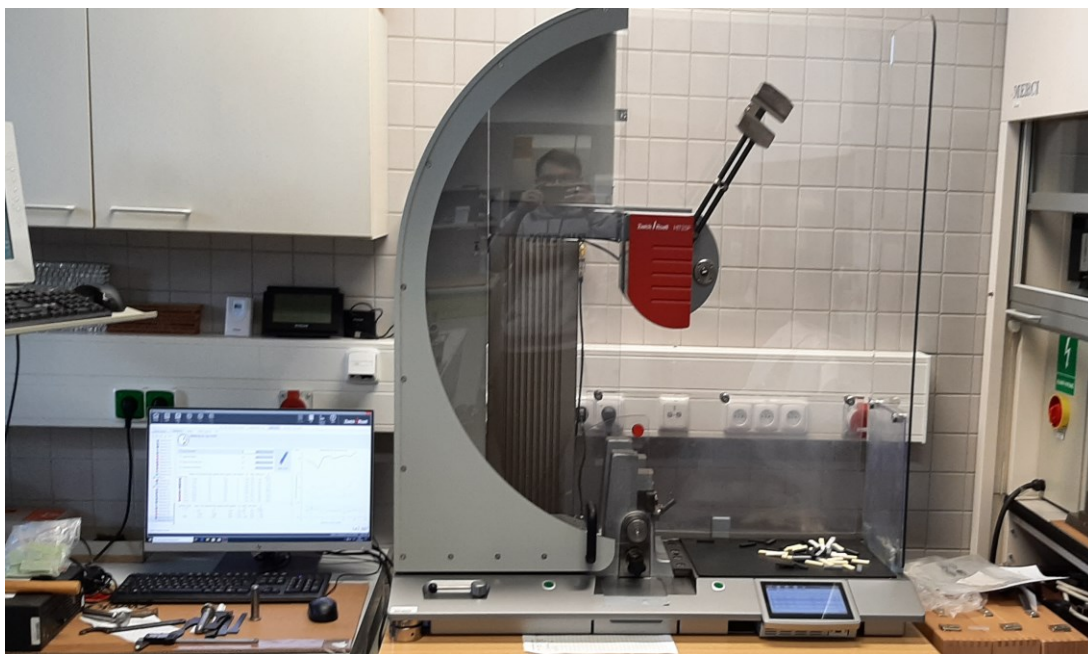
7 PRŮBĚH ZKOUŠKY

Rázová zkouška Charpyho kladivem byla provedena na univerzitním Charpyho kladivu ZwickRoell HIT25P.

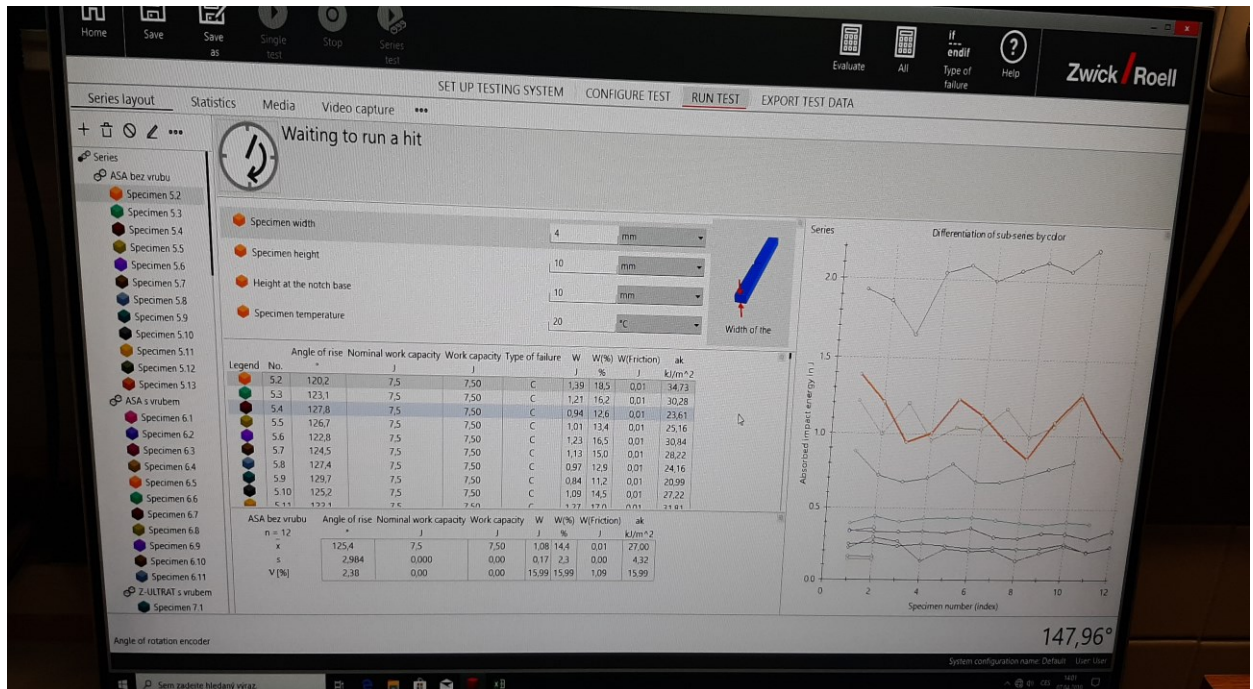
Zkušební těleso bylo nejprve umístěno na podpěry vrubem na opačnou stranu směrem od plochy úderu horizontálně dle normy ČSN EN ISO 179-1 (ráz edgewise). Poté byly v softwaru testXpert III nastaveny rozměry zkušebního normalizovaného vzorku. K uvolnění ramene kyvadla bylo nezbytné zmáčknutí dvou bezpečnostních tlačítek zároveň. Po nárazu Charpyho kladiva do testovaného vzorku bylo potřeba v programu určit k jakému typu lomu došlo (typ A - žádný lom, typ B - částečný lom, typ C - naprostý lom). V našem případě se vždy jednalo o naprostý lom testovaného tělesa. Program nám poté v souborech měření postupně pro jednotlivé vzorky vypočítal a zobrazil všechny potřebné hodnoty.

Pro každý materiál bylo testováno 10 vzorků bez vrubu pro zjištění rázové houževnatosti a 10 vzorků s předtištěným vrubem pro naměření vrubové houževnatosti.

Do grafu byly pro lepší orientaci zaneseny velikosti absorbovaných energií nárazu v Joulech jednotlivých vzorků.



Obr. 25: Charpyho kladivo ZwickRoell HIT25P



Obr. 26: Průběh rázové zkoušky Charpyho kladivem

Akrylonitril-styren-akryl (ASA):

Tab. 8: Rázové houževnatosti vzorků bez vrubu pro materiál ASA

Číslo vzorku	Úhel výkyvu	Jmenovitá pracovní energie	Typ lomu	Absorbovaná energie nárazu W	Absorbovaná energie nárazu W	Tření	Rázová houževnatost a_n
	°	J		J	%		kJ/m^2
1	120,2	7,5	C	1,39	18,5	0,01	34,73
2	123,1	7,5	C	1,21	16,2	0,01	30,28
3	127,8	7,5	C	0,94	12,6	0,01	23,61
4	126,7	7,5	C	1,01	13,4	0,01	25,16
5	122,8	7,5	C	1,23	16,5	0,01	30,84
6	124,5	7,5	C	1,13	15,0	0,01	28,22
7	127,4	7,5	C	0,97	12,9	0,01	24,16
8	129,7	7,5	C	0,84	11,2	0,01	20,99
9	125,2	7,5	C	1,09	14,5	0,01	27,22
10	122,1	7,5	C	1,27	17,0	0,01	31,81
Ø	125,0	7,5	-	1,11	14,8	0,01	27,70
Sm.odch. Ø	2,8	-	-	0,16	2,2	-	4,05
Variační koef. (%)	2,4	-	-	15,99	16,0	-	15,99

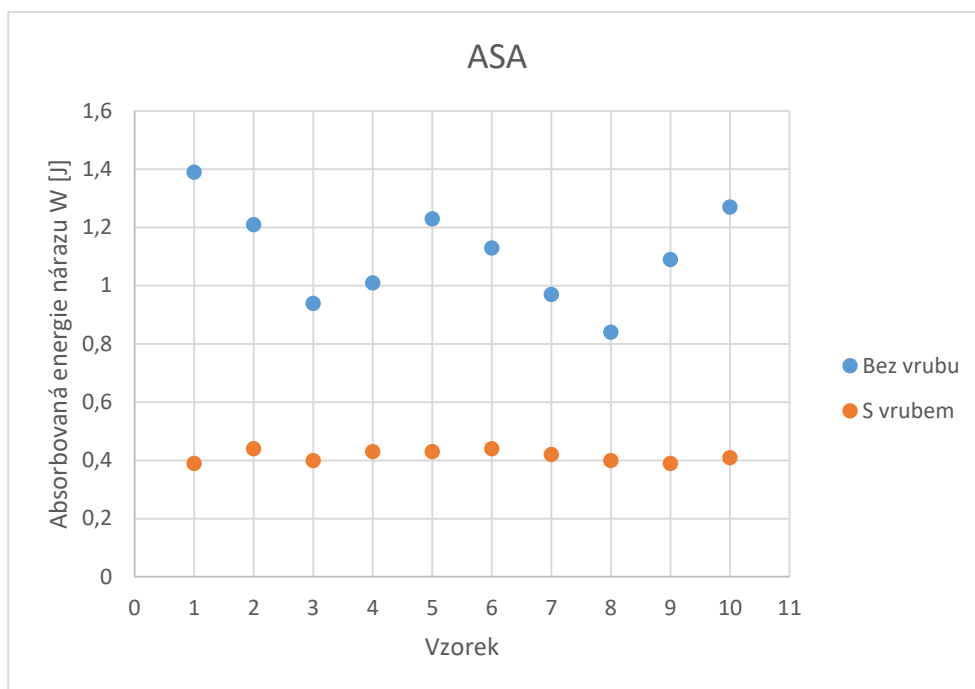
Z tabulky naměřených veličin rázové houževnatosti byla vypočítána průměrná výsledná hodnota úhlu výkyvu 125,0°, absorbované energie nárazu 1,11 J (14,8 %) a rázové houževnatosti 27,70 kJ/m².

Tab. 9: Vrubové houževnatosti vzorků s vrubem pro materiál ASA

Číslo vzorku	Úhel výkyvu	Jmenovitá pracovní energie	Typ lomu	Absorbovaná energie nárazu W	Absorbovaná energie nárazu W	Tření	Vrubová houževnatost KCV
	°	J		J	%		kJ/m ²
1	138,4	7,5	C	0,39	5,2	0,01	12,26
2	137,4	7,5	C	0,44	5,9	0,01	13,73
3	138,2	7,5	C	0,40	5,4	0,01	12,61
4	137,7	7,5	C	0,43	5,7	0,01	13,41
5	137,6	7,5	C	0,43	5,8	0,01	13,52
6	137,5	7,5	C	0,44	5,8	0,01	13,60
7	137,9	7,5	C	0,42	5,6	0,01	13,06
8	138,3	7,5	C	0,40	5,3	0,01	12,42
9	138,6	7,5	C	0,39	5,2	0,01	12,08
10	138,2	7,5	C	0,41	5,4	0,01	12,66
Ø	138,0	7,5	-	0,42	5,5	0,01	12,94
Sm.odch. Ø	0,4	-	-	0,02	0,2	-	0,57
Variační koef. (%)	0,3	-	-	4,68	4,7	-	4,68

Z tabulky naměřených veličin vrubové houževnatosti byla vypočítána průměrná výsledná hodnota úhlu výkyvu 138,0°, absorbované energie nárazu 0,42 J (5,5 %) a rázové houževnatosti 12,94 kJ/m².

Z výsledných průměrných hodnot měření materiálu ASA je možno určit, že testované vzorky s vrubem absorbovaly o 0,69 J (9,3 %) méně energie než zkušební vzorky bez vrubu.



Obr. 27: Graf absorbovaných energií nárazu pro jednotlivé vzorky ASA

Z-ULTRAT:

Tab. 10: Rázové houževnatosti vzorků bez vrubu pro materiál Z-ULTRAT

Číslo vzorku	Úhel výkyvu	Jmenovitá pracovní energie	Typ lomu	Absorbovaná energie nárazu W	Absorbovaná energie nárazu W	Tření	Rázová houževnatost a_n
	°	J		J	%		kJ/m ²
1	123,1	7,5	C	1,21	16,2	0,01	37,92
2	126,8	7,5	C	1,00	13,3	0,01	31,12
3	123,3	7,5	C	1,20	16,0	0,01	30,04
4	127,5	7,5	C	0,96	12,8	0,01	23,98
5	126,0	7,5	C	1,05	14,0	0,01	26,16
6	126,1	7,5	C	1,04	13,8	0,01	25,90
7	123,8	7,5	C	1,17	15,6	0,01	29,30
8	127,0	7,5	C	0,98	13,1	0,01	24,62
9	125,8	7,5	C	1,06	14,1	0,01	26,42
10	122,5	7,5	C	1,25	16,7	0,01	31,30
Ø	125,2	7,5	-	1,09	14,6	0,01	28,68
Sm.odch. Ø	1,7	-	-	0,10	1,4	-	3,98
Variační koef. (%)	1,5	-	-	9,83	9,8	-	9,83

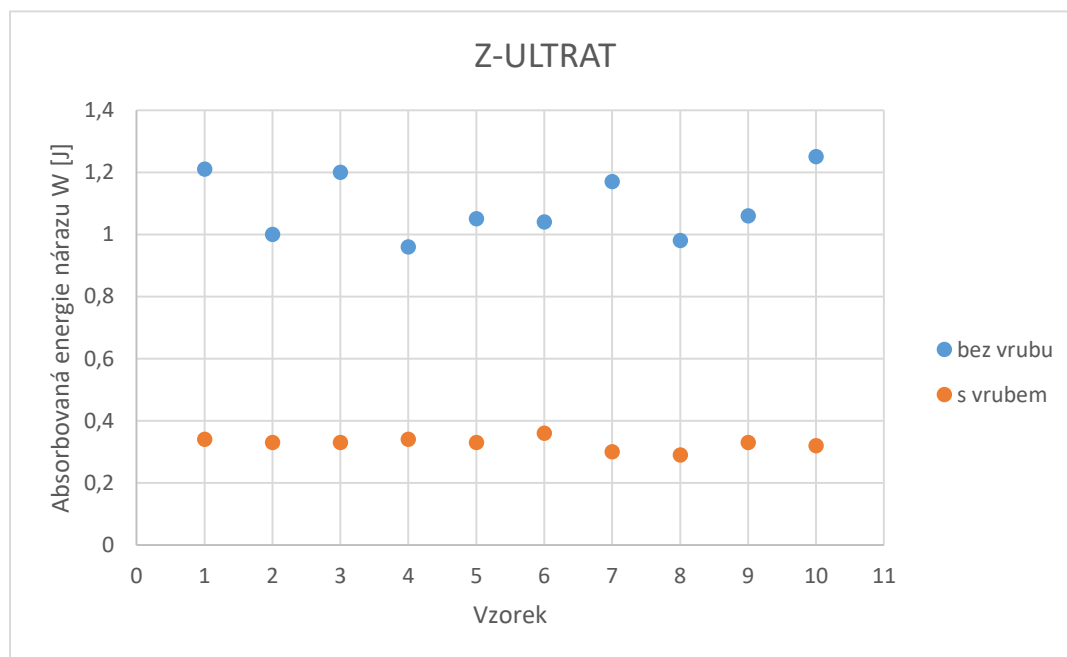
Z tabulky naměřených veličin rázové houževnatosti byla vypočítána průměrná výsledná hodnota úhlu výkyvu $125,2^\circ$, absorbované energie nárazu $1,09 \text{ J}$ ($14,6 \%$) a rázové houževnatosti $28,68 \text{ kJ/m}^2$.

Tab. 11: Vrubové houževnatosti vzorků s vrubem pro materiál Z-ULTRAT

Číslo vzorku	Úhel výkyvu	Jmenovitá pracovní energie	Typ lomu	Absorbovaná energie nárazu W	Absorbovaná energie nárazu W	Tření	Vrubová houževnatost KCV
	°	J		J	%		kJ/m^2
1	139,5	7,5	C	0,34	4,6	0,01	10,67
2	139,7	7,5	C	0,33	4,4	0,01	10,38
3	139,8	7,5	C	0,33	4,4	0,01	10,36
4	139,6	7,5	C	0,34	4,5	0,01	10,59
5	139,8	7,5	C	0,33	4,4	0,01	10,31
6	139,1	7,5	C	0,36	4,8	0,01	11,34
7	140,5	7,5	C	0,30	4,0	0,01	9,31
8	140,6	7,5	C	0,29	3,9	0,01	9,13
9	139,8	7,5	C	0,33	4,4	0,01	10,25
10	139,9	7,5	C	0,32	4,3	0,01	10,10
Ø	139,8	7,5	-	0,33	4,4	0,01	10,24
Sm.odch. Ø	0,4	-	-	0,02	0,2	-	0,61
Variační koef. (%)	0,3	-	-	6,99	7,0	-	6,99

Z tabulky naměřených veličin vrubové houževnatosti byla vypočítána průměrná výsledná hodnota úhlu výkyvu $139,8^\circ$, absorbované energie nárazu $0,33 \text{ J}$ ($4,4 \%$) a rázové houževnatosti $10,24 \text{ kJ/m}^2$.

Z naměřených průměrných hodnot Z-ULTRAT lze určit, že zkušební vzorky bez vrubu absorbovaly o $0,76 \text{ J}$ ($10,2 \%$) více energie než vzorky s vrubem.



Obr. 28: Graf absorbovaných energií nárazu pro jednotlivé vzorky Z-ULTRAT

Nylon CF15:

Tab. 12: Rázové houževnatosti vzorků bez vrubu pro materiál Nylon CF15

Číslo vzorku	Úhel výkyvu	Jmenovitá pracovní energie	Typ lomu	Absorbovaná energie nárazu W	Absorbovaná energie nárazu W	Tření	Rázová houževnatost a_n
	°	J		J	%		kJ/m ²
1	128,9	7,5	C	0,88	11,7	0,01	22,03
2	131,9	7,5	C	0,72	9,6	0,01	18,00
3	132,8	7,5	C	0,67	9,0	0,01	16,84
4	132,2	7,5	C	0,70	9,4	0,01	17,57
5	130,3	7,5	C	0,80	10,7	0,01	20,06
6	132,6	7,5	C	0,68	9,1	0,01	17,00
7	132,6	7,5	C	0,68	9,1	0,01	17,00
8	131,9	7,5	C	0,72	9,6	0,01	18,04
9	130,9	7,5	C	0,77	10,3	0,01	19,26
10	130,1	7,5	C	0,82	10,9	0,01	20,45
Ø	131,4	7,5	-	0,74	9,9	0,01	18,63
Sm.odch. Ø	1,2	-	-	0,07	0,9	-	1,66
Variační koef. (%)	1,0	-	-	9,42	9,4	-	9,42

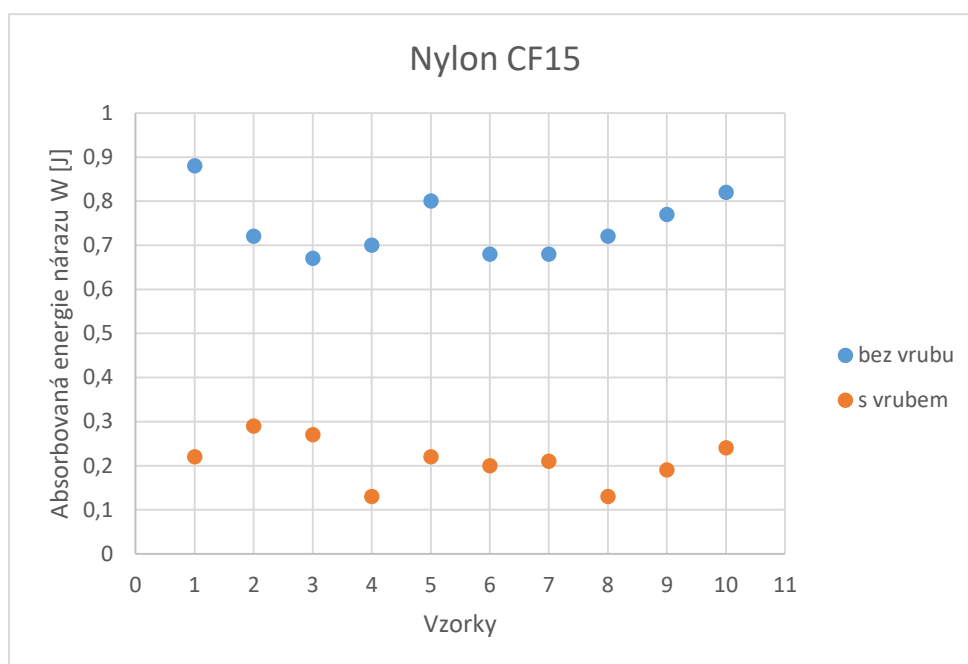
Z tabulky naměřených veličin rázové houževnatosti byla vypočítána průměrná výsledná hodnota úhlu výkyvu $131,4^\circ$, absorbované energie nárazu $0,74 \text{ J}$ ($9,9 \%$) a rázové houževnatosti $18,63 \text{ kJ/m}^2$.

Tab. 13: Vrubové houževnatosti vzorků s vrubem pro materiál Nylon CF15

Číslo vzorku	Úhel výkyvu	Jmenovitá pracovní energie	Typ lomu	Absorbovaná energie nárazu W	Absorbovaná energie nárazu W	Tření	Vrubová houževnatost KCV
	°	J		J	%		kJ/m^2
1	142,2	7,5	C	0,22	3,0	0,01	6,97
2	140,6	7,5	C	0,29	3,9	0,01	9,18
3	141,2	7,5	C	0,27	3,6	0,01	8,38
4	144,3	7,5	C	0,13	1,8	0,01	4,13
5	142,3	7,5	C	0,22	2,9	0,01	6,82
6	142,7	7,5	C	0,20	2,7	0,01	6,26
7	142,5	7,5	C	0,21	2,8	0,01	6,48
8	144,3	7,5	C	0,13	1,8	0,01	4,20
9	143,0	7,5	C	0,19	2,5	0,01	5,92
10	141,9	7,5	C	0,24	3,2	0,01	7,38
Ø	142,5	7,5	-	0,21	2,8	0,01	6,57
Sm.odch. Ø	1,1	-	-	0,05	0,6	-	1,52
Variační koef. (%)	0,8	-	-	23,31	23,3	-	23,31

Z tabulky naměřených veličin vrubové houževnatosti byla vypočítána průměrná výsledná hodnota úhlu výkyvu $142,5^\circ$, absorbované energie nárazu $0,21 \text{ J}$ ($2,8 \%$) a rázové houževnatosti $6,57 \text{ kJ/m}^2$.

Dle vypočítaných průměrných hodnot testovaného materiálu Nylon CF15 je možno určit, že zkušební normalizované vzorky s vrubem absorbovaly o $0,53 \text{ J}$ ($7,1 \%$) méně než zkušební vzorky bez vrubu.



Obr. 29: Graf absorbovaných energií nárazu pro jednotlivé vzorky Nylon CF15

Nylon AF80:

Tab. 14: Rázové houževnatosti vzorků bez vrubu pro materiál Nylon AF80

Číslo vzorku	Úhel výkyvu	Jmenovitá pracovní energie	Typ lomu	Absorbovaná energie nárazu W	Absorbovaná energie nárazu W	Tření	Rázová houževnatost a_n
	°	J		J	%		kJ/m ²
1	111,7	7,5	C	1,93	25,7	0,01	48,26
2	112,8	7,5	C	1,86	24,8	0,01	46,52
3	116,1	7,5	C	1,65	22,0	0,01	41,18
4	110,0	7,5	C	2,04	27,2	0,01	51,03
5	109,3	7,5	C	2,09	27,9	0,01	52,24
6	110,7	7,5	C	2,00	26,6	0,01	49,90
7	109,7	7,5	C	2,06	27,5	0,01	51,57
8	108,8	7,5	C	2,12	28,3	0,01	53,05
9	109,6	7,5	C	2,07	27,6	0,01	51,73
10	107,6	7,5	C	2,20	29,4	0,01	55,05
Ø	110,6	7,5	-	2,00	26,7	0,01	50,05
Sm.odch. Ø	2,3	-	-	0,15	2,0	-	3,73
Variační koef. (%)	2,2	-	-	7,86	7,9	-	7,86

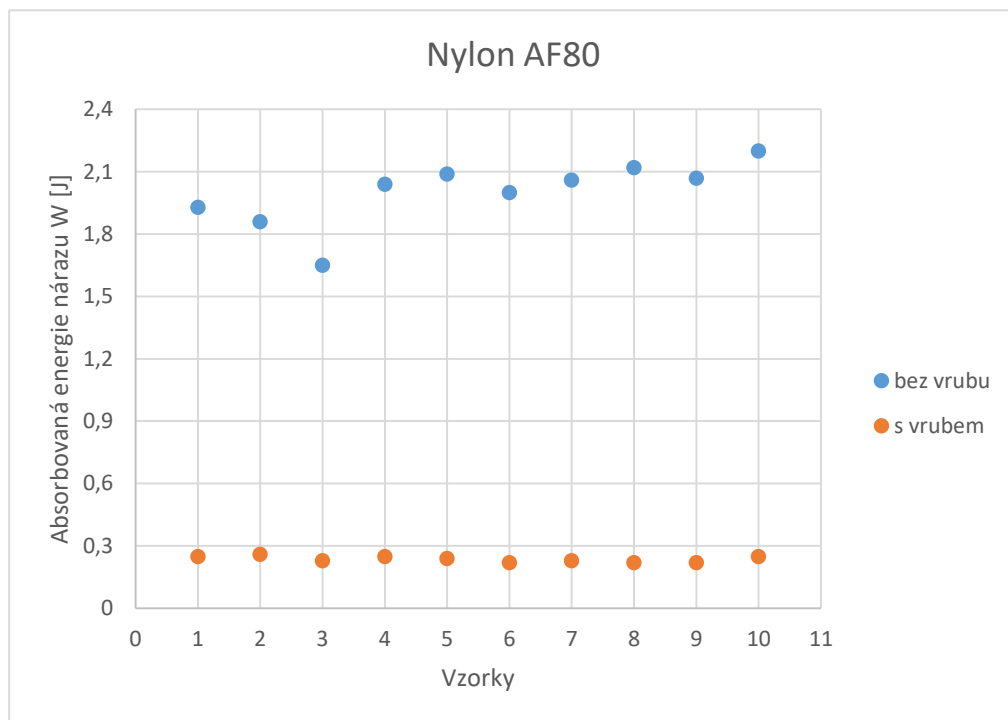
Z tabulky naměřených veličin rázové houževnatosti byla vypočítána průměrná výsledná hodnota úhlu výkyvu $110,6^\circ$, absorbované energie nárazu 2 J (26,7 %) a rázové houževnatosti $50,05 \text{ kJ/m}^2$.

Tab. 15: Vrubové houževnatosti vzorků s vrubem pro materiál Nylon AF80

Číslo vzorku	Úhel výkyvu	Jmenovitá pracovní energie	Typ lomu	Absorbovaná energie nárazu W	Absorbovaná energie nárazu W	Tření	Vrubová houževnatost KCV
	°	J		J	%		kJ/m^2
1	141,6	7,5	C	0,25	3,3	0,01	7,75
2	141,4	7,5	C	0,26	3,5	0,01	8,10
3	141,9	7,5	C	0,23	3,1	0,01	7,31
4	141,6	7,5	C	0,25	3,3	0,01	7,83
5	141,8	7,5	C	0,24	3,2	0,01	7,46
6	142,2	7,5	C	0,22	3,0	0,01	6,92
7	142,1	7,5	C	0,23	3,0	0,01	7,06
8	142,3	7,5	C	0,22	2,9	0,01	6,84
9	142,2	7,5	C	0,22	3,0	0,01	6,99
10	141,5	7,5	C	0,25	3,4	0,01	7,88
Ø	141,9	7,5	-	0,24	3,2	0,01	7,41
Sm.odch. Ø	0,3	-	-	0,01	0,2	-	0,43
Variační koef. (%)	0,3	-	-	8,11	8,1	-	8,11

Z tabulky naměřených veličin vrubové houževnatosti byla vypočítána průměrná výsledná hodnota úhlu výkyvu $141,9^\circ$, absorbované energie nárazu 0,24 J (3,2 %) a rázové houževnatosti $7,41 \text{ kJ/m}^2$.

Dle výsledných průměrných hodnot absorbované energie materiálu Nylon AF80 lze určit, že zkušební normalizované vzorky bez vrubu absorbovaly o 1,76 J (23,5 %) více energie než testované vzorky s vrubem.



Obr. 30: Graf absorbovaných energií nárazu pro jednotlivé vzorky Nylon AF80

Ze všech testovaných materiálů bylo zjištěno, že nejvíce energie absorbovaly zkušební normalizované vzorky vytištěné z materiálu Nylon AF80 (až 2,2 J) a naopak nejméně energie bylo absorbováno při testování normalizovaných vzorků z Nylonu CF15 (0,13 J).

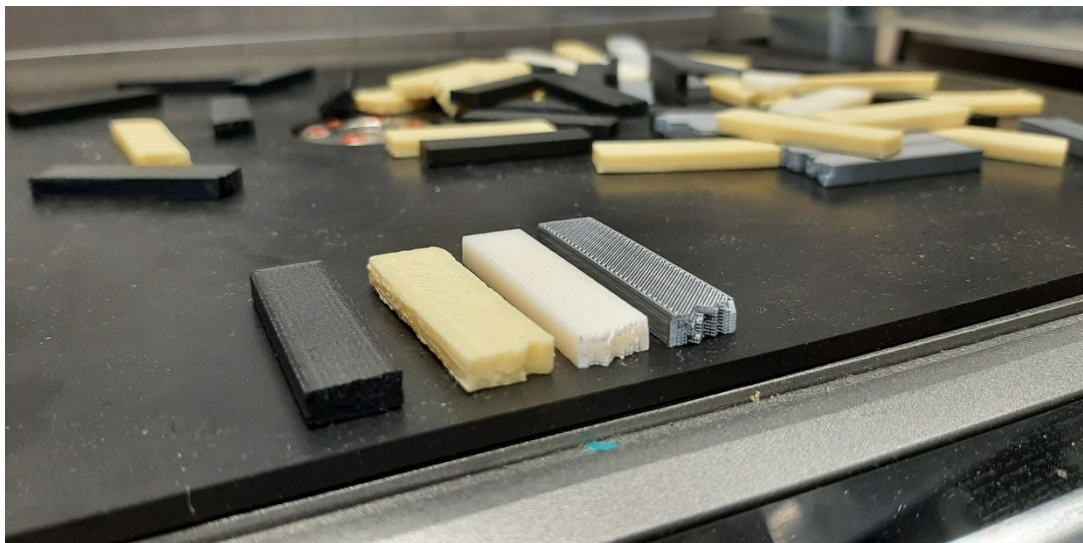
8 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Po dokončení rázové zkoušky Charpyho kladivem souboru deseti normalizovaných zkušebních vzorků byly naměřené hodnoty zaneseny vždy do dvou tabulek pro rázovou a vrubovou houževnatost. Následně byly pro jejich jednodušší porovnání vloženy do grafů hodnoty absorbovaných energií W [J]. Dále byly vypočítány průměrné výsledné hodnoty každé měřené veličiny, včetně směrodatných odchylek průměrných hodnot, směrodatných odchylek výběru a variačních koeficientů. Také byla z příslušných tabulek určena průměrná hodnota rázové i vrubové houževnatosti a porovnána mezi jednotlivými materiály. Nakonec byly v následující tabulce porovnány největší a nejmenší hodnoty všech naměřených veličin testovaných filamentů.

Tab. 16: Porovnání výsledných průměrných hodnot

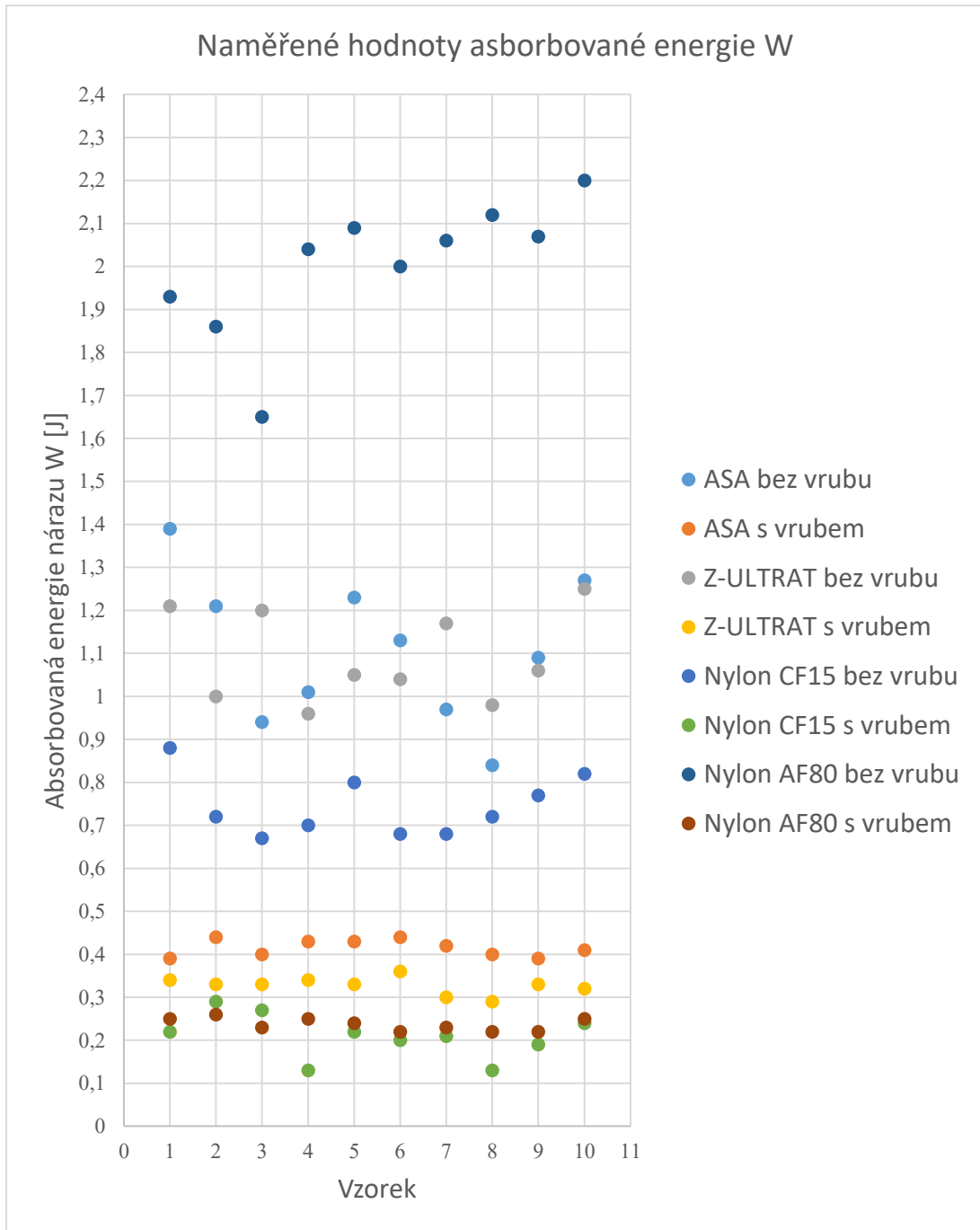
	Výsledná hodnota	Materiál	Vzorek
Největší úhel výkyvu	142,5°	Nylon CF15	s vrubem
Nejmenší úhel výkyvu	110,6°	Nylon AF80	bez vrubu
Nejvíce absorbované energie	2,00 J	Nylon AF80	bez vrubu
Nejvíce absorbované energie	26,7%	Nylon AF80	bez vrubu
Nejméně absorbované energie	0,21 J	Nylon CF15	s vrubem
Nejméně absorbované energie	2,8%	Nylon CF15	s vrubem
Největší rázová houževnatost	50,05 kJ/m ²	Nylon AF80	bez vrubu
Nejmenší rázová houževnatost	18,63 kJ/m ²	Nylon CF15	bez vrubu
Největší vrubová houževnatost	12,94 kJ/m ²	ASA	s vrubem
Nejmenší vrubová houževnatost	6,57 kJ/m ²	Nylon CF15	s vrubem

Největší úhel výkyvu nastal při zkoušce materiálu Nylon CF15 (142,5°). K nejmenšímu výkyvu došlo při testování vzorků Nylonu AF80 (110,6°). Nejvíce energie absorboval vzorek z Nylonu AF80 (2 J – 26,7%). Nejmenší množství energie absorboval materiál Nylon CF15 (0,21 J – 2,8%). Největší rázová houževnatost byla naměřena pro materiál Nylon AF80 (50,05 kJ/m²). Nejmenší rázová houževnatost byla zjištěna u materiálu Nylon CF15 (18,63 kJ/m²). Testovaný zkušební vzorek s největší vrubovou houževnatostí byl z materiálu ASA (12,94 kJ/m²). Nejmenší vrubová houževnatost byla otestována u zkušebního normalizovaného vzorku z Nylonu CF15 (6,57 kJ/m²).



Obr. 31: Vzorčky po dokončení rázové zkoušky zleva: Nylon CF15, Nylon AF80, Z-ULTRAT, ASA

Z následujícího grafu je možno vyčíst, jakých hodnot dosahují naměřené absorbované energie při nárazu. Námi naměřené hodnoty absorbované energie vzorků bez vrubu materiálů ASA, Z-ULTRAT, Nylon CF15 se pohybují v rozmezí 0,7 až 1,3 J. Naopak u testování zkušebních vzorků bez vrubu materiálu Nylon AF80 se výsledné hodnoty pohybují kolem 2 J, což je nejvíce z celého měření. Při žádné rázové zkoušce normalizované série deseti vzorků s vrubem nedošlo k překročení hranice absorbované energie 0,5 J. U materiálů ASA, Z-ULTRAT, Nylon CF15 lze proto stanovit, že jejich rázová houževnatost je okolo trojnásobku houževnatosti vrubové, zatímco u Nylonu AF80 lze pozorovat největší rozdíl rázové a vrubové houževnatosti (rozdíl 1,76 J – 23,5 % absorbované energie při nárazu).



Obr. 32: Graf naměřených hodnot absorbované energie materiálů

ZÁVĚR

Teoretická část bakalářské práce se zabývala vlastnostmi technických materiálů, mechanickými zkouškami, podrobněji se zaměřila na rázovou zkoušku Charpyho kladivem a popisovala také základní technologie 3D tisku.

Cílem této bakalářské práce bylo změření a následné porovnání rázové a vrubové houževnatosti normalizovaných zkušebních vzorků jednotlivých materiálů pomocí rázové zkoušky Charpyho kladivem. Testovanými materiály byly ASA, Z-ULTRAT, Nylon CF15 a Nylon AF80.

Zkušební vzorky byly vymodelovány v CAD softwaru CATIA V5R19 s rozměry dle normy ČSN EN ISO 179-1. Poté byly tyto modely vloženy do softwaru Z-Suite a pomocí technických katalogů příslušných materiálů byly nastaveny parametry tisku sad zkušebních vzorků. Tato normalizovaná zkušební tělíska byla vytištěna metodou FDM na tiskárně ZORTRAX M200 Plus v sadách po šesti vzorcích. Doba tisku jedné sady trvala přibližně 3 hodiny. Pro každý materiál bylo vytištěno 12 vzorků s vrubem a 12 vzorků bez vrubu. Pro testování bylo použito vždy 10 vzorků. Pro zkoušku tělísek s dodatečně manuálně vyrobeným vrubem byly použity zbylé kusy vytištěných vzorků bez vrubu z materiálů Z-ULTRAT, Nylon AF80 a Nylon CF15.

Po vytištění byla u všech testovaných vzorků provedena podle normy ČSN EN ISO 179-1 rázová zkouška Charpyho kladivem ZwickRoell HIT25P se jmenovitou energií 7.5 J.

U všech vzorků došlo k naprostému lomu. Výsledné hodnoty byly zaneseny do tabulek a grafů, ze kterých byly definovány průměrné parametry výsledných hodnot rázové zkoušky Charpyho kladivem. Největší úhel výkyvu nastal při zkoušce materiálu Nylon CF15 ($142,5^\circ$). K nejmenšímu výkyvu došlo při testování vzorků Nylonu AF80 ($110,6^\circ$). Nejvíce energie absorboval vzorek z Nylonu AF80 (2 J – 26,7%). Nejmenší množství energie absorboval materiál Nylon CF15 (0,21 J – 2,8%). Největší rázová houževnatost byla naměřena pro materiál Nylon AF80 ($50,05 \text{ kJ/m}^2$). Nejmenší rázová houževnatost byla zjištěna u materiálu Nylon CF15 ($18,63 \text{ kJ/m}^2$). Testovaný zkušební vzorek s největší vrubovou houževnatostí byl z materiálu ASA ($12,94 \text{ kJ/m}^2$). Nejmenší vrubová houževnatost byla otestována u zkušebního normalizovaného vzorku z Nylonu CF15 ($6,57 \text{ kJ/m}^2$).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SOUKUP, Josef. *Úvod do strojírenství a elektrotechniky*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta výrobních technologií a managementu, 2013. ISBN 978-80-7414-608-4.
- [2] BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření pro SPŠ strojírenskou*. Praha: Informatorium, 2009. ISBN 978-80-7333-072-9.
- [3] HRUBÝ, Vojtěch. *Přehled materiálového inženýrství*. Ostrava: Kovosil, 2010. ISBN 978-80-903694-5-0.
- [4] TOMČÍK, Petr. *Teorie technologických procesů návody do cvičení*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-248-1289-2.
- [5] MACHEK, Václav. *Nauka o materiálu: Vlastnosti kovových materiálů*. 2. část. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03686-0.
- [6] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [7] HLUCHÝ, Miroslav. *Strojírenská technologie I: Nauka o materiálu*. Praha: Scientia, 2002. ISBN 80-7183-262-6.
- [8] SCHMIDT, Pavel. *Základy zkušebnictví*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2584-9.
- [9] MARTINÁK, M. *Kontrola a měření*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00103-X.
- [10] PROCHÁZKA, Karel. *Konstrukční měření III* [online]. SPŠU Opava [cit. 2021-10-30]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/KOM_III/VY_52_INOVACE_J-05-27.pdf
- [11] Lakes, Roderick., *Viscoelastic Materials*, Cambridge University Press, 2009.
- [12] Menczel., J.D. and Prime, R. B., *Thermal Analysis of Polymers*, Wiley, 2009.
- [13] Srinivas, K., and Dharaiya, D., *Material And Rheological Characterization For Rapid Prototyping Of Elastomers Components*, American Chemical Society, Rubber Division, 170th Technical Meeting, Cincinnati, 2006.
- [14] *Strojírenská technologie: Pracovní sešit pro 1. ročník*. Zlín: Střední průmyslová škola Zlín, 2015.

- [15] Kompass. *Cz.kompass.com* [online]. [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://cz.kompass.com/p/padostroj-pro-zkouseni-vlivu-rychlosti-deformace-na-tvaritelnost/2cf14f93-7044-4be2-a6ca-09293e86624b/>
- [16] *Strojírenská technologie: Pracovní sešit pro 3. ročník*. Zlín: Střední průmyslová škola Zlín, 2017.
- [17] Základy 3D tisku. *Muni.cz* [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/ped/jaro2021/TI9009/111101390/zaklady-3d-tisku.pdf>
- [18] ISD. *Isd-soft.com* [online]. [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://isd-soft.com/tech-blog/enoh-we-have-a-3d-printer-in-the-office-or-fdm-printing-basics/>
- [19] Tractus3D. *Tractus3d.com* [online]. [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://tractus3d.com/knowledge/learn-3d-printing/fdm-3d-printing/>
- [20] Optimizing projects with both FDM and SLA 3D printing. *3dnatives* [online]. 2019 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/optimizing-projects-with-fdm-and-sla-3d-printing-211120194/>
- [21] All3DP. *All3dp.com* [online]. 2019 [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/selective-laser-sintering-sls-3d-printing-simply-explained/>
- [22] All3DP. *All3dp.com* [online]. 2019 [cit. 2021-11-29]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>
- [23] Acme Plastics. *AcmePlastics* [online]. [cit. 2021-12-02]. Dostupné z: <https://www.acmeplastics.com/what-is-pmma>
- [24] Materialpro3d. *Materialpro3d* [online]. [cit. 2021-12-02]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/pmma-filament/>
- [25] Fillamentum: addi(c)tive polymers. *Fillamentum* [online]. [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://fillamentum.com>
- [26] Z-ULTRAT. *Zortrax.com* [online]. [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: <https://zortrax.com/filaments/z-ultrat/>
- [27] 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna?. *Svět Hardware* [online]. redakce SHW, 21.2. 2019 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457-2>

- [28] *Zkouška ohybem* [online]. In: 2012 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/KOM_III/VY_52_INOVACE_J-05-23.pdf
- [29] FOREJT, Milan, Anton HUMÁR, Miroslav PÍŠKA a Libor MACHÁČEK. *Experimentální metody*. Brno, 2003.
- [30] 3D tisk kovů: Jak funguje a v čem je lepší než obrábění. *For3dtisk.cz* [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://for3dtisk.cz/3d-tisk-kovu-blog/>
- [31] Průvodce materiály pro 3D tisk: Jak vybrat správný materiál pro správnou aplikaci. *Www.mcae.cz* [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: https://www.mcae.cz/wp-content/uploads/2021/08/Material_Guide_CZ_A4_7-2021_V20.pdf
- [32] Stereolithography (SLA) 3D printing: Technology overview. *Xometry.eu* [online]. [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://xometry.eu/en/stereolithography-sla-3d-printing-technology-overview/>
- [33] Pendulum impact testers for tests on plastics. *ZwickRoell.com* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/products/products-for-impact-testing/pendulum-impact-testers-for-tests-on-plastics/>
- [34] Zortrax/kryt-HEPA. *3djake.cz* [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.3djake.cz/zortrax/kryt-hepa?sai=3656&gclid=EAIaIQobChMImKa51tbN9wIVsYxoCR0kDAA-EAQYASABEGKh2PD_BwE

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ASA	Acrylonitrile styrene acrylate
PETG	Polyethyltereftalát s modifikovaným glykolem
PEI	Polyetherimide
PEEK	Polyetheretherketone
PMMA	Polymethylmetakrylát
PA	Polyamid
PLA	Polyaktid
TPU	Termoplastický polyuretan
TPE	Termoplastický elastomer
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
SLS	Selective Laser Sintering
SLA	Stereolitografie
PVA	Polyvinylalkohol
BVOH	Butenediol Vinyl Alcohol Copolymer
N	Jednotka síly - Newton
μm	Jednotka délky - Mikrometr
mm	Jednotka délky - Milimetr
mm^2	Jednotka plochy - Milimetr čtvereční
mm^3	Jednotka objemu - Milimetr krychlové
cm	Jednotka délky - Centimetr
cm^2	Jednotka plochy - Centimetr čtvereční
m^2	Jednotka plochy - Metr čtvereční
kg	Jednotka hmotnosti - Kilogram

g	Jednotka hmotnosti - Gram
g/m ³	Jednotka hustoty - Gram na metr krychlový
mm/s	Jednotka rychlosti- Milimetr za sekundu
J	Jednotka energie - Joul
kJ	Jednotka energie - Kilojoul
MPa	Jednotka tlaku - Megapascal
rad	Jednotka rovinného úhlu - Radián
%	Procenta
Ø	Průměrná hodnota
°C	Stupeň Celsia
CO ₂	Oxid uhličitý
UV	Ultrafialové záření
Tzv.	Takzvaný
Např.	Například
Sm.odch. Ø	Směrodatná odchylka průměrné hodnoty
Koef.	Koeficient

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Pracovní diagram oceli [14].....	18
Obr. 2: Zkouška tlakem [14].....	20
Obr. 3: Zkouška ohybem [28].....	22
Obr. 4: Zkouška krutem [29].....	22
Obr. 5: Schéma stroje pro zkoušku stříhem [7].....	24
Obr. 6: Zkušební vzorek [10].....	25
Obr. 7: Wöhlerova křivka [10].....	26
Obr. 8: Příklady vrubů [10].....	26
Obr. 9: Charpyho rázová zkouška [14].....	29
Obr. 10: Padostroj [15]	30
Obr. 11: Kartézská tiskárna [17].....	32
Obr. 12: Delta tiskárna [17].....	33
Obr. 13: Polar tiskárna [17].....	33
Obr. 14: Popis FDM kartézské 3D tiskárny [18].....	34
Obr. 15: Tisková hlava E3D V6 [27].....	35
Obr. 16: Bowdenový extruder (vlevo), přímý extruder (vpravo) [27].....	35
Obr. 18: Metoda SLS [30].....	42
Obr. 19: Metoda SLA [32].....	43
Obr. 20: Popis Charpyho kladiva ZwickRoell [33].....	46
Obr. 21: CATIA model zkušební vzorku s vrubem.....	51
Obr. 22: CATIA model zkušební vzorku bez vrubu.....	52
Obr. 23: Sada vzorků s vrubem pro Z-ULTRAT v programu Z-Suite.....	53
Obr. 24: Tiskárna Zortrax M200 Plus [34].....	53
Obr. 25: Charpyho kladivo ZwickRoell HIT25P.....	54
Obr. 26: Průběh rázové zkoušky Charpyho kladivem.....	55
Obr. 27: Graf absorbovaných energií nárazu pro jednotlivé vzorky ASA	57
Obr. 28: Graf absorbovaných energií nárazu pro jednotlivé vzorky Z-ULTRAT.....	59
Obr. 29: Graf absorbovaných energií nárazu pro jednotlivé vzorky Nylon CF15.....	61
Obr. 30: Graf absorbovaných energií nárazu pro jednotlivé vzorky Nylon AF80.....	63
Obr. 31: Vzorky po dokončení rázové zkoušky zleva: Nylon CF15, Nylon AF80, Z-ULTRAT, ASA.....	65
Obr. 32: Graf naměřených hodnot absorbované energie materiálů.....	66

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Základní parametry HIT25P [33]	47
Tab. 2: Technické parametry stroje ZwickRoell HIT25p [33]	47
Tab. 3: Parametry pro tisk Akrylonitril-styren-akryl [25]	48
Tab. 4: Parametry pro tisk Nylon CF15 [25]	49
Tab. 5: Parametry pro tisk Nylon AF80 [25]	49
Tab. 6: Parametry pro tisk Z-ULTRAT [26]	50
Tab. 7: Nastavené teploty pro tisk materiálů	52
Tab. 8: Rázové houževnatosti vzorků bez vrubu pro materiál ASA	55
Tab. 9: Vrubové houževnatosti vzorků s vrubem pro materiál ASA	56
Tab. 10: Rázové houževnatosti vzorků bez vrubu pro materiál Z-ULTRAT	57
Tab. 11: Vrubové houževnatosti vzorků s vrubem pro materiál Z-ULTRAT	58
Tab. 12: Rázové houževnatosti vzorků bez vrubu pro materiál Nylon CF15	59
Tab. 13: Vrubové houževnatosti vzorků s vrubem pro materiál Nylon CF15	60
Tab. 14: Rázové houževnatosti vzorků bez vrubu pro materiál Nylon AF80	61
Tab. 15: Vrubové houževnatosti vzorků s vrubem pro materiál Nylon AF80	62
Tab. 16: Porovnání výsledných průměrných hodnot	64