



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PRO 3D TISK

MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS FOR 3D PRINTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Janiš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2021



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH

V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Adam Janiš

ID: 186100

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Mechanické vlastnosti materiálů pro 3D tisk

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte jakým způsobem se realizují tahové zkoušky plastových materiálů. Seznamte se s teorií FDM 3D tisku a navrhnete koncept pro zařízení, které by bylo možné využít pro mechanické zkoušky vybraných plastových materiálů. K zařízení vytvořte příslušnou výrobní dokumentaci a ověřte jeho funkčnost.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se ve stručnosti zabývá popisem technologie 3D tisku metodou FDM, která funguje na principu nanášení vrstev roztavených termoplastů a jejich následného ochlazení a ztuhnutí. Tato jedinečná struktura poté vykazuje silnou anizotropii mechanických vlastností a kvůli tomu je jejich testování i nastavení tisku velmi důležité. Tahové zkoušky plastových materiálů včetně ukazatelů mechanických vlastností jsou v této práci popsány podle norem ČSN EN ISO. V praktické části je uveden koncept zařízení schopného vykonávat tyto zkoušky. V blokovém diagramu jsou znázorněny funkční prvky a jejich propojení a dále je popsána konstrukční část zařízení. Dopodrobna je popsán průběh zkoušky a následné zpracování dat. Na závěr je uvedena potřebná výrobní dokumentace.

Klíčová slova

3D tisk, FDM, filameny, tahové zkoušky, zkušební tělesa, koncept zařízení na tahové zkoušky

Abstract

This thesis focuses on the description of 3D printing technologies using the FDM method, which uses deposition of molten thermoplastics and their subsequent cooling and solidification layer by layer. This unique structure then shows a strong anisotropy of mechanical properties and, as a result, their testing and print settings are very important. Tensile testing of plastic materials, including indicators of mechanical properties, are described in this thesis according to ČSN EN ISO standard. The practical part presents the concept of a device capable of performing these tests. The block diagram indicates the functional elements and the connections among them. Tensile strength test is described together with results processing. Necessary product documentation is also included.

Keywords

3D printing, FDM, filaments, tensile testing, test specimens, concept of tensile testing device

Bibliografická citace

JANIŠ, Adam. *Mechanické vlastnosti materiálů pro 3D tisk* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134516>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Petr Vyroubal.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Adam Janiš
VUT ID studenta: 186100
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2020/21
Téma závěrečné práce: Mechanické vlastnosti materiálů pro 3D tisk

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24. května 2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za poskytnutí možnosti pracovat na tématu blízkém mému zájmu a sdílení zkušeností ze zajímavé a praktické oblasti.

V Brně dne: 24. května 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD.....	11
1. CHARAKTERISTIKA 3D TISKU	12
1.1 FUSED DEPOSITION MODELING (FDM)	12
1.1.1 Princip.....	12
1.1.2 Typické vlastnosti výrobků.....	12
1.1.3 Příprava na tisk	15
1.1.4 Materiály pro FDM.....	15
1.2 STEREO LITOGRAFIE (SLA).....	17
2. OBLASTI VYUŽITÍ 3D TISKU.....	18
2.1 VZDĚLÁVÁNÍ.....	18
2.2 PRŮMYSL	18
2.3 LÉKAŘSTVÍ	19
3. MECHANICKÉ ZKOUŠKY PLASTOVÝCH MATERIÁLŮ.....	20
3.1 ZJIŠŤOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ POMOCÍ SOFTWARE	20
3.2 DEFORMACE PLASTŮ.....	20
3.3 TAHOVÉ ZKOUŠKY PLASTOVÝCH MATERIÁLŮ	21
4. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	24
5. KONCEPT ZAŘÍZENÍ NA TAHOVÉ ZKOUŠKY.....	25
5.1 PRINCIP FUNKCE.....	25
5.2 KONSTRUKČNÍ ČÁST	26
5.3 KUSOVNÍK	32
6. OBSLUHA ZAŘÍZENÍ A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	33
6.1 PARAMETRY TISKU.....	33
6.2 NEZBYTNÉ KROKY PŘED PRVNÍ ZKOUŠKOU	34
6.3 PŘÍPRAVA NA ZKOUŠKU A JEJÍ PRŮBĚH	35
6.4 SLEDOVÁNÍ POHYBU (MOTION TRACKING) V PROGRAMU BLENDER V2.87.7	39
6.5 PRÁCE V EXCELU A ZPRACOVÁNÍ DAT.....	41
7. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	42
7.1 PRUSAMENT PLA (1)	42
7.2 PRUSAMENT PETG (2).....	44
7.3 PRUSAMENT PETG (3).....	46
8. ZÁVĚR.....	48
LITERATURA	49
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Podávací systémy FDM tiskáren; vlevo typ bowden, vpravo typ direct [2]	12
Obrázek 1.2: Vzory 20% výplně; zleva: přímočará, mřížka, gyroid [3].....	13
Obrázek 1.3: Ilustrace přesahů vnějších perimetrů pro šířku extruze 0,4 mm a výšku vrstvy 0,2 mm při úhlu 45 °	14
Obrázek 1.4: Ilustrace přesahů vnějších perimetrů pro šířku extruze 0,4 mm a výšku vrstvy 0,2 mm při úhlu 30 °	14
Obrázek 3.1: Typické deformační křivky polymerů v tahu [20].....	21
Obrázek 3.2 Tvar zkušebních těles podle ISO 527-2 [23].....	23
Obrázek 4.1: Blokový diagram funkce celého zařízení	26
Obrázek 4.2 Sestava zařízení; Popisky odkazují na výkresy a stl soubory v elektronické příloze	27
Obrázek 4.3 Pohled do kleštin bez krytu	28
Obrázek 4.4 Vrchní část pevného uchycení	29
Obrázek 4.5 Vrchní část pevného uchycení a okraj posuvné části	29
Obrázek 4.6 Posuvná část	30
Obrázek 4.7 Uchycení zdroje, desky Arduino s Shield Ramps, AD převodníku a uživatelské rozhraní	31
Obrázek 6.1 Nalezení modulu s makrem	34
Obrázek 6.2 Adresy v makru	35
Obrázek 6.3 Zapnuté napájení zařízení	35
Obrázek 6.4 USB A-B kabel zapojený do zařízení	36
Obrázek 6.5 Ověření souběžnosti kleštin	37
Obrázek 6.6 Značky na zkušebním tělesu	37
Obrázek 6.7 Zkušební těleso v kleštinách	38
Obrázek 6.8 Ukázka označených hodnot v sériovém monitoru	39
Obrázek 6.9 Otevření záznamu ze zkoušky.....	39
Obrázek 6.10 Záznam připraven na sledování značek.....	40
Obrázek 6.11 Křivky sledování pohybu bodů při zkoušce	40
Obrázek 6.12 Vyhodnocení.xlsm po importu souřadnic	41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 Mechanické vlastnosti vytištěných zkušebních těles (filamenty a hodnoty od firmy Prusa Polymers a.s.) [6], [10], [11], [12]	16
Tabulka 5.1 Kusovník	32
Tabulka 6.1 Parametry tisku použité pro výrobu zkušebních těles	33
Tabulka 7.1 Naměřené mechanické vlastnosti Prusamentu PLA a modrou barvou označeny hodnoty z datasheetu [12].....	42
Tabulka 7.2 Naměřené mechanické vlastnosti Prusamentu PETG a modrou barvou označeny hodnoty z datasheetu [11].....	44
Tabulka 7.3 Naměřené mechanické vlastnosti Prusamentu PETG	46

ÚVOD

Technologie 3D tisku rozhodně není žádnou novinkou a je prozkoumávána již od poloviny minulého století. Existuje několik metod 3D tisku a tomu odpovídají vstupní materiály, které mohou být ve formě prášku, kapaliny nebo vlákna. V principu se jedná o aditivní metodu výroby, tzn. že materiál se nanáší po vrstvách tak, aby bylo dosaženo požadovaného tvaru výrobku. Jako materiál pro 3D tisk se nejčastěji používají různé druhy plastů, které jsou vybrány např. podle dostupné 3D tiskárny, nákladů, požadovaných vlastností výrobku atd. Plastové výtisky vyrobené touto technologií se vzhledem k jejich složení z jednotlivých vrstev vyznačují značnými anizotropními mechanickými vlastnostmi, které jsou ovlivněny použitým materiálem, typem 3D tiskárny, nastavením samotného tisku a okolními podmínkami.

V současné době jsou 3D tiskárny velmi populární i v oblastech netechnických, např. pro výrobu designových modelů. Pokud se ale od výrobků očekávají jisté mechanické vlastnosti, např. pevnost v tahu či tlaku, je zapotřebí počítat s těmito požadavky již při návrhu, výběru materiálu a nastavení parametrů tisku.

Tato práce v kapitole 1 ve stručnosti popisuje technologii 3D tisku se zaměřením na Fused Deposition Modeling (FDM), vlastnosti takto vyrobených produktů a nejčastěji používané materiály a uvádí krátké porovnání s další rozšířeným typem tisku, SLA (Stereolitografie). V kapitole 2 jsou uvedené oblasti použití 3D tiskáren různých typů. Tahové zkoušky plastových materiálů jsou podrobněji popsány v kapitole 3. Ve 4. kapitole je uveden koncept zařízení a popis konstrukční části. Příprava zkušebních těles je přiblížena v kapitole 5. Následuje dopodrobna popsána příprava na zkoušku, ovládání zařízení a zpracování hodnot v kapitole 6, na což plynule navazuje vyhodnocení získaných dat v kapitole 7.

Zařízení navržené v této práci nemíří na certifikované ověřování mechanických vlastností materiálů, ale má spíše sloužit k dostupnému zkoumání a porovnávání vlivu změn parametrů na výsledný objekt.

1. CHARAKTERISTIKA 3D TISKU

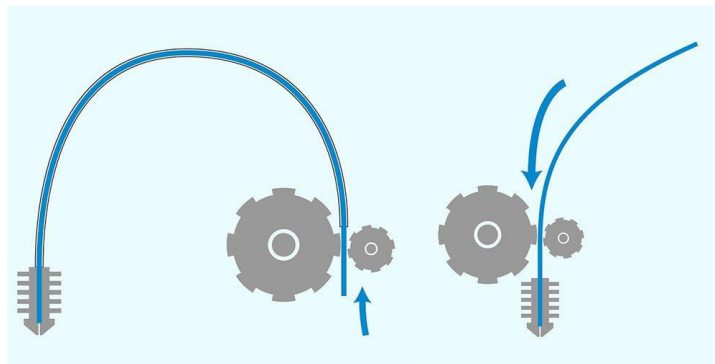
Pojem 3D tisk slučuje několik odlišných postupů výroby trojrozměrných modelů. Spojuje je společná vlastnost postupného vytváření jednotlivých vrstev daného modelu až do požadovaného tvaru. Odlišují se ale v mnoha ohledech, např. ve formě vstupního materiálu, což je přímo spjato s principem vytváření vrstev, a tedy i typem tiskárny.

1.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

Tato technologie stála u nedávného rozmachu využívání 3D tiskáren, jelikož princip jejich fungování není ve své podstatě složitý. Mezi hlavní výhody patří jejich uživatelská přívětivost, možnost výběru z široké škály tisknutelných materiálů, které lze měnit i při tisku jednoho výrobku, a také jejich kompaktnost a cena.

1.1.1 Princip

Tento proces je založen na vtahování materiálu v podobě vlákna (angl. filament) do tiskové hlavy, která jej nanáší podle programu. U většiny zařízení zajišťuje posuv v jedné ose pohyblivá tisková podložka a samotná hlava se pohybuje ve dvou zbývajících osách, ale v současnosti existuje velké množství rozdílných konfigurací. V trysce nacházející se v tiskové hlavě je materiál roztaven a pomocí pohybu neroztavené části vytlačován (extrudován) mimo ni. Podávací systém vstupního materiálu může být umístěn v samotné hlavě (přímý – direct), což zvyšuje její hmotnost, nebo mimo ni, kde je poté k navádění použita nejčastěji PTFE trubička (bowden). Na obrázku 1.1 jsou tyto dva případy znázorněny. Roztavený materiál je po opuštění trysky rychle ochlazen pomocí ventilátoru a teploty prostředí a přechází do pevné fáze [1].

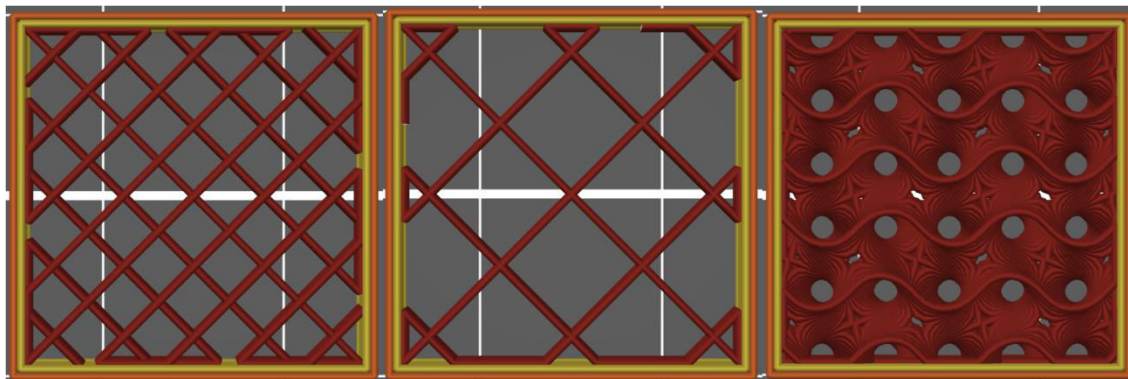


Obrázek 1.1: Podávací systémy FDM tiskáren; vlevo typ bowden, vpravo typ direct [2]

1.1.2 Typické vlastnosti výrobků

Jelikož je 3D tisk výroba aditivní, výsledné produkty nemívají v převážné většině plnou výplň, ale tato možnost tu je. Danou hustotu v rozmezí 0 až 100 % lze velmi snadno nastavit i upravit společně s jejím vzorem. Na obrázku 1.2 jsou zobrazeny základní typy při hustotě 20 %. Je patrné, že se liší vzhledem i stupněm provázanosti. Pozorovatelný rozdíl mezi přímočarou a mřížkovou je způsoben tím, že u té první uvedené je výplň nanášena pouze každou druhou vrstvou tisku, kdežto u té druhé je

mřížka tisknuta vždy. Ve skutečnosti mají tedy oba výrobky stejné množství výplně. Jako třetí příklad je vzor gyroid, který zajišťuje velké provázání, kdy se během tisku postupně mění směr nanášení, ale vlivem nepřímého pohybu trysky trvá proces déle [3].

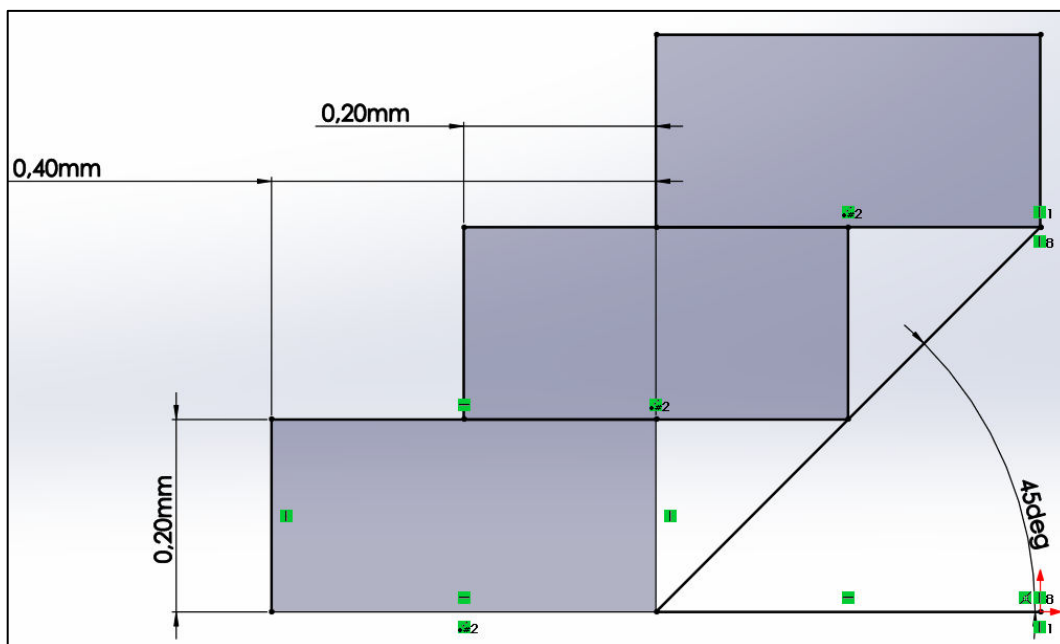


Obrázek 1.2: Vzory 20% výplně; zleva: přímočará, mřížka, gyroid [3]

Výplň je ohraničena perimetry, jejichž počet je vhodné nastavovat především podle průměru použité trysky. Ten nejběžnější je 0,4 mm, což společně s výškou vrstvy 0,2 mm poskytuje kompromis mezi rozlišením a délkou procesu. Podle požadavků lze ale použít i průměr 0,25 mm nebo 1 mm. Pro vyšší kvalitu a snazší tisk by se měly perimetry nanášet před výplní s tím, že ten vnější jako poslední. Rozlišuje se také počet horních a dolních plných vrstev, což záleží převážně na rozlišení v ose z, tedy výšce jedné vrstvy [3].

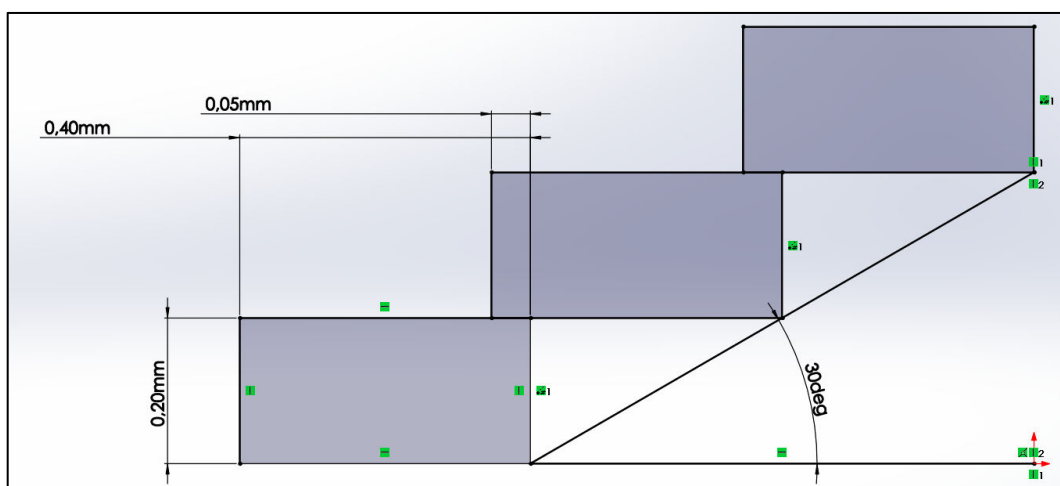
Jedno z největších úskalí 3D tisku je snížená kvalita či dokonce neschopnost výroby stěn svírající nízký úhel s podložkou (tzv. převisy). V tom případě se využívá generování podpěrné struktury, na kterou se materiál nanáší. Mezi kontaktní vrstvou podpěr a povrchem výrobku se ale musí běžně nacházet mezera (typicky 0,1 mm), aby mohlo dojít k jejich snadnému odlomení. V případě menší vzdálenosti dojde k nežádoucímu spojení materiálu a poškození povrchu, ale pokud je mezera větší, může docházet k tisku téměř do prázdna a jednotlivá vlákna nevytvoří souvislou vrstvu.

Na obrázku 1.3 je ilustrován velmi běžný případ tisku, tedy průměr trysky 0,4 mm a výška vrstvy 0,2 mm (zaoblení jednotlivých hran bylo pro zjednodušení zanedbáno). Tato konfigurace poskytuje kompromis mezi kvalitou tisku a jeho časovou náročností. V tomto případě lze pozorovat přesahy vrstev při sklonu stěny 45 °, který většinou nepředstavuje větší problémy. Polovina vnějších perimetrů, tedy 0,2 mm, je stále nanášena na spodní vrstvy.



Obrázek 1.3: Ilustrace přesahů vnějších perimetrů pro šířku extruze 0,4 mm a výšku vrstvy 0,2 mm při úhlu 45 °

Na obrázku 1.4 lze pozorovat problémy vyvstávající z nedostatečného přesahu mezi jednotlivými vrstvami, konkrétně pouze asi 0,05 mm při sklonu 30 °. To se přinejmenším projeví na kvalitě výrobku, v horším případě může dojít až k jeho nedokončení. Z tohoto důvodu je téměř vždy nezbytné tisknout vnější perimetry jako poslední, aby jim ty vnitřní sloužily jako určitá forma podpory. Při návrhu je vhodné kontrolovat tato problematická místa a nejlépe se jim vyvarovat. Určitým řešením malých přesahů může být také snížení výšky vrstvy.



Obrázek 1.4: Ilustrace přesahů vnějších perimetrů pro šířku extruze 0,4 mm a výšku vrstvy 0,2 mm při úhlu 30 °

1.1.3 Příprava na tisk

Samotnému tisku předchází několik kroků, které se liší svou náročností či nezbytností podle několika faktorů. Při prvním tisku nového produktu je vždy nutné použít typ softwaru obecně nazývaný slicer, do kterého se importuje požadovaný model ve formátu STL (Standard Triangle Language). Tento formát udává informaci pouze o povrchové geometrii modelu a téměř každý program zabývající se 3D modelováním je schopen exportu tohoto typu.

Pokud je potřeba model produktu nejprve vytvořit, nabízí se tři přístupy [4]:

- Objemové modelování – základní typ technického modelování, kdy dochází k přidávání či ubírání materiálu podle přesně zadaných parametrů. Použití především u modelů s jasnou a nepřiliš složitou geometrií
- Wireframe („drátěný model“) – vhodné pro designové modelování složitých prvků, kde jsou možné intuitivní úpravy geometrie na úkor přesnosti a schémat
- Povrchové modelování – použito u objektů, kde složitá geometrie hraje kritickou roli a jednotlivé segmenty povrchu na sebe musí dokonale navazovat

Ve sliceru je vždy nutné nastavit několik základních parametrů, jako je výška vrstvy a použitý materiál, a poté podle požadavků upravit i nespočet vedlejších parametrů. Po tzv. slicování (nařezání) je k dispozici náhled výrobku a informace o tisku. Mezi ty základní patří doba procesu a množství spotřebovaného materiálu v jednotkách hmotnosti či délky. Podle typu sliceru pak také např. kolik času zabere tisk jednotlivých částí výrobku (perimetrů, výplně, podpěr).

1.1.4 Materiály pro FDM

Pro tisk touto metodou se využívají termoplasty, jelikož poskytují možnost opakovaného zahřívání a ochlazování. Jednotlivé typy se odlišují výslednými vlastnostmi výrobku, zejména těmi mechanickými a tepelnou odolností, a také parametry při tisku. Lze zpracovávat i flexibilní materiály, za určitých podmínek i v kombinaci s těmi tuhými a vytvořit tak struktury pevné a zároveň v daných místech ohebné. Tiskové vlákno musí mít co nejstálější průměr (momentálně se nejčastěji používá průměr 1,75 mm s maximální tolerancí alespoň $\pm 0,05$ mm) v celé své délce, jelikož podle něj je určováno množství vytlačovaného materiálu.

Nejčastěji používaným materiálem byl ABS (akrylonitril-butadien-styren), u kterého se využívá zejména jeho odolnost proti nárazu, pevnost v tahu a tuhost. Tisk tohoto materiálu ale přináší jistá úskalí, zejména jeho významné smršťování po nanesení, což může vést k deformaci výrobku nebo jeho odloupení od tiskové podložky. Při využití ABS pro tisk objemnějších výrobků je tedy vhodné, a často i nezbytné, využít vyhřívanou podložku a ideálně i uzavřený prostor (tzv. enclosure) nebo skirt (tisknutý obrys kolem objektu většinou až do výše horní vrstvy), čímž se dosáhne stálé teploty a omezení smršťování [5].

Nástupcem ABS je materiál ASA (akrylonitril-styren-akrylát), který se vyznačuje podobnými mechanickými vlastnostmi jako ABS, ale na rozdíl od něj je odolný vůči UV záření. Zápach a VOC se během tisku také uvolňují, ale v menší míře a podstatnou výhodou je omezené, ale stále přítomné smršťování (hlavně u rozměrnějších výrobků). [6].

V současnosti se ve velké míře používá PLA (polymlečná kyselina), což je biorozložitelný materiál na bázi rostlinného škrobu, nejčastěji kukuřičného. To z něj činí jeden z ekologicky přívětivějších materiálů pro 3D tisk. Oproti ABS má nižší teplotu tání a díky tomu je tisk méně náročný a nepůsobí na něj v takové míře vlivy okolí. To ale znamená nižší tepelnou odolnost výrobku. Vzhledem k jeho vlastnostem se často používá pro aplikace, kde nedochází k přílišnému mechanickému a tepelnému namáhání a díky velkému výběru barev také pro designové prvky [7].

Určitým kompromisem mezi ABS a PLA je materiál PET-G (Polyethylentereftalát-glykol). V porovnání s PLA se PET-G vyznačuje vyšší mechanickou pevností, odolností proti UV záření a vyšší teplotou tání. Tisk je vzhledem k nižším teplotám jednodušší než u ABS, ale vyhřívanou podložku je přesto doporučeno použít a nedokonalosti ve výrobku jsou častější než u PLA. Provedení povrchové úpravy v podobě barev je u PET-G problematické, společně s lepením jednotlivých částí k sobě. Dále se může jednat o speciální typy materiálů, tedy nepříliš často používané a většinou dražší. Pro spíše designové kusy lze použít filament na bázi PLA s příměsí dřeva, mědi, bronzu a dalších, a po rozleštění povrchu dosáhnout autentického vzhledu. Některé materiály (např. ABS nebo PET) se dodávají s příměsí uhlíkového nebo para-amidového vlákna. Tyto filameny s sebou ale přináší komplikace týkající se tisku, jelikož částice příměsí se samozřejmě nerozpustí a je tedy vhodné použít větší průměr trysky a nejlépe také její tvrzený typ [8] [9].

V tabulce 1.1 jsou uvedeny konkrétní mechanické vlastnosti zkušebních těles vytištěných z filamentů od firmy Prusa Polymers a.s. Ty byly vybrány z důvodu jednotnosti zkoušek u stejného výrobce a vysoké kvality materiálu. Ve svém sortimentu nenabízí materiál ABS, ale hodnoty by měly být podobné jako u ASA, u kterého překvapivě dochází k dosažení meze kluzu při nejnižším napětí ze zkoumaných typů. Nejvyšší rázovou houževnatost vykazují filameny PET-G a PC Blend, u nichž je značení vysvětleno jako:

- NB (No Break – bez přerušeni)
- C (complete break – úplné přerušeni)

a údaj uvedený v závorkách je druhý nejčastější typ selhání. Filament PC Blend (polykarbonát) je novinkou firmy Prusa Polymers a.s. z roku 2020 a poskytuje vysokou pevnost, houževnatost a mechanickou a teplotní odolnost (až do 113 °C). Není na rozdíl od většiny tisknutelných materiálů hygroskopický a nemusí se tedy vysoušet [10].

Tabulka 1.1 Mechanické vlastnosti vytištěných zkušebních těles (filameny a hodnoty od firmy Prusa Polymers a.s.) [6], [10], [11], [12]

Vlastnosti	Jednotky	Typy filamentu			
		PLA	ASA	PET-G	PC Blend
Napětí na mezi kluzu	[MPa]	59,3 ± 1,9	45,0 ± 2,0	50,0 ± 1,0	63,0 ± 1,0
Modul pružnosti v tahu	[GPa]	2,4 ± 0,1	1,7 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,9 ± 0,1
Prodloužení na mezi kluzu	[%]	3,2 ± 0,1	3,8 ± 0,1	5,1 ± 0,1	5,8 ± 0,2
Rázová houževnatost Charpy	[KJ/m ²]	13,7 ± 0,7	38,0 ± 11,0	NB. (C)	NB

1.2 Stereolitografie (SLA)

Tato technologie 3D tisku se od FDM odlišuje v mnoha ohledech. Jako materiál pro tisk se používají různé typy fotopolymerů v tekuté formě, které se vrstvu po vrstvě vytvrzují pomocí UV záření. V tiskárnách tohoto typu se tedy nenachází pohyblivá tisková hlava, ale dochází pouze k pohybu tiskové podložky, která je orientovaná směrem dolů a z kapaliny se vynořuje. Na počátku rozvoje metody s vytvrzováním kapaliny se jako zdroj záření používal UV laser (SLS – Selective Laser Sintering), jehož paprsek je vychylován tak, aby vykreslil daný objekt a jeho vnitřní strukturu vrstvu po vrstvě. Jakmile ale začaly být dostupné LCD panely s dostatečně vysokým rozlišením, začala výroba zařízení, kde jsou jako zdroj záření použity právě tyto panely s UV LED [13].

SLA tiskárny jsou obecně schopné tisku s větším rozlišením ve všech osách než FDM tiskárny, ale převážně na úkor maximálních rozměrů výrobku. Práce s nimi již není tak uživatelsky přívětivá, jelikož dochází k manipulaci s kapalnou pryskyřicí (resinem), u čehož je potřeba dodržovat bezpečnostní zásady, zejména nasazené rukavice a ochranné brýle. Dále je také nezbytné podniknout dodatečné úpravy dokončeného výtisku, tzv. post-processing. Nejprve je nutné jej umýt v izopropyl alkoholu, aby došlo k odstranění zbytků nevytvrzené pryskyřice, a následně ještě celý objekt vytvrdit UV zářením, aby získal co nejlepší mechanické vlastnosti [13].

Na rozdíl od FDM technologie nelze během tisku vstupní materiály kombinovat, jelikož jsou nality v pracovním prostoru. Pohyb pouze v jedné ose ale umožňuje tisk i velmi tenkých vysokých částí, u kterých nenastává výchylka vlivem mechanického nanášení. S tím spojená značná výhoda je generování zcela rozdílné struktury tzv. stromových podpěr s velmi tenkými kontaktními hroty. Díky tomu je povrch esteticky přívětivější, je spotřebováno méně materiálu a odstranění podpěr po tisku je velmi jednoduché. Jelikož při procesu dochází k vytvrzení celé vrstvy naráz, výsledná doba procesu se odvíjí pouze od velikosti objektu v ose z [14].

2. OBLASTI VYUŽITÍ 3D TISKU

Technologie 3D tisku byla poprvé představena v osmdesátých letech minulého století a od té doby se značně vyvinula tak, že v mnohých odvětvích průmyslu patří k nepostradatelným pracovním nástrojům a v dalších se uplatňuje jako praktická pomůcka. I přesto, že v současné době nedokáže tato technologie nahradit subtraktivní metody a zcela obsadit velkovýrobu, bude zajímavé sledovat její vývoj a použití.

2.1 Vzdělávání

Jelikož se jedná o populární a perspektivní technologii, počet vzdělávacích institucí disponujících 3D tiskárnami stále roste. Tato zařízení jsou pak různými způsoby využívána ve výuce. Primárně to může být pro důkladné seznámení se s touto technologií, ale sloužit mohou také pro tvorbu učebních pomůcek. Možnost rychlého převedení návrhu na výrobek podporuje motivaci pro tvorbu a kreativitu. Na technických oborech samozřejmě slouží pro studentské práce, kde mohou značně zjednodušit návrh zařízení a snížit jeho náklady. V některých případech pak totiž není nutné vyhledávat a ohlížet se na prodávané a dostupné díly nebo zadávat výrobu externě, např. na obrábění.

Tisk názorných pomůcek může najít uplatnění ve velkém množství předmětů pro ilustraci a snazšímu pochopení probírané látky nebo k jejímu zatraktivnění. Mezi příklady se řadí topografické mapy nebo modely molekul a sloučenin [15].

2.2 Průmysl

V průmyslu se využívá velké množství rozdílných technologií 3D tisku, z nichž je často zastoupen tisk kovů, ale i plastové výrobky zde najdou uplatnění. Každá z technologií přináší určité výhody a mezi rozhodovací faktory patří tradičně náklady, které se dají rozložit na složitost procesu, čas tisku, počáteční investici atd. a vlastnosti výrobku, kde záleží např. na mechanických vlastnostech, odolnosti, povrchu a hmotnosti.

Mezi odvětví, kde v roce 1989 docházelo k prvnímu širšímu využívání technologie 3D tisku a které stojí za jejím pokrokem se řadí letectví a kosmonautika (aerospace) a armáda. Na tom mají podíl zejména velké společnosti uplatňující se v těchto odvětvích, např. General Electric Company (GE), Airbus nebo Boeing [16].

Nejdůležitějšími faktory podporující využití 3D tisku pro výrobu dílů pro letectví jsou snížení hmotnosti a spotřebování menšího množství materiálu. V těchto oblastech se využívá složitých dílů, které v případě výroby tradičními metodami musí být složeny z jednotlivých částí, ale u 3D tisku je možné jejich počet zredukovat až na jeden kus. Používané materiály jsou drahé a jedná se např. o slitiny niklu nebo titan, jehož vlastnosti kombinují nízkou hmotnost hliníku a pevnost oceli. Pro plastové výrobky se používají strojírenské termoplasty. V případě obrábění se v ceně za výrobek promítne i cena vstupního materiálu, jehož převážná část je ale poté odebrána. To je zde eliminováno, jelikož se využívá jen potřebné množství materiálu, nejčastěji ve formě prášku pro kov a vlákna pro plasty [16].

V automobilovém průmyslu zastupuje 3D tisk zejména funkci výroby prototypů, jelikož navržené díly je nutné nejprve ověřit a podrobit zkouškám, než se spustí

velkosériová výroba. Tímto způsobem jsou díly k dispozici brzy a levně, což ve výsledku může způsobit i větší míru experimentování s jednotlivými tvary a vlastnostmi produktů. Dosažená geometrie pak dosahuje vyšší komplexnosti a lze provést individuální přizpůsobení prvků podle požadavků zákazníka [16].

Konkrétním příkladem využití FDM tiskáren pro sériovou výrobu je tisková farma firmy Prusa Research v Praze, ve které dochází k výrobě dílů na jimi prodávaná zařízení. V roce 2019 obsahovala 500 tiskáren určených pouze k tomuto účelu. Obecnou výhodou tohoto přístupu je možnost produkce komplexnějších tvarů a také jejich rychlé úpravy než např. u vstřikování. U této firmy je ale jejich využití jedinečné v tom, že tím dochází k důkladnému testování jejich produktu při výrobě dalších. Jelikož tiskárny pracují nepřetržitě, případné nedostatky a problémy hardwaru nebo softwaru mají vyšší pravděpodobnost se projevit a mohou být vyřešeny [17].

2.3 Lékařství

Využití v lékařství spoléhá na vytvoření individuálních implantátů o rozměrech určených přesně podle potřeb pacienta. V zubním lékařství dochází k naskenování ústní dutiny a následného tisku korunek a můstků. V případě implantátů je pomocí specializovaného softwaru vytvořen model celé dutiny a je možné vygenerovat tvar naváděcího dílu, který během operace naznačuje ideální místo k jednotlivým zákrokům. U tisku kolenních a kyčelních náhrad se dosahuje skvělých výsledků, jelikož tvar a rozměry jsou optimální, ale také lze vytvořit určitý typ porézní struktury podobné kosti.

Z důvodu vysoké přesnosti a malých rozměrů produktu se FDM tisk v lékařství nepoužívá, ale nahrazuje jej především SLA [16].

3. MECHANICKÉ ZKOUŠKY PLASTOVÝCH MATERIÁLŮ

Nedílnou součástí vývoje a výroby materiálů a dílů jsou mechanické zkoušky, které slouží k určení jejich vlastností a ověření budoucí funkčnosti celku. Cílem je také zajištění bezpečnosti při provozu a vytvoření návrhu tak, aby byl efektivní a výhodný na výrobu. Proces testování může být nákladný a zdlouhavý, ale v dlouhodobém měřítku se náklady na něj vynaložené navrátí v podobě nižšího počtu defektů, efektivnější výroby a delší životnosti a s tím spojené prestiže a zvýšeného odběru.

3.1 Zjišťování mechanických vlastností pomocí softwaru

Při návrhu modelu jsou využívány softwarové nástroje poskytující data o rizikových a namáhaných částech, podle kterých jsou poté provedeny úpravy. Často ale tyto nástroje neposkytují přesná data např. z důvodu vývoje nových materiálů nebo nedostupnosti hodnot jednotlivých ukazatelů. Konkrétním příkladem může být metoda výroby technologií 3D tisku, kde vrstevnatá struktura výrobku vykazuje vysokou anizotropii mechanických vlastností. V takových případech se poté data získaná z fyzických testů přenesou do simulačního softwaru a ověří se, zda nyní korespondují reálné výsledky s těmi vypočtenými. Tím se zvýší přesnost nástrojů a při návrhu dalších modelů založených na podobném principu je možné se na ně více spoléhat [18].

Pokud je účelem této zkoušky praktické ověření konkrétního výrobku a správné nastavení simulačního programu, nemusí jeho rozměry a tvar podléhat testovacím normám.

3.2 Deformace plastů

K určité formě deformace neboli změně tvaru nebo rozměrů vlivem působení vnější síly dochází u materiálů v rozdílné míře. Obecně se rozlišují její dva základní typy podle důsledků na strukturu materiálu:

- Pružná (elastická) deformace nastává, pokud se těleso po odebrání vnějších sil navrátí do svého původního tvaru.
- Trvalá (plastická) deformace způsobuje trvalé změny ve struktuře materiálu a tím vzniká jeho poškození.

Deformační křivka plastových materiálů obsahuje složky obou typů, kdy na jejím začátku platí lineární závislost prodloužení na deformaci a ta je tedy přímo úměrná působící síle (tzv. Hookův zákon). Důsledkem plastické deformace je vytvoření tzv. krčku na zkušebním tělesu, kde dochází ke snížení jeho průměru v nenamáhaných osách, tedy těch příčných [19].

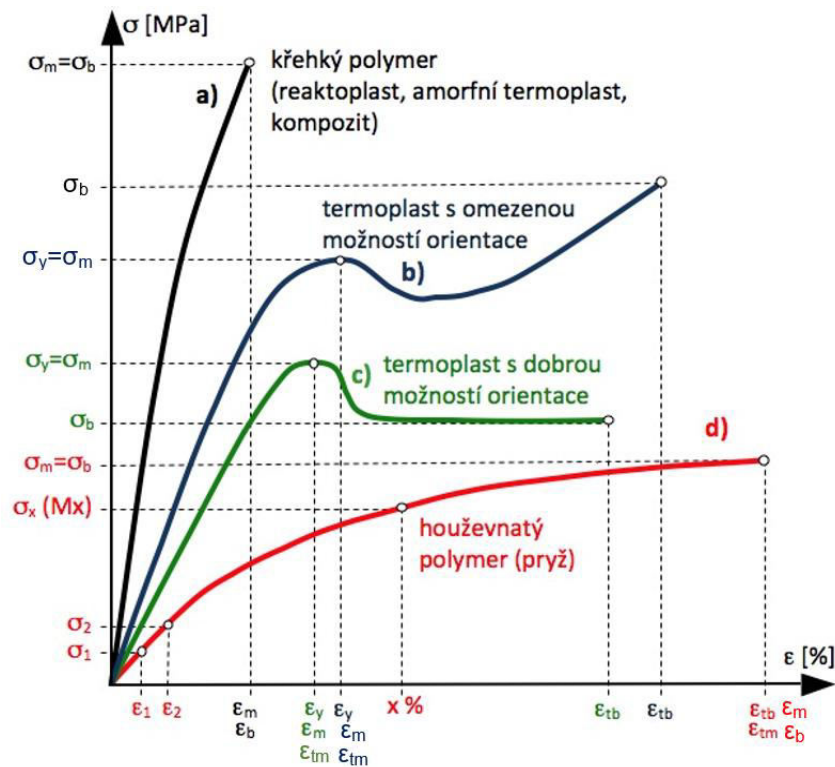
Dále se také vyskytuje deformace zpožděně elastická (viskoelastická), která je patrná zejména u houževnatých plastů. Po vystavení konstantnímu mechanickému napětí dochází u tělesa k deformaci, jejíž rychlost postupně klesá. Jedná se o tzv. tečení za studena neboli kríp (z angl. creep). Hodnota mechanického napětí potřebného k udržení určité deformace se pak také snižuje vlivem zpoždění, tzv. relaxace napětí.

Snaha tělesa o návrat do původního stavu se nazývá elastické zotavení nebo zpětný kríp [19].

3.3 Tahové zkoušky plastových materiálů

Tyto zkoušky slouží ke stanovení tahových vlastností plastů a výstupem jsou různé ukazatele získané podle hodnot zatížení a prodloužení zkušebních těles. V České republice se nyní řídí podle normy ČSN EN ISO 527-1 vydání duben 2020 [20].

Během zkoušky dochází k protahování zkušebního tělesa za konstantní teploty do jeho porušení nebo do dosažení předem zvolených hodnot zatížení nebo prodloužení. Těleso musí být namáháno ve směru jeho hlavní podélné osy konstantní zkušební rychlostí. Po zpracování dat je výstupem deformační křivka, tedy závislost poměrného prodloužení na mechanickém napětí. Její typické příklady jsou uvedeny na obrázku 3.1. Na ose x je značeno poměrné prodloužení ϵ v procentech a na ose y napětí σ v jednotkách MPa [19] [20].



Obrázek 3.1: Typické deformační křivky polymerů v tahu [20]

Hodnoty napětí σ potřebné k vytvoření deformační křivky se obecně vypočtou podle vztahu

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ [MPa]}, \quad (3.1)$$

kde F [N] je síla působící na zkušební těleso a A [mm²] je jeho průřezu kolmý k ose namáhání [20].

Napětí na mezi kluzu σ_y značí hodnotu, po jejímž překročení nenastávají pouze elastické deformace, ale začínají se značně projevovat i ty trvalé ve formě vzniku krčku, který se s rostoucím napětím dále prodlužuje a zužuje. Při pracovním provozu by se tato hodnota neměla přesahovat. Na ose x jí odpovídá **poměrné prodloužení na mezi kluzu ε_y** a jeho poloha je určena podle bodu, kde poprvé dochází k protažení zkušebního tělesa bez zvýšení napětí. **Mez pevnosti σ_m** označuje napětí, kde se v průběhu tahové zkoušky objeví první lokální maximum. Stejně jak v předchozím případě je k ukazateli odvozeno **poměrné prodloužení na mezi pevnosti ε_m** [20].

Napětí při přetržení σ_b , jak už název napovídá, je nejvyšší hodnota naměřeného napětí, po jejímž poklesu je zahájeno trhání zkušebního tělesa. Opět mu odpovídá hodnota **poměrného prodloužení při přetržení ε_b** . Posledním hlavním údajem na svislé ose je **napětí při x % prodloužení σ_x** a jedná se o bod, ve kterém dosáhne prodloužení zadané hodnoty. Toho se využívá např. pokud křivka nevykazuje mez kluzu [20].

Jednotlivé hodnoty ukazatelů deformace i napětí se v deformační křivce překrývají podle vlastností materiálu, např. v křivce a platí, že $\sigma_m = \sigma_b$.

Modul pružnosti v tahu (tahový modul) E_t je důležitou charakteristikou a popisuje tuhost materiálu, která roste s hodnotou modulu. Jedná se o směrnici deformační křivky v intervalu mezi dvěma poměrnými prodlouženími $\varepsilon_1(0,05 \%) = 0,0005$ a $\varepsilon_2(0,25 \%) = 0,0025$. Po odečtení odpovídajících hodnot napětí σ_1 a σ_2 lze pak modul snadno vypočítat podle vztahu

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \text{ [MPa] [20].} \quad (3.2)$$

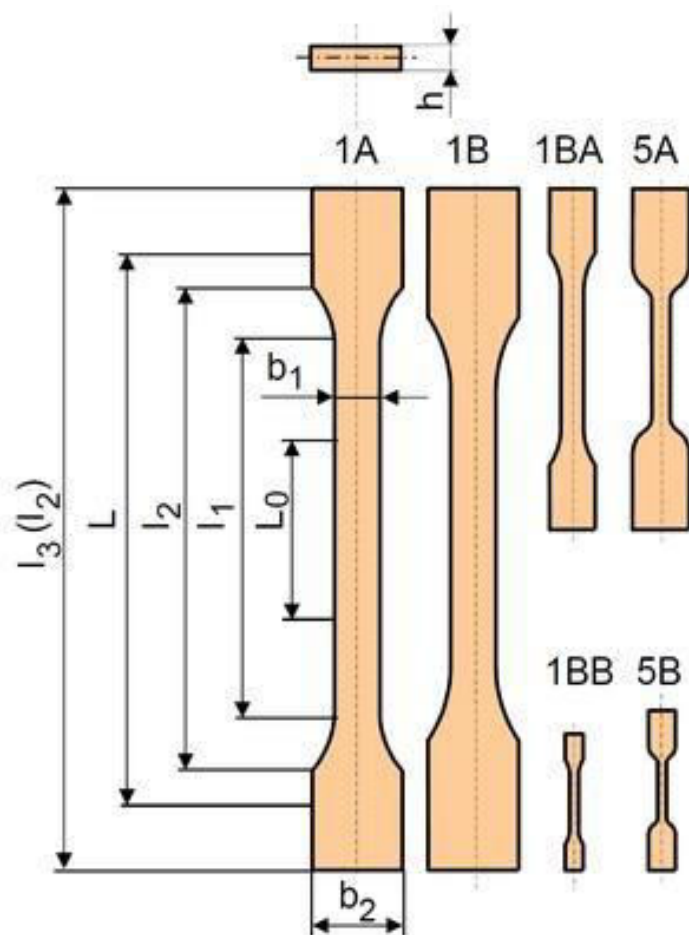
Tvary křivek na obrázku 3.1 se liší zejména podle materiálu a průběhu zkoušky [21]:

- Křehký materiál, jehož křivka nevykazuje mez kluzu a k přetržení dochází při nízkých poměrných prodlouženích. Jedná se např. o reaktoplast nebo amorfni termoplast.
- Materiál s mezí kluzu (termoplast s omezenou možností orientace makromolekul) a průběh zkoušky takový, kdy se napětí po dosažení meze kluzu stále zvětšuje.
- Rozdílný tvar křivky před mezí kluzu než v případě b je způsoben materiálem (termoplast s dobrou možností orientace makromolekul), ale po dosažení meze kluzu je již napětí konstantní.
- Jedná se o houževnaté materiály, např. pryž, které vykazují poškození až při vyšších poměrných prodlouženích a nemají mez kluzu.

Na obrázku 3.2 jsou ilustrovány tvary zkušebních těles podle normy ČSN EN ISO 527-2 vydání říjen 2012. Z důvodu zákazu rozšiřování technických norem jsou uvedeny bez konkrétních hodnot rozměrů. Mají tvar oboustranných lopatek a vhodný typ se liší podle technologie výroby a účelu nebo možností zkoušky. Rozměry jsou doporučené

nebo dané včetně tolerancí. L_0 je počáteční měřená délka, z jejíž deformace se určuje poměrné prodloužení ε [22].

L značí počáteční vzdálenost mezi čelistmi a z její změny během zkoušky lze určit **jmenovité poměrné prodloužení** ε_t , které v určitých případech může nahradit poměrné prodloužení ε , které je obtížné zaznamenávat např. u malých vzorků. Průřez tělesa se počítá v jeho zúžené části, tedy podle hodnot b_1 a h [22].



Obrázek 3.2 Tvar zkušebních těles podle ISO 527-2 [23]

4. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

V první části této práci byly popsány základy 3D tisku a vlastnosti objektů vyrobených touto metodou. Tím se uvedla daná problematika a nastínila se potřeba mít k dispozici zařízení schopné dostupně vykonávat zkoušky těchto vlastností u produktů tisknutými s rozdílnými parametry. Cílem práce je ověření funkce zařízení formou úspěšně vykonaných tahových zkoušek a vyhodnocením získaných hodnot. Nejprve bude nutné popsat zařízení z hlediska jeho funkce a nezbytných elektronických prvků. Tato část bude řešena pomocí blokového schéma s jejich vzájemným propojením. Následovat bude vytvoření návrhu konstrukčního řešení zařízení, k čemuž bude využit program SolidWorks. Návrh bude obsahovat všechny použité konstrukční prvky a v co největší míře zohlední využití 3D tiskárny pro výrobu dílů, které budou navrženy tak, aby splňovaly požadavky na pevnost a funkčnost.

Důležitou součástí této práce bude podrobný popis přípravy na zkoušku, jejího průběhu i zpracování dat a jejich vyhodnocení. Vše bude v co největší míře zautomatizováno pomocí skriptů a maker tak, aby se vyvážila jakákoliv nutnost manuální zásahu při průběh zkoušky. Na závěr proběhne několik zkoušek, které ověří správnou funkci a odolnost zařízení.

Cílem je, aby zařízení poskytovalo odpovídající hodnoty, bylo uživatelsky co nejpřívětivější, bylo mechanicky odolné a aby nedocházelo k degradaci tisknutých dílů. Přidanou hodnotou bude tzv. modulárnost zařízení, tedy možnost jednoduše nahrazovat jednotlivé prvky ať už kvůli poškození či pořízení nebo vyrobení vhodnějších pro danou zkoušku.

5. KONCEPT ZAŘÍZENÍ NA TAHOVÉ ZKOUŠKY

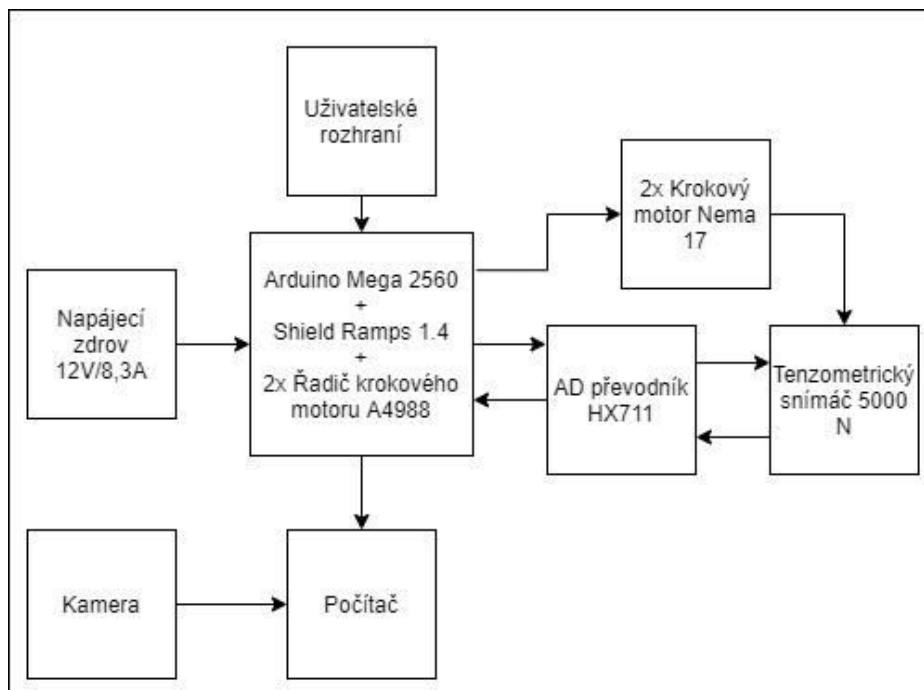
V této kapitole je popsán koncept zařízení a typ základních komponent potřebných k jeho funkci.

5.1 Princip funkce

Obrázek 4.1 znázorňuje blokové schéma základních částí. Pro zpracování signálu z uživatelského rozhraní slouží deska Arduino Mega 2560 (procesní jednotka). Ta detekuje stisk jednoho ze dvou tlačítek nebo přepnutí spínače. Na desku je nasazen tzv. Shield Ramps 1.4, který se běžně používá ve 3D tiskárnách. Všechny piny z Arduina jsou vyvedeny na vnější stranu shieldu a jsou tedy dostupné. Značnou výhodou, která rozhodla pro použití shieldu jsou zabudované sloty pro řadiče krokových motorů, které řídí jejich spínání a směr otáčení. Ramps má také konektor pro napájení ze zdroje, bez kterého by nebylo možné dodávat motorům dostatečný proud nezbytný pro jejich funkci.

Krokové motory otáčejí závitovými tyčemi, čímž je zajištěn pohyb posuvné části zařízení s tenzometrickým snímačem. Mezi ním a deskou Arduino je zapojen AD převodník. Zkušební těleso je pomocí kleštin uchyceno na jedné straně k této posuvné části a na té druhé k pevnému rámu. Jak se část se snímačem pohybuje směrem vzhůru, je snímána tahová síla působící na těleso.

Vzhledem k nedostupnosti a ceně extenzometru je poměrné prodloužení tělesa zjišťováno pomocí kamerového záznamu pořízeného během zkoušky. Na povrchu tělesa jsou nanесeny značky, jejichž vzájemná vzdálenost na každém snímku je poté zjištěna pomocí programu Blender a jeho funkce *motion tracking* (sledování pohybu). Tyto údaje slouží pro určení poměrného prodloužení tělesa a není tedy nutné pracovat s konkrétními jednotkami, což by u záznamu bylo problematické.

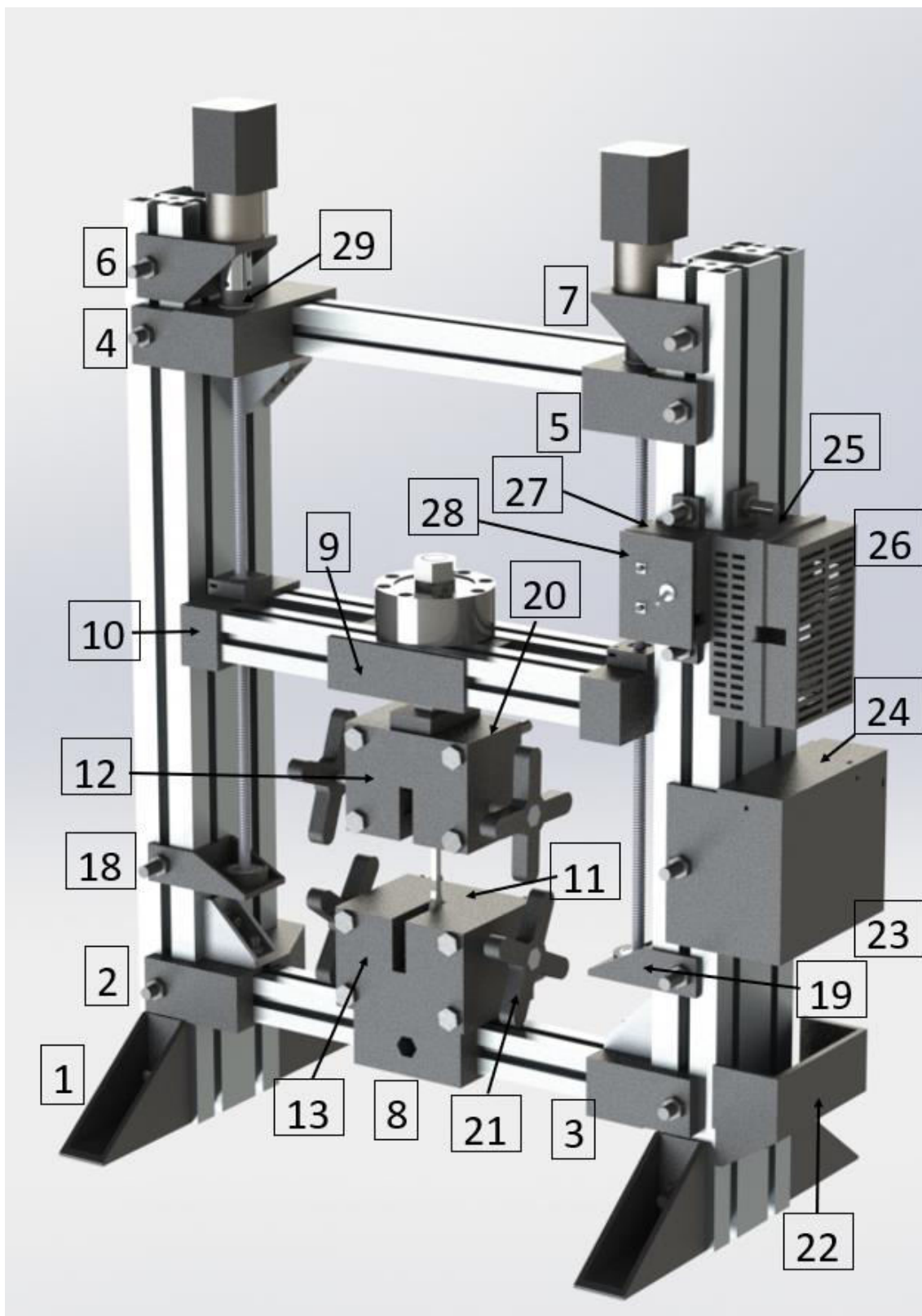


Obrázek 5.1: Blokový diagram funkce celého zařízení

Z těchto důvodů probíhá vyhodnocování dat z velké části manuálně. Je nutné využít software Arduino IDE pro zaznamenávání hodnot působící síly, Blender na určení poměrného prodloužení a Excel pro finální zpracování.

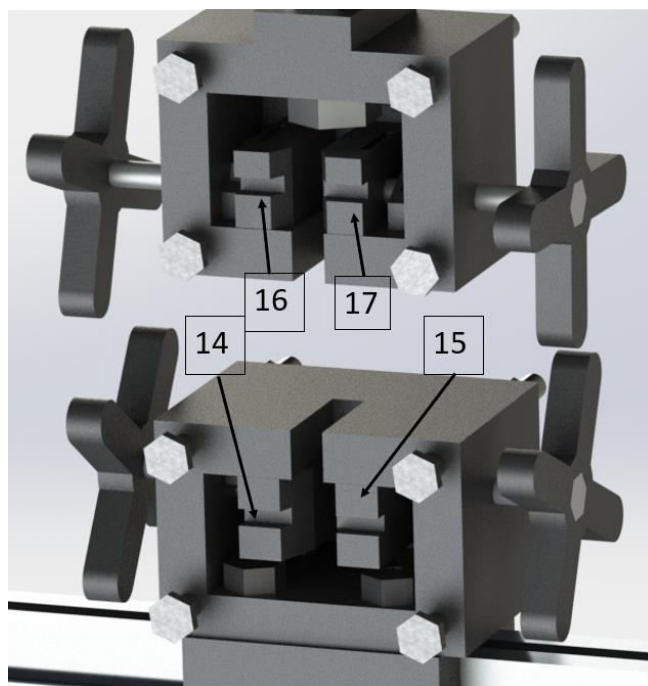
5.2 Konstrukční část

Pro návrh dílů a sestavy byl použit program SolidWorks. Obrázek 4.2 znázorňuje celou sestavu zařízení. Číselné popisky odkazují na jednotlivé výkresy tisknutých dílů, které jsou dostupné v elektronické příloze společně s jejich stl soubory. Komponenty se dělí na čtyři hlavní skupiny, a to spojovací materiál v podobě šroubů a matic, 3D tisknuté díly černé barvy, hliníkové profily různých velikostí a funkční díly v podobě krokových motorů, tenzometrického snímače a AD převodníku. Při konstrukci byla v co největší míře upotřebena 3D tiskárna na výrobu dílů na míru. Zatěžované díly obsahují 80% výplň a byly navrženy tak, aby je bylo možné vytisknout v takové orientaci, aby směr působící síly byl kolmý na jednotlivé vrstvy a nedocházelo k jejich delaminaci. Tímto způsobem byla zajištěna jejich dostatečná pevnost. Všechny použité hliníkové profily mají drážky o takových rozměrech, že do nich šestihřanné šrouby M8 o standardní velikosti hlavy pro klíč 13 mm zapadnou a neprotočí se. Tímto způsobem je tedy řešeno uchycení všech tisknutých dílů.



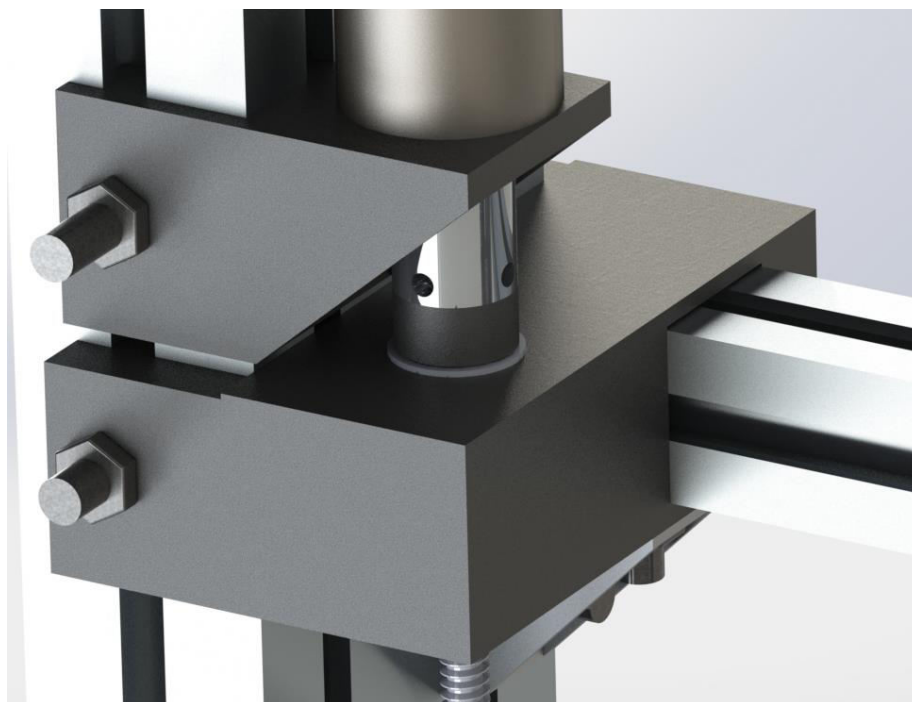
Obrázek 5.2 Sestava zařízení; Popisky odkazují na výkresy a stl soubory v elektronické příloze

Na obrázku 4.3 je uveden pohled do kleštin bez krytu. Skrz otvory po stranách jsou přivedeny šrouby na jejichž vnějších koncích se nachází ručky pro dotahování zkušebního tělesa. Na vnitřních stranách otvorů jsou zdířky pro matice, které do nich zapadnou. Tím je zajištěn posuv šroubu při jeho otáčení. Ten pak uvnitř tlačí na posuvné části, ve kterých jsou zdířky na umístění kovových podložek, které brání opotřebení plastu od šroubů. Šířka posuvných částí je co největší a působící síla se tedy rozloží na větší ploše a co nejbliže ke stěnám. Vrchní kleštiny jsou k tenzometrickému snímači připevněny pomocí na zakázku vyrobeného celozávitového šroubu bez hlavy M16 se stoupáním 1,5 mm, což odpovídá vnitřnímu závitů snímače. Spodní kleštiny jsou k hliníkovému profilu připevněny přes pomocný díl, aby jejich případná výměna např. za jiný typ byla snadná a rychlá a zařízení nemuselo být rozebíráno. Na tyto díly jsou kladeny vysoké nároky z hlediska pevnosti a mají tudíž 80% výplň a stěny o tloušťce 15 mm.



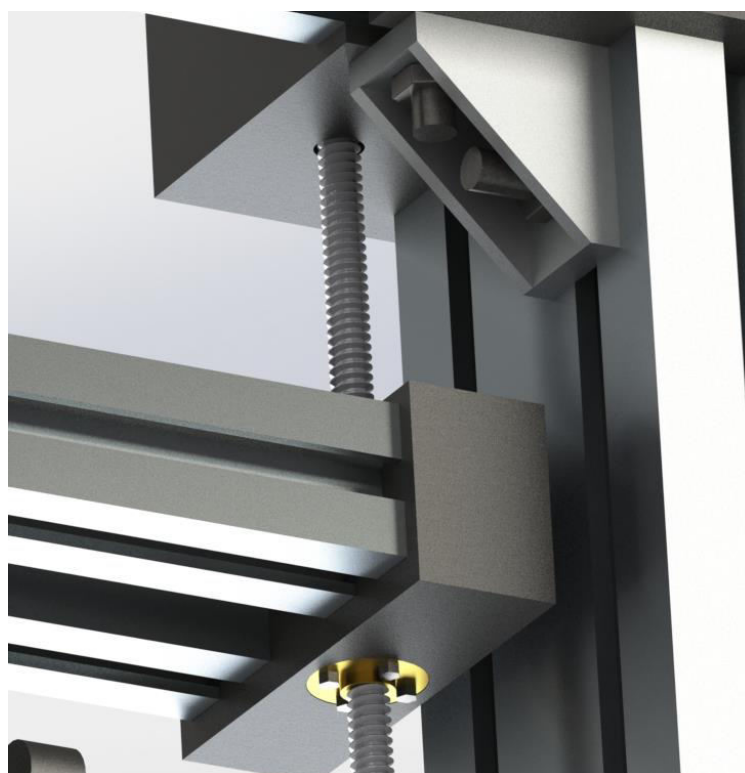
Obrázek 5.3 Pohled do kleštin bez krytu; Popisky odkazují na výkresy a stl soubory v elektronické příloze

Obrázek 4.4 přibližuje způsob uchycení motoru, závitové tyče a horizontálního profilu k tomu vertikálnímu. Vrchní díl, ke kterému je přišroubován krokový motor není při zkoušce vystaven žádné síle, a tudíž jsou jeho rozměry minimální. Tyč je s motorem spojena hřídelovou spojkou s vnitřním průměrem 8 mm. Mezi zatěžované díly patří všechny ty, co spojují horizontální a vertikální profily, proto mají širší uchycení a vyšší výplň. Spojovací díl na obrázku má ve vrchní části otvoru pro závitovou tyč navíc rozšířenou oblast pro uložení kuličkového ložiska, na které pak síla působí. Mezi hřídelovou spojkou a ložiskem se nachází vložka, která je na spodní straně zúžená tak, aby byla v kontaktu pouze s vnitřní částí daného ložiska.



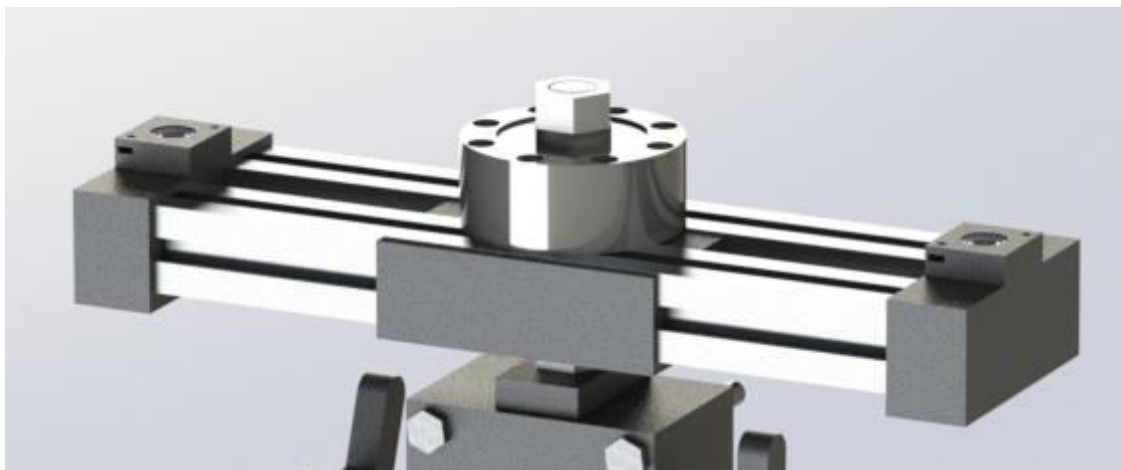
Obrázek 5.4 Vrchní část pevného uchycení

Na obrázku 4.5 lze vidět spodní stranu vrchního pevného uchycení, které je pro větší spolehlivost podepřeno kovovou vzpěrou. Pohyb posuvné části zajišťuje závitová tyč a přišroubovaná mosazná trapézová matice.



Obrázek 5.5 Vrchní část pevného uchycení a okraj posuvné části

Posuvná část je uvedena na obrázku 4.6. Základem jsou dva hliníkové profily, ke kterým je pomocí dvou šroubů a tištěného dílu připevněn tenzometrický snímač. Krajní díly slouží pro vedení závitových tyčí, umístění trapézových matic a v horní části také lineárních ložisek. Středem snímače vede již zmíněný celozávitový šroub, který je nahoře proti protáčení zajištěn jednou maticí a samotné kleštiny jsou uchyceny mezi další dvě.



Obrázek 5.6 Posuvná část

Na obrázku 4.7 je znázorněna pravá strana zařízení s uchycením pro všechny zbývající komponenty a periferie. Všechny z těchto dílů jsou odnímatelné bez nutnosti rozebírat jakoukoliv jinou část zařízení. Spodní dva díly sloužící k uchycení zdroje jsou rozděleny z důvodu jeho chlazení. Mřížkovaná krabice pro desku Arduino s Shield Ramps a AD převodník je rozdělena na spodní část a víko a umožňuje chlazení jak desky vespuďu tak řadičů krokových motorů nahoře. Ve vhodných místech jsou otvory pro vyvedení kabeláže k motorům, snímači a uživatelskému rozhraní. To je umístěno na přední straně a sestává ze dvou tlačítek a spínače.

Všech 29 technických výkresů a stl souborů navržených dílů je přiloženo v elektronické příloze.



Obrázek 5.7 Uchycení zdroje, desky Arduino s Shield Ramps, AD převodníku a uživatelské rozhraní

5.3 Kusovník

V tabulce 1.1 je uveden podrobný seznam všech použitých komponent pro výrobu zařízení, jak mechanických, tak elektronických, společně s cenou za jednotku, množstvím a celkovou cenou zařízení.

Tabulka 5.1 Kusovník

Položka	Počet jednotek	Cena za jednotku	Celková cena
	[-]	Kč	Kč
Arduino Mega 2560	1	830	830
Shield Ramps 1.4	1	170	170
Řadič krokového motoru A4988	2	50	100
AD převodník HX711	1	30	30
Tenzometrický snímač DYLF-102	1	1250	1250
Krokový motor Nema 17, převod 14:1	2	650	1300
Napájecí zdroj LYONZG S-100-12	1	380	380
Napájecí kabel	1	90	90
Síťový napájecí konektor	1	35	35
Kolébkový síťový přepínač	1	32	32
Pružná hřídelová spojka 8 mm - 8 mm	2	40	80
Dvojitý hliníkový rám 400 mm	2	250	500
Hliníkový profil 30x30 mm, 320 mm	4	70	280
Závitová tyč d8 T2 400 mm	2	160	320
Trapézová matice d8 T2	2	29	58
Špulka PLA filamentu, 1 kg	2,5	400	1000
Šroub M8x30	27	1,7	45,9
Šroub M8x25	8	1,6	12,8
Šroub M8x50	2	2	4
Šroub M8x60	2	2	4
Šroub M8x80	4	2	8
Šroub M8x100	4	2	8
Matice M8	47	0,5	23,5
Podložka pod maticí M8	47	0,5	23,5
Šroub M10x60	4	2	8
Matice M10	4	2	8
Podložka pod maticí M10	4	1	4
Celozávitový šroub M16x330, stoupání 1,5 mm	1	150	150
Matice M16x1,5	3	4	12
Lineární kuličkové ložisko	2	40	80
Kuličkové ložisko	2	20	40
Spojovací hliníkový roh	4	40	160
Propojovací vodiče	15	1	15
Celkem	207		7065

6. OBSLUHA ZAŘÍZENÍ A ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole je podrobně popsán postup při přípravě na zkoušku i její samotný průběh společně se zpracováním získaných hodnot na počítači.

6.1 Parametry tisku

Před samotnou tahovou zkouškou je nezbytné vytisknout zkušební těleso, jehož parametry se mohou lišit v mnoha ohledech. Vzhledem k vlastnostem 3D tisku se určuje velké množství perimetrů v neposlední řadě také rozměry tělesa dané normou. Pro odzkoušení funkčnosti zařízení bylo vybráno těleso typu 1BA, jehož rozměry lze vyhledat v normě ČSN EN ISO 527-2. Jedná se o těleso se sníženým průřezem 20 mm².

Jednotlivé parametry tisku lze rozdělit na dvě hlavní skupiny, a to parametry tělesa a nastavení tisku. V této práci byly testovány materiály PLA a PETG, které se liší požadovanou teplotou trysky a podložky z důvodu rozdílné teploty tání. Jednotlivé parametry jsou uvedeny v tabulce 5.1. Na slicování byl použit program PrusaSlicer-2.3.0-beta2 a neuvedené parametry zůstaly nezměněny ve vybraném nastavení „0.20mm SPEED“.

Tabulka 6.1 Parametry tisku použité pro výrobu zkušebních těles

Parametry tisku		PLA (1)	PETG (2)	PETG (3)
Výška vrstvy	[mm]	0,2	0,2	0,2
Horní plné vrstvy	[-]	0	0	5
Dolní plné vrstvy	[-]	0	0	4
Hustota výplně	[%]	100	100	20
Typ výplně	[-]	přímočará	přímočará	mřížka
Rychlost tisku výplně	[mm/s]	200	100	200
Teplota extruderu	[°C]	215	260	250
Teplota podložky	[°C]	60	90	90
Orientace	[-]	horizontální	horizontální	horizontální

Tento program také umožňuje nastavení pro úpravu horní vrstvy objektu, tzv. ironing. Při jeho zapnutí dojde po klasickém dokončení horní vrstvy k jejímu vyhlazení pomocí dodatečného přejezdu trysky ve stejné výšce, která tiskne malé množství materiálu (standardně 15 %). V tomto případě je tato funkce velmi vhodná z toho důvodu, že běžně jsou horní vrstvy tisknutých objektů nerovné a měření jejich výšky, a tedy i průřezu je nepřesné. Např. při přípravě vzorků pro tuto práci se tělesa s požadovanou výškou 4 mm běžně dostávala na hodnotu 4,25 mm po tisku. Při bližším pohledu bylo ale zřejmé, že posuvné měřítko se dotýká pouze nejvyšších nerovností. Po

použití funkce ironing se výška snížila na 4,1 mm a rovnost horní vrstvy je téměř totožná s tou spodní a tím se velmi zpřesňuje určení průřezu každého tělesa.

6.2 Nezbytné kroky před první zkouškou

Zde jsou uvedeny kroky, které je nutné provést pouze před prvním použitím zařízení s novým počítačem. Jedná se o instalaci pomocných programů, přípravu složky na data a nastavení adresy na ukládání hodnot.

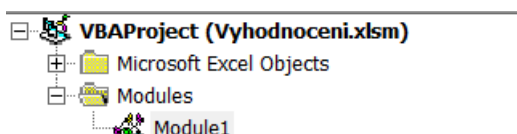
Kromě programu Excel je potřeba mít k dispozici software Arduino IDE, který je přenosný a není potřeba instalace a software Blender (v této práci byla použita verze 2.82.7).

K ovládání AD převodníku HX711 je potřeba nainstalovat knihovnu v programu Arduino IDE:

1. Otevřít Arduino IDE
2. Klávesovou zkratkou *Ctrl+Shift+I* otevřít záložku Spravovat knihovny. Případně přes Nástroje → Spravovat knihovny
3. Vyhledat „HX711 Arduino Library“ a zvolit „Instalace“

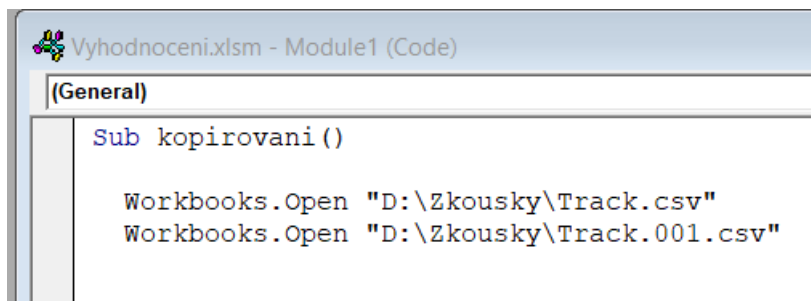
Nastavení nové adresy cílové složky pro soubory s hodnotami prodloužení:

1. Při vyhodnocování dat v programu Blender bude později potřeba exportovat hodnoty z něj do souborů s příponou .csv (Textový soubor s oddělovači Microsoft Excelu). Postup pro nastavení adresy požadované složky je následující:
 - a. Lokalizovat poskytnutý soubor „exportDoCSV.py“.
 - b. Otevřít v poznámkovém bloku.
 - c. Na pátém řádku nahradit adresu 'D:/Zkousky/{0}.csv' tou požadovanou (v původním tvaru se soubory .csv ukládají do složky „Zkousky“ a znak {0} je nutné zachovat).
2. Hodnoty z těchto souborů se poté exportují do hlavního souboru Vyhodnoceni.xlsm pomocí makra, ve kterém je opět potřeba nahradit cílovou adresu, a to tímto způsobem:
 - a. Lokalizovat a otevřít soubor Vyhodnoceni.xlsm
 - b. Stisknutím klávesové zkratky *ALT + F11* otevřít Microsoft Visual Basic for Applications
 - c. V levém horním rohu rozkliknout VBAProject (Vyhodnoceni.xlsm) → Modules → Module1, jak naznačuje obrázek 6.1



Obrázek 6.1 Nalezení modulu s makrem

d. V horní části kódu (jak ukazuje obrázek 6.2) přepsat v obou případech adresu na tu zvolenou v bodě 1.c a názvy Track.csv a Track.001.csv musí být nezměněny.



```
Sub kopirovani ()  
  
    Workbooks.Open "D:\Zkousky\Track.csv"  
    Workbooks.Open "D:\Zkousky\Track.001.csv"
```

Obrázek 6.2 Adresy v makru

e. Soubor Vyhodnoceni.xlsm lze uložit pouze pomocí „Uložit jako“, aby nedocházelo k jeho náhodnému přepsání. Případné odebrání této funkce lze provést přes VBAProject (Vyhodnoceni.xlsm) → Microsoft Excel Objects → ThisWorkbook a smazání kódu.

6.3 Příprava na zkoušku a její průběh

Pro provedení zkoušky je nezbytné mít kromě zařízení s napájecím kabelem k dispozici i počítač či notebook, kabel USB A-B pro komunikaci desky Arduino s počítačem a kameru se stativem schopnou nahrávat video se snímkovací frekvencí 24 fps na záznam zkoušky.

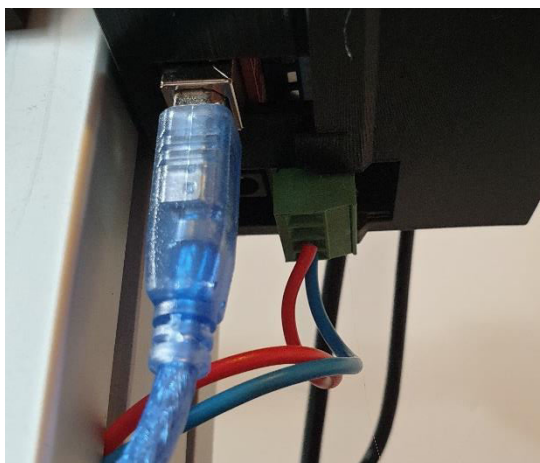
Postup zkoušky:

1. Zapojit zařízení do sítě pomocí napájecího kabelu a zapnout přepnutím spínače, který se zeleně rozsvítí, jak znázorňuje obrázek 6.3.



Obrázek 6.3 Zapnuté napájení zařízení

2. Pomocí USB A-B kabelu propojit zařízení s počítačem podle obrázku 6.4



Obrázek 6.4 USB A-B kabel zapojený do zařízení

3. Spuštění programu Arduino IDE na počítači a otevření Sériového monitoru buď pomocí klávesové zkratky *Ctrl+Shift+M* nebo Nástroje → Sériový monitor. Při správné funkci by se měla objevit hláška „Readings ready“
4. Kdykoliv lze v sériovém monitoru nastavit rychlost pohybu kleštin při zkoušce. V příkazovém řádku stačí napsat písmeno „r“ a potvrdit tlačítkem *enter*. Objeví se hláška „nastavte rychlost“ a začne ubíhat 5 sekund na zadání hodnoty rychlosti v jednotkách mm/min. Poté se zadaná rychlost pro kontrolu vypíše. Na tomto zařízení musí být hodnota v rozmezí 3 až 35 mm/min s tím, že výchozí hodnota je ta nejvyšší. Nastavení rychlosti posuvu se vztahuje pouze na zkoušku s měřením, ovládání pomocí tlačítek využívá konstantně nejvyšší rychlost.
5. Je vhodné zkontrolovat, zda je pohyblivá část zařízení stále ve vodorovné poloze. Tlačítka na ovládacím panelu ovládají pohyb nahoru a dolů. Nejjednodušší způsob kontroly je spustit pohyb dolů, až než se kleštiny téměř dotýkají. Pokud nejsou navzájem paralelně, je potřeba manuálně otočit závitovými tyčemi tak, aby se vyrovnaly. Na obrázku 6.5 je ukázán optimální stav.



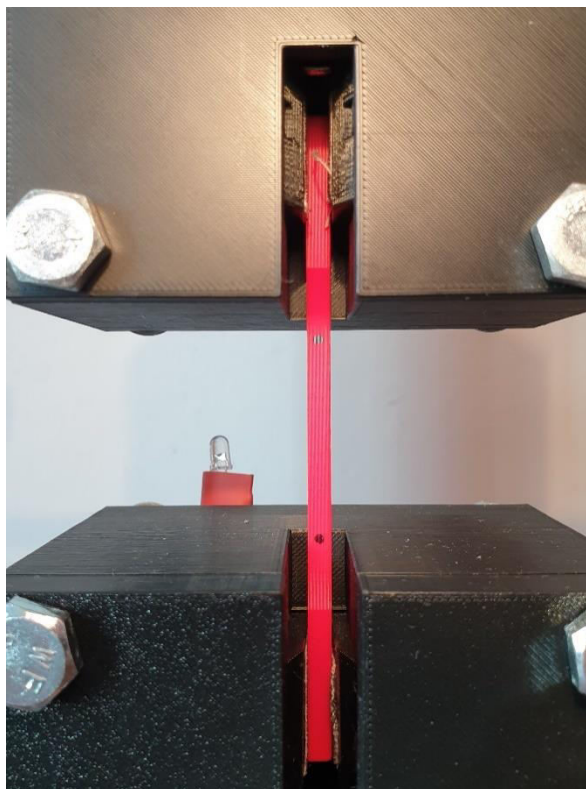
Obrázek 6.5 Ověření souběžnosti kleštin

6. Otevřít soubor Vyhodnoceni.xlsm. Hodnoty ze senzoru jsou napsány ve formátu s desetinnou tečkou, je tedy nutné nastavit v excelu její použití. Soubor → Možnosti → Upřesnit → Oddělovač desetinných míst.
7. Vzít připravené zkušební těleso a pětkrát změřit šířku a tloušťku v zúžené prostřední části a hodnoty zaneš do tabulky v souboru Vyhodnoceni.xlsm
8. Na tělese v jeho zúžené části vyznačit body např. pomocí permanentního popisovače, jak ukazuje Obrázek 6.5. Ty budou později sloužit k měření prodloužení tělesa.



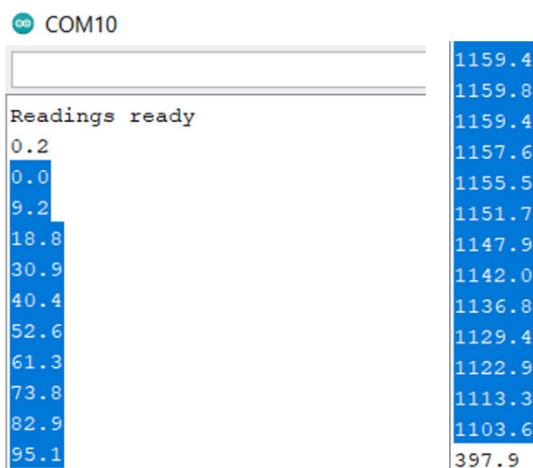
Obrázek 6.6 Značky na zkušebním tělesu

9. Umístit těleso do kleštin tak, aby alespoň polovina jeho širších konců byla upevněná. Kleštiny jsou vyrobeny tak, aby pokud je těleso typu 1BA umístěno co nehlouběji v nich, nachází se přesně v ose tahu. Obrázek 6.7 zobrazuje ideální umístění tělesa. Dotazení nemusí (a nemělo by) být až na maximum.



Obrázek 6.7 Zkušební těleso v kleštinách

10. Nachystat kameru tak, aby její osa byla co nejvíce kolmá na osu tělesa a v záběru se nacházely oba dva body. Nad tím vrchním musí být místo z důvodu pohybu při zkoušce. Nastavit co nejvyšší rozlišení videa a snímkovací frekvenci omezit na 24 či 25 fps (tenzometrický snímač totiž nedokáže zaznamenávat hodnoty rychleji než jednou za 40 ms).
11. V sériovém monitoru nesmí být zaškrtnuté políčko „Zobrazit časové razítko“.
12. Spustit nahrávání kamery.
13. Přepnout spínač v ovládacím panelu do polohy vzhůru. Tím dojde ke spuštění motorů a snímání hodnoty zátěže, což indikuje LED dioda umístěná na spodních kleštinách.
14. Hodnoty síly zobrazované v sériovém monitoru jsou v jednotkách newton [N]. Z důvodu snadného zkopírování jsou psány bez nich.
15. Po přetržení vzorku zastavit spínačem měření a vypnout záznam kamery.
16. Zkopírovat hodnoty síly ze sériového monitoru do souboru Vyhodnoceni.xlsm, sloupec Síla. První dvě jsou zpravidla nulové či záporné, jak dochází k záběru motorů, tak je vhodné začít až od té druhé. A na konci obsáhnout pouze hodnoty před tím, než dojde k velkému propadu vlivem přetržení. Kopírování probíhá klasicky pomocí označení myši a *Ctrl+C*, *Ctrl+V*. Příklad označených hodnot je na obrázku 6.8. Hodnoty 0,2 N na začátku a 397,9 N na konci jsou ignorovány.

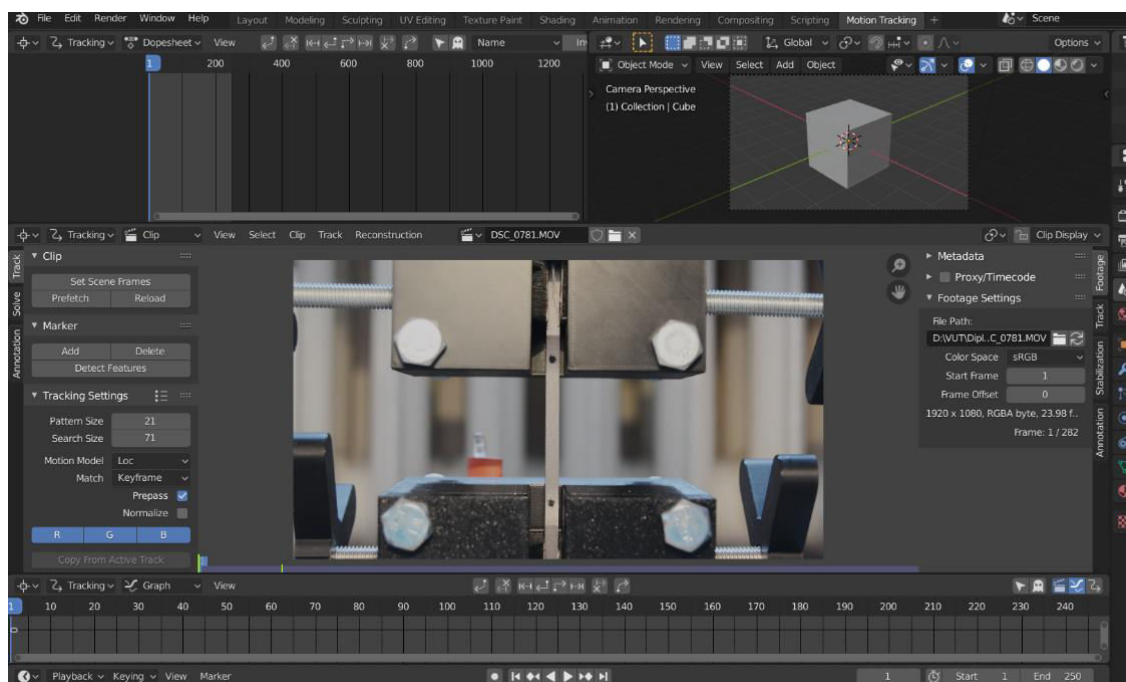


Obrázek 6.8 Ukázka označených hodnot v sériovém monitoru

17. Přenést záznam z kamery do počítače

6.4 Sledování pohybu (Motion Tracking) v programu Blender v2.87.7

Po zapnutí programu Blender se modul Motion Tracking spouští pomocí kliknutí na symbol + na horní liště, dále VFX → Motion tracking. Tlačítko „Open“ nacházející se uprostřed obrazovky slouží k nalezení a otevření záznamu ze zkoušky. Po jeho otevření by obrazovka měla vypadat přibližně tak, jak je uvedeno na obrázku 6.9.



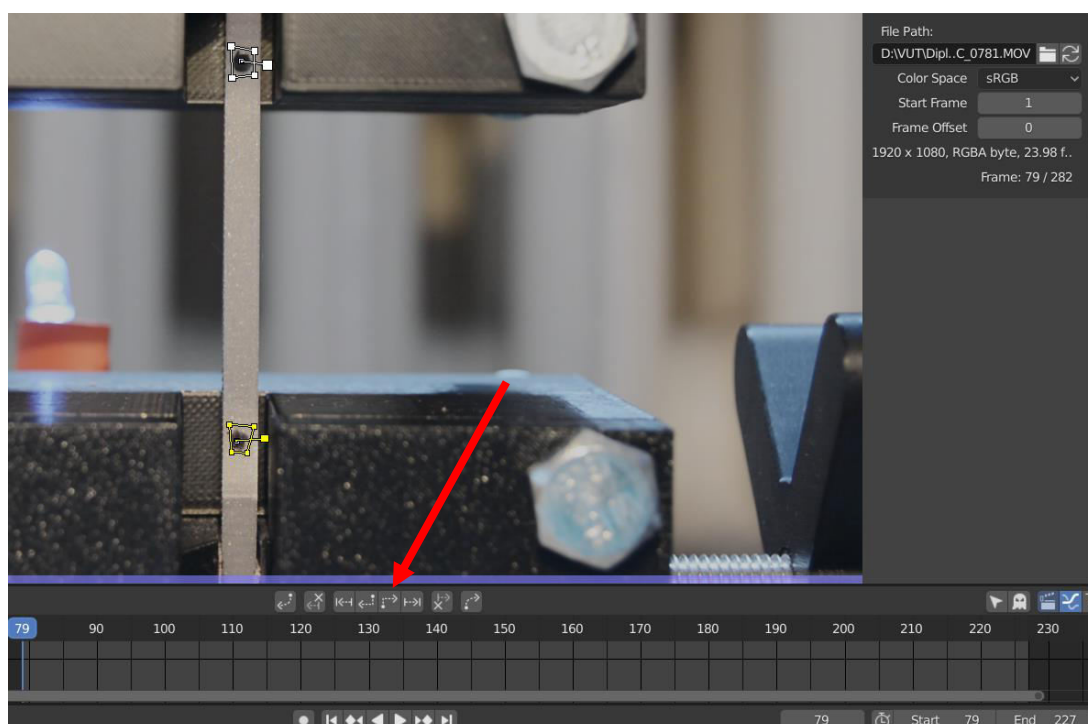
Obrázek 6.9 Otevření záznamu ze zkoušky

Nejprve je potřeba nalézt začátek zkoušky, k čemuž slouží dioda v pozadí. Modrým posuvníkem ve spodní části obrazovky se určí první snímek, na kterém je dioda i jen zčásti rozsvícená. K posouvání po jednom snímku lze využít ovládací prvky v pravém

dolním rohu. Po nalezení začátku se číslo snímku zapíše do políčka „Start“ v pravém dolním rohu, aby bylo snadné se k němu vrátit. Do políčka „End“ se zapíše číslo snímku, ve kterém dojde k přetržení tělesa.

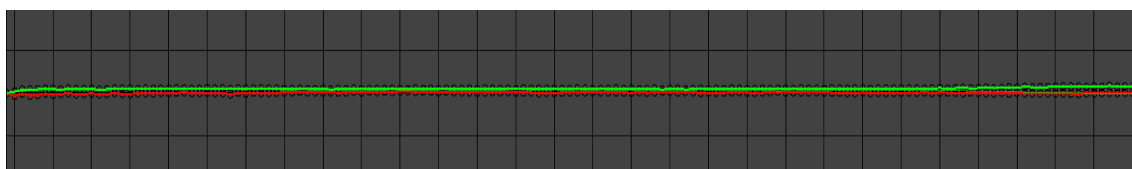
Nyní se na prvním snímku zkoušky umístí značky ke sledování vybraných bodů. V tomto případě jsou to namalované body na tělese. Umístění probíhá přes tlačítko „Add“ umístěné na levé straně pod záložkou „Marker“. Obrys značky by měl být relativně blízko k bodu nebo může dojít k jejímu neuchycení.

Na obrázku 6.10 je vše připraveno ke spuštění sledování. Je určen začátek i konec zkoušky a umístěné značky. Aby byly aktivní, jak je vidět na obrázku, stačí stisknout klávesu A. Červená šipka pak označuje tlačítko ke spuštění sledování pohybu.



Obrázek 6.10 Záznam připraven na sledování značek

Úspěšný proces vygeneruje ve spodní části čtyři křivky, které značí polohu bodů. Zde je nutné zkontrolovat, jestli oba body byly sledovány od začátku až do konce. Kliknutím na jednotlivé značky se zvýrazní jejich dvě křivky. Obrázek 6.11 znázorňuje úspěšně dokončený proces.



Obrázek 6.11 Křivky sledování pohybu bodů při zkoušce

K exportu těchto hodnot dochází v záložce „Scripting“, která se nachází na horní liště programu Blender. Zde se tlačítkem „Open“ otevře dříve zmíněný soubor „exportDoCSV.py“, ve kterém byla v dřívějších krocích nastavena požadovaná adresa

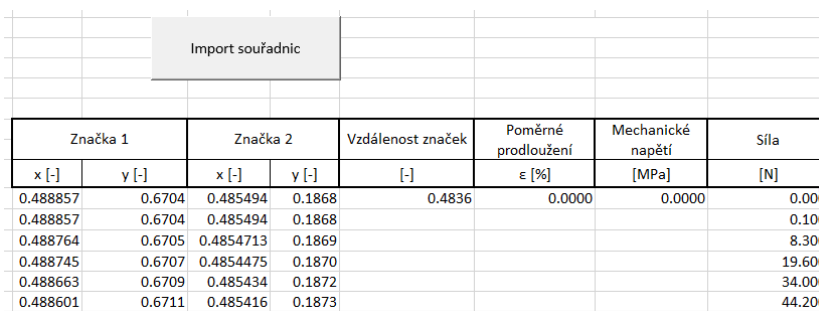
pro uložení souborů s hodnotami. Po jeho načtení se skript už jen spustí pomocí tlačítka „Run Script“ v pravém horním rohu.

Tímto dojde k vygenerování dvou souborů s názvy Track.csv a Track.001.csv a jejich uložení do cílové adresy. Každý obsahuje souřadnice jednoho z bodů. Při každém dalším spuštění skriptu budou původní soubory přepsány.

6.5 Práce v Excelu a zpracování dat

Soubor Vyhodnoceni.xlsm již obsahuje zkopírované hodnoty působící síly z dané zkoušky. Pokud došlo k úspěšnému vygenerování .csv souborů se souřadnicemi bodů, stačí kliknout na tlačítko „Import souřadnic“. Tím se spustí makro, které oba .csv soubory otevře, hodnoty z nich zkopíruje, rozdělí do dvou sloupců a soubory zavře.

Po tomto kroku by měl dokument vypadat přibližně tak, jak je na obrázku 6.12. V prvních buňkách třech prázdných sloupců jsou vzorce, které je potřeba roztáhnout až na spodní konec hodnot.



Značka 1		Značka 2		Vzdálenost značek	Poměrné prodloužení	Mechanické napětí	Síla
x [-]	y [-]	x [-]	y [-]	[-]	ϵ [%]	[MPa]	[N]
0.488857	0.6704	0.485494	0.1868	0.4836	0.0000	0.0000	0.000
0.488857	0.6704	0.485494	0.1868				0.100
0.488764	0.6705	0.4854713	0.1869				8.300
0.488745	0.6707	0.4854475	0.1870				19.600
0.488663	0.6709	0.485434	0.1872				34.000
0.488601	0.6711	0.485416	0.1873				44.200

Obrázek 6.12 Vyhodnoceni.xlsm po importu souřadnic

Ve vedlejším listu se nachází graf s několika počátečními hodnotami. Musí tedy dojít k upravení oblasti dat až na konec stejně jako v předchozím kroku. Jedná se o hodnoty poměrného prodloužení ϵ [%] na ose x a mechanického napětí σ [MPa] na ose y. Zbývá pak z grafu nebo vypočtených hodnot určit ukazatele mechanických vlastností materiálu. Ke každému ukazateli je v komentářích uvedeno, jak se má vypočítat či zjistit. Na obrázku 6.13 je snímek vyplněného dokumentu s odečtenými hodnotami. Tabulka vpravo dole slouží k určení modulu pružnosti. Vybere se rozsah hodnot odpovídajících poměrnému prodloužení $\epsilon \in (0,05; 0,25)$ % a z rovnice lineární spojnice trendu se určí hodnota modulu.

7. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole jsou uvedeny naměřené hodnoty, které dokazují funkčnost zařízení. Parametry tisku jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce 5.1. Grafy jsou znázorněny v příloze A.

Všechny uvedené zkoušky byly provedeny s rychlostí posuvu kleštin 35 mm/min.

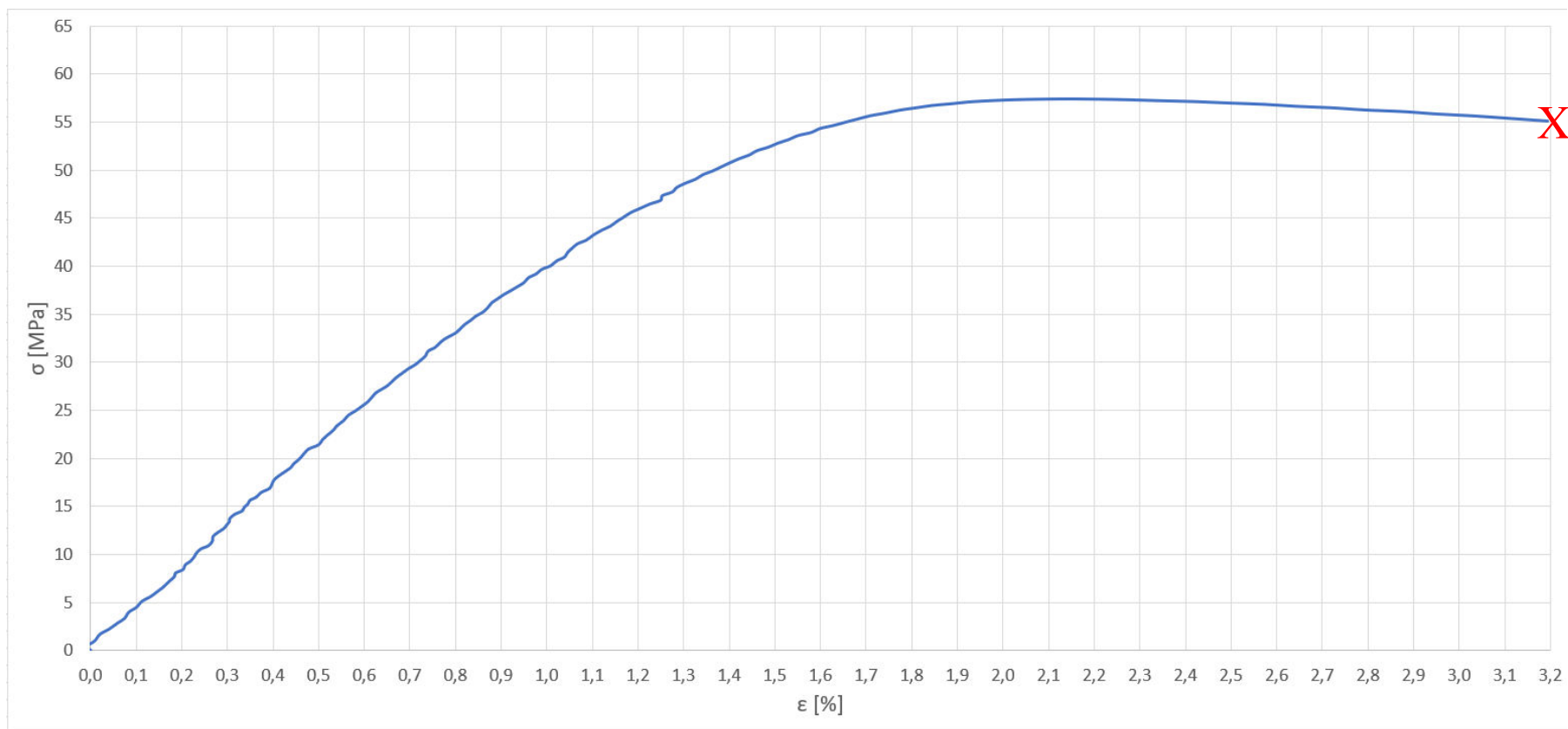
7.1 Prusament PLA (1)

Filament od firmy Prusa Polymers je jako jeden z mála dodáván s uvedenými vybranými mechanickými vlastnostmi. I přesto se ale v datasheetu nachází dodatek o vyloučení odpovědnosti z důvodu silné závislosti hodnot na nastavení tisku, zkušenostech obsluhy a okolních podmínkách. Hodnoty obsahuje tabulka 7.1 a získaná deformační křivka je zobrazena na grafu 1.

Tabulka 7.1 Naměřené mechanické vlastnosti Prusamentu PLA a modrou barvou označeny hodnoty z datasheetu [12]

Modul pružnosti v tahu	Mez pevnosti	Napětí na mezi kluzu	Napětí při přetržení
Et [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	σ_b [MPa]
4151	57,3	57,3	54,8
2200 ± 100		50,8±2,4	
	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti	Poměrné prodloužení na mezi kluzu	Poměrné prodloužení při přetržení
	ϵ_m [%]	ϵ_y [%]	ϵ_b [%]
	2,2	2,2	3,2
		2,9±0,3	

Na první pohled je zřejmý velký rozdíl v hodnotách modulu pružnosti v tahu. Tento problém a možné řešení je popsáno v závěru. I přes rozdíl mezi naměřenými a poskytnutými hodnotami napětí na mezi kluzu a poměrného prodloužení lze říci, že výsledky jsou reálné. Např. podle tohoto datasheetu se otočením tělesa při tisku o 90° podél jeho nejdelší osy zvýší hodnoty napětí na mezi kluzu o 9 MPa.



Graf 1 Deformační křivka materiálu PLA vzorku 1; X značí moment přetržení tělesa

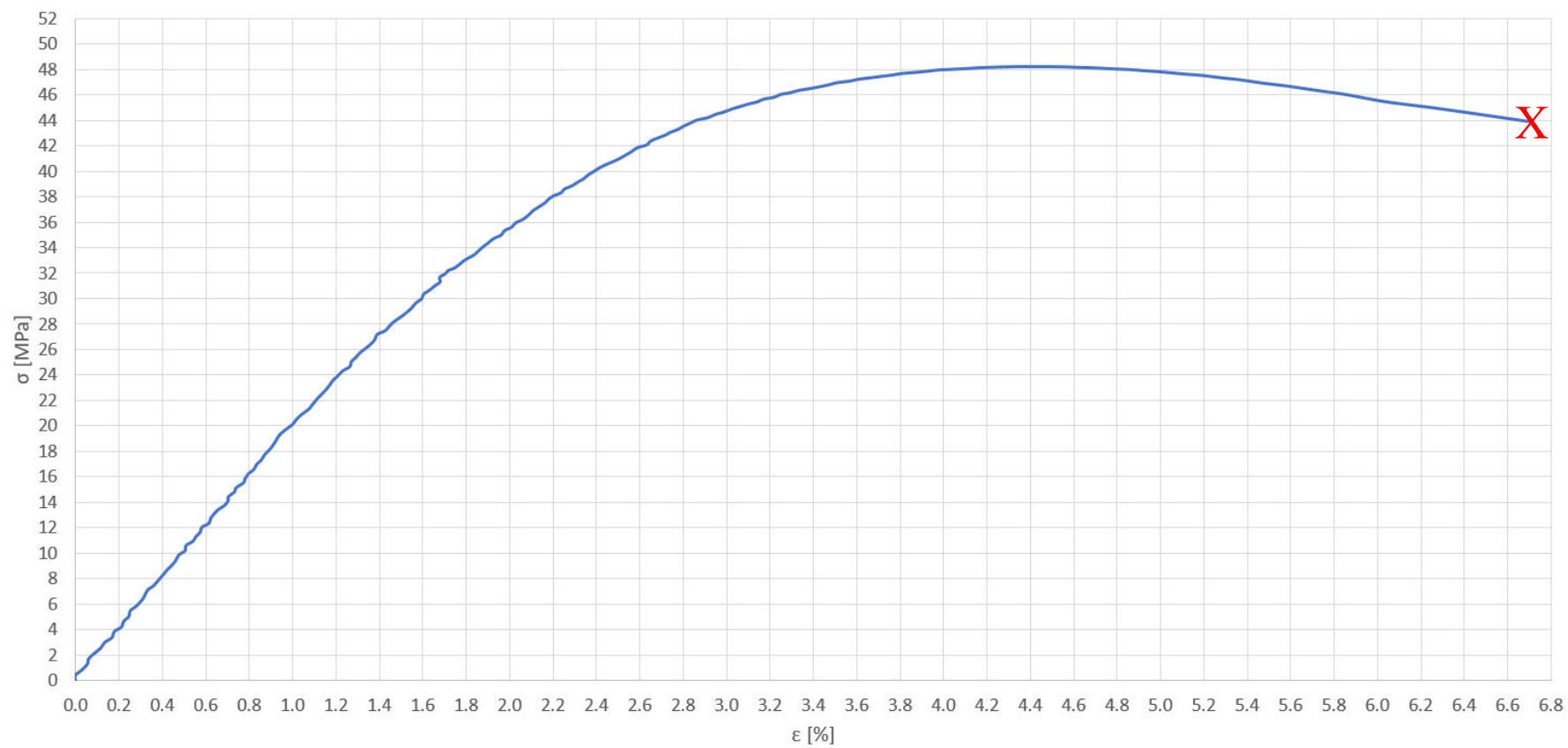
7.2 Prusament PETG (2)

Dalším materiálem od Prusa Polymers je PETG, jehož naměřené a dodané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.2. V tomto případě jsou naměřené hodnoty téměř totožné s těmi uvedenými v datasheetu, a to včetně modulu pružnosti v tahu. PETG je poddajnější než PLA a má také nižší pevnost. Deformační křivka ze zkoušky tohoto tělesa je vyobrazena na grafu 2.

Tabulka 7.2 Naměřené mechanické vlastnosti Prusamentu PETG a modrou barvou označeny hodnoty z datasheetu [11]

Modul pružnosti v tahu	Mez pevnosti	Napětí na mezi kluzu	Napětí při přetržení
E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	σ_b [MPa]
1697	48,2	48,2	43,9
1500±100		47,8±2	
	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti	Poměrné prodloužení na mezi kluzu	Poměrné prodloužení při přetržení
	ϵ_m [%]	ϵ_y [%]	ϵ_b [%]
	4,4	4,4	6,7
		5,1±0,1	

Na základě této zkoušky lze odhadnout, že pro poddajnější materiál s vyšším poměrným prodloužením lze snadněji určit hodnotu modulu pružnosti v tahu.



Graf 2 Deformační křivka materiálu PETG vzorku 2; X značí moment přetržení tělesa

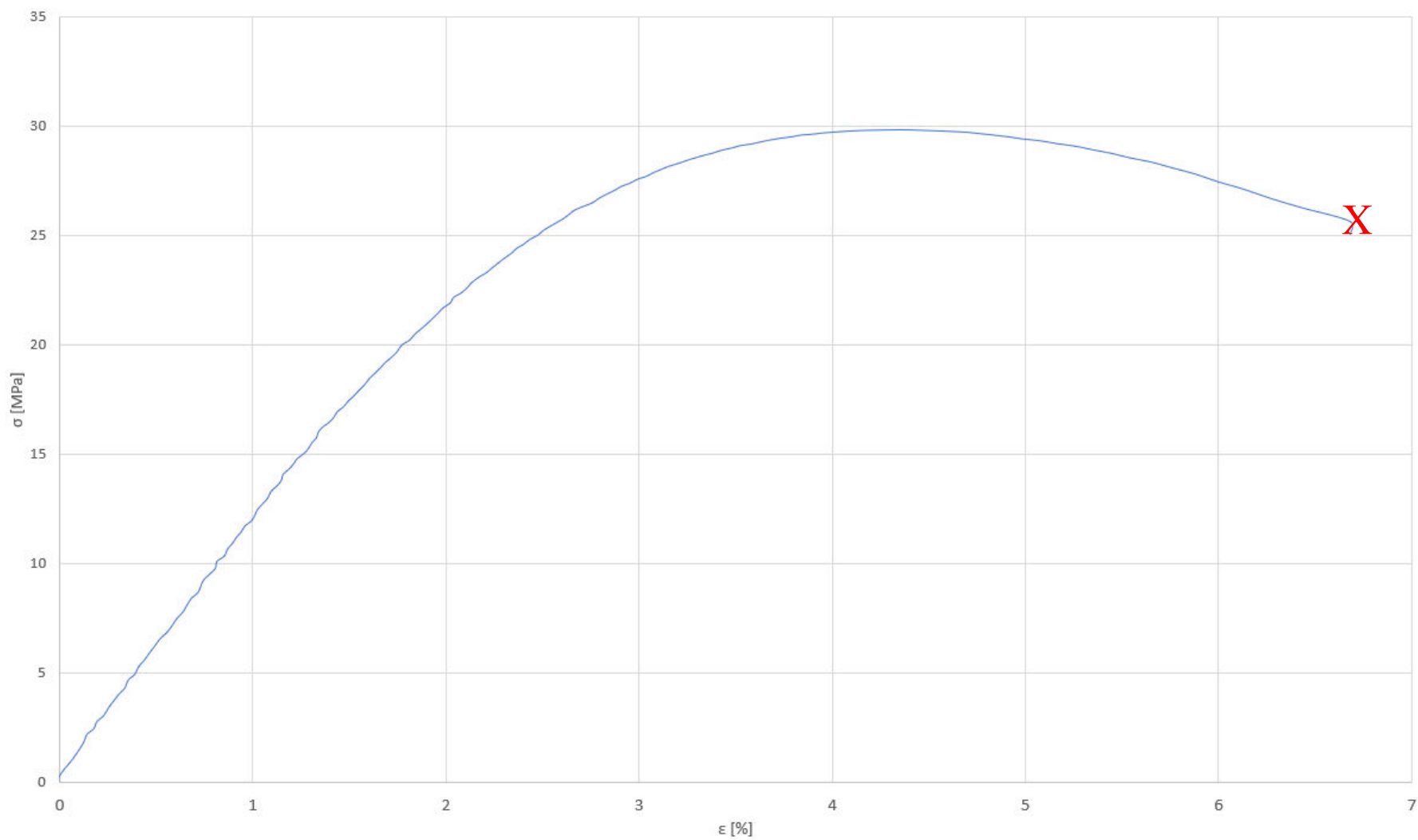
7.3 Prusament PETG (3)

Jelikož navržené zařízení na tahové zkoušky bude primárně sloužit k porovnávání různých kombinací parametrů, a ne k měření pevnosti různých materiálů s plnou výplní, byl vytištěn tento vzorek pomocí výchozího nastavení 0,2 mm SPEED v programu PrusaSlicer-2-3-0-beta2. Rozdíl oproti PETG (2) je zejména v hustotě výplně, kdy tento vzorek obsahuje pouze 20% výplň. Dále pak má také těleso 5 horních a 4 dolní plné vrstvy. Deformační křivka tělesa je zobrazena na grafu 3.

Tabulka 7.3 Naměřené mechanické vlastnosti Prusamentu PETG

Modul pružnosti v tahu	Mez pevnosti	Napětí na mezi kluzu	Napětí při přetržení
E_t [MPa]	σ_m [MPa]	σ_y [MPa]	σ_b [MPa]
1252	29,8	29,8	25
	Poměrné prodloužení na mezi pevnosti	Poměrné prodloužení na mezi kluzu	Poměrné prodloužení při přetržení
	ε_m [%]	ε_y [%]	ε_b [%]
	4,34	4,34	6,68

Při porovnání vzorku 2 a 3 není překvapením, že vzorek s nižší výplní (3) má nižší pevnost. Zajímavé je, že hodnoty poměrného prodloužení jsou téměř totožné pro oba vzorky.



Graf 3 Deformační křivka materiálu PETG vzorku 3; X značí moment přetržení těles

8. ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout a sestavit zařízení schopné vykonávat tahové zkoušky plastových materiálů. V teoretické části je ve stručnosti popsán 3D tisk, jeho využití a vlastnosti výrobků. Aby mohlo dojít k návrhu konceptu zařízení, bylo nutné se nejprve seznámit s principy tahových zkoušek. Určité informace v této práci byly převzaty z online zdrojů, ale základem byly normy ČSN EN ISO 527-1 a 527-2.

Nejprve byla navržena konstrukční část zařízení v programu SolidWorks, kdy průběžně docházelo k tisku nových a lepších dílů. Při návrhu byla snaha o co největší zapojení 3D tiskárny, o čemž svědčí 37 tisknutých dílů použitých ve finální verzi zařízení. Konstrukce je do velké míry modulární, tedy nenachází se v ní žádné pevné spoje a výměna jakéhokoliv dílu nevyžaduje mnoho času ani poškození jiného. K řízení se používá deska Arduino, ve které je nahrán vytvořený kód. Přes ni je také nutné při zkoušce snímat hodnoty z tenzometrického snímače.

Z důvodu vysoké ceny profesionálních extenzometrů (mnohonásobek ceny celého zařízení) je nutné vyhodnocovat poměrné prodloužení manuálně pomocí kamery a softwaru na sledování pohybu. Pro usnadnění práce s hodnotami byl vytvořen soubor Microsoft Excel s podporou maker, který jedním tlačítkem importuje a zpracuje hodnoty.

Po dokončení zařízení bylo provedeno velké množství zkoušek, z nichž u většiny nedocházelo k vyhodnocování dat, ale jednalo se o zkoušky zátěžové pro otestování opotřebení zařízení. Po asi 40 zkouškách nebylo zatím nutné vyměnit žádný díl a zařízení nejeví známky opotřebení.

Tahové zkoušky poskytují odpovídající hodnoty vzhledem k použitým materiálům a parametrům tisku. Jediný problém se týká modulu pružnosti v tahu, který byl u PLA naměřen výrazně vyšší, než ve skutečnosti je. To je dáno zvoleným typem zkušební tělesa, tedy 1BA. Jak je uvedeno v normě ČSN EN ISO 527-2, tento typ není vhodný k měření modulu pružnosti v tahu z důvodu krátké měřené vzdálenosti a době zkoušky. Řešením je úprava modelu kleštin tak, aby větší zkušební těleso 1A nebo 1B bylo možné správně uchytit, tedy aby jeho osa byla přesně v ose tenzometrického snímače. Tělesa 1A a 1B mají oproti 1BA a 1BB dvounásobný průřez a výsledná síla by se tedy měla úměrně zvýšit. Přetrhnutí několika těles 1A proběhlo bez problémů, ale jelikož jsou současné kleštiny menší, osa tělesa a osa namáhání nejsou kolineární a snímaná síla dosahuje pouze 1850 N, i když by to mělo být kolem 2400 N.

Zkušební rychlost kleštin se může pohybovat v rozmezí 3 až 35 mm/min a lze ji kdykoliv změnit pomocí sériového monitoru, ale ani nejnížší nastavená rychlost neposkytuje jiné hodnoty modulu pružnosti v tahu.

LITERATURA

- [1] 3D Printing Basics. *Instructables Workshop* [online]. [cit. 2020-11-5]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/3D-Printing-Basics/>
- [2] Direct vs Bowden Extruder: Does It Make a Difference?. *All3DP*. [online]. [cit. 2020-11-5]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/direct-vs-bowden-extruder-technology-shootout/>
- [3] PrusaSlicer 2.3.0-alpha3; *GitHub* [online]. [cit. 2020-11-6]. Dostupné z: https://github.com/prusa3d/PrusaSlicer/releases/tag/version_2.3.0-alpha3
- [4] Ortiz, L.; Types of 3D Modeling: Which Is Best for Your Needs?. *All3DP* [online] [cit. 2020-11-8]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/types-of-3d-modeling/>
- [5] 3D printing with ABS plastic. *Sculpteo* [online]. [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/abs-definition/>
- [6] Prusament ASA Prusa. *Prusa Research Shop*. [online]. [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/prusament/974-prusament-asa-prusa-galaxy-black-850g.html>
- [7] PLA (Polylactic Acid) Material. *Vexma Technologies*. [online]. [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://vexmatech.com/pla-material.html>
- [8] PETG vs PLA: The Differences. *All3DP*. [online]. [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/petg-vs-pla-3d-printing-filaments-compared/>
- [9] Steelfill tisková struna. *Prusa Research Shop*. [online]. [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/filamenty/150-steelfill-tiskova-struna-filament-750g.html>
- [10] Technický list Prusament PC Blend. *Prusa Polymers*. [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: https://shop.prusa3d.com/fotky/PCBLEND_TechSheet_CZE.pdf
- [11] Technický list Prusament PETG. *Prusa Polymers*. [online]. [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: https://shop.prusa3d.com/fotky/PETG_TechSheet_CZE.pdf
- [12] Technický list Prusament PLA. *Prusa Polymers*. [online]. 2018 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: https://shop.prusa3d.com/fotky/PLA_TechSheet_CZE.pdf
- [13] Guide to SLA. *Formlabs*. [online]. [cit. 2020-11-18]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/#What%20is%20Stereolithography%203D%20Printing%3F>
- [14] Tree supports. *Prusa Knowledge Base*. [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/en/article/tree-supports_1515
- [15] Top five printing applications. *MakerBot*. [online]. [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/stories/design/top-5-3d-printing-applications/>
- [16] Industrial Applications of 3D printing: The Ultimate Guide. *AMFG*. [online]. [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://amfg.ai/industrial-applications-of-3d-printing-the-ultimate-guide/?cn-reloaded=1>
- [17] Prusa Factory Tour. *3D Printing Nerd*. [online]. 2019. [cit. 2020-12-1]. Dostupné z:

- https://www.youtube.com/watch?v=BjoQw5fGk6Q&ab_channel=3DPrintingNerd
- [18] What is Mechanical Testing and Why is it Important throughout the Product Lifecycle? *Element Materials Technology*. [online] 2020. [cit. 2020-12-1]. Dostupné z: <https://www.element.com/nucleus/2016/07/06/what-is-mechanical-testing>
- [19] Běhálek, L. *Polymery*. 1. vydání. Místo publikování: Svitavy, ISBN: 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [20] ČSN EN ISO 527-1: *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, duben 2020.
- [21] Lamborová, R. Recyklace ozářených polymerů: *diplomová práce*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. [cit. 2020-12-8]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/9593/lamborov%C3%A1_2009_dp.pdf?sequence=1
- [22] ČSN EN ISO 527-2: *Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2012.
- [23] Zkoušky plastů dle ISO 527-2. *JD*. [online]. [cit. 2020-12-8]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/iso-527-2-stanoveni-tahovych-vlastnosti-tvarenych-plastu>
- [24] Siloměr handifor™. *Kaiser Kraft*. [online]. [cit. 2020-12-8]. Dostupné z: <https://www.kaiserkraft.cz/vahy/vahy/silomer-handifor/miniaturni-provedeni/p/M7141791/>
- [25] Digitální úchylkoměr standard model INSIZE 25,4 mm/1"-0,001 mm. *Stools*. [online]. [cit-2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.stools-shop.cz/digitalni-uchylkomer-standard-model-insize-25-4-mm-1-0-001-mm/>
- [26] Brocken, B. 3D printable high torque servo/gearbox version 2. *Thingiverse*. [online]. 2020 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:4547703>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FDM	Fused Deposition Modeling (modelování pomocí depozice a spojování nataveného materiálu)
ČSN	Česká technická norma
EN	European Standard (Evropský standard)
ISO	International Organization for Standardization (mezinárodní organizace zabývající se tvorbou norem)
SLA	Stereolitografie
PTFE	Polytetrafluorethylen
STL	Standard Triangle Language
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
ASA	Akrylonitril-styren-akrylát
PLA	Polymléčná kyselina
PET-G	Polyethylentereftalát-glykol
UV	Ultrafialové záření
PC (Blend)	Polykarbonát (směs)
NB	No break (bez přerušení)
C	Complete break (úplné přerušení)
SLS	Selective Laser Sintering (selektivní tavení laserem)
LCD	Liquid Crystal Display (Displej z kapalných krystalů)
LED	Light-Emitting Diode (elektroluminiscenční dioda)
DC	Direct current (Stejnoseměrný elektrický proud)

Symbols:

σ	mechanické napětí	[MPa]
F	působící síla	[N]
A	průřezu tělesa	[mm ²]
ε	poměrné prodloužení	[% , -]
σ_y	napětí na mezi kluzu	[MPa]
ε_y	poměrné prodloužení na mezi kluzu	[% , -]
σ_m	mez pevnosti	[MPa]
ε_m	poměrné prodloužení na mezi pevnosti	[% , -]
σ_b	napětí při přetržení	[MPa]
ε_b	poměrné prodloužení při přetržení	[% , -]
σ_x	napětí při x % prodloužení	[MPa]
E_t	modul pružnosti v tahu	[MPa]
L_0	počáteční měřená délka	[mm]
L	počáteční vzdálenost mezi čelistmi	[mm]
b_1	šířka tělesa v zúžené části	[mm]
h	tloušťka tělesa	[mm]

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - ZDROJOVÝ KÓD NAHRANÝ V DESCE ARDUINO	53
--	----

Příloha A - Zdrojový kód nahraný v desce Arduino

```
#include "HX711.h"
#define calibration_factor 870.0
#define LOADCELL_DOUT_PIN 32
#define LOADCELL_SCK_PIN 47

HX711 scale;

unsigned long fps = 24;

byte directionPin = 61;
byte stepPin = 60;
byte y_en = 56;

byte directionPinX = 55;
byte stepPinX = 54;
byte x_en = 38;

byte buttonCWpin = 17;
byte buttonCCWpin = 16;
byte switchpin = 23;

byte startLedPin = 27;

boolean buttonCWpressed = false;
boolean buttonCCWpressed = false;
boolean switchon = false;

byte ledPin = 13;

unsigned long curMillis;
unsigned long prevStepMillis = 1;
float microsBetweenSteps = 1;
unsigned long readMillis = 50;
unsigned long readBetweenMillis = 50;
unsigned long x;
unsigned long y;
float rychlost = 35;
void setup() {

    Serial.begin(9600);

    pinMode(directionPin, OUTPUT);
    pinMode(directionPinX, OUTPUT);
    pinMode(stepPin, OUTPUT);
    pinMode(stepPinX, OUTPUT);
    pinMode(ledPin, OUTPUT);
    pinMode(startLedPin, OUTPUT);
    pinMode(buttonCWpin, INPUT_PULLUP);
    pinMode(buttonCCWpin, INPUT_PULLUP);
    pinMode(switchpin, INPUT_PULLUP);
    pinMode(y_en, OUTPUT);
    pinMode(x_en, OUTPUT);
    digitalWrite(x_en, HIGH);
    digitalWrite(y_en, HIGH);

    scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);
```

```

    scale.set_scale(calibration_factor);
    scale.tare();

    Serial.println("Readings ready");
}

void loop() {

    rychlost_set();
    curMillis = micros();
    readMillis = millis();
    readButtons();
    actOnButtons();
    x = curMillis;
    readings();
    readMillis = millis();
    timer ();
}

void rychlost_set(){
    if(Serial.available())
    {
        char temp = Serial.read();

        if(temp == 'r'){
            Serial.println("nastavte rychlost");
            delay(5000);

            int temp = Serial.parseInt();
            rychlost = temp;

            Serial.println(rychlost);
            float h = 60/(21973*0.000001);
            microsBetweenSteps = h/rychlost;
            Serial.println("mm/min");
        }
    }
}

void readButtons() {

    buttonCCWpressed = false;
    buttonCWpressed = false;
    switchon = false;

    if (digitalRead(buttonCWpin) == HIGH) {
        buttonCWpressed = true;
    }
    if (digitalRead(buttonCCWpin) == HIGH) {
        buttonCCWpressed = true;
    }
    if (digitalRead(switchpin) == HIGH) {
        switchon = true;
    }
}

void actOnButtons() {
    if (buttonCWpressed == true) {
        digitalWrite(directionPin, LOW);
        digitalWrite(directionPinX, LOW);
    }
}

```

```

        singleStep();
    }
    if (buttonCCWpressed == true) {
        digitalWrite(directionPin, HIGH);
        digitalWrite(directionPinX, HIGH);
        singleStep();
    }
    if (switchon == true) {
        digitalWrite(directionPin, HIGH);
        digitalWrite(directionPinX, HIGH);
        digitalWrite(startLedPin, HIGH);
        singleStepMeasure();
    }

    if (switchon == false) {
        digitalWrite(startLedPin, LOW);
    }
}

void singleStep() {
    if (curMillis - prevStepMillis >= .005) {
        digitalWrite(x_en, LOW);
        digitalWrite(y_en, LOW);
        prevStepMillis = curMillis;
        x = curMillis;
        y = curMillis;
        digitalWrite(stepPin, HIGH);
        digitalWrite(stepPinX, HIGH);
        digitalWrite(stepPin, LOW);
        digitalWrite(stepPinX, LOW);
    }
}

void singleStepMeasure() {
    if (curMillis - prevStepMillis >= microsBetweenSteps) {
        digitalWrite(x_en, LOW);
        digitalWrite(y_en, LOW);
        prevStepMillis = curMillis;
        x = curMillis;
        y = curMillis;
        digitalWrite(stepPin, HIGH);
        digitalWrite(stepPinX, HIGH);
        digitalWrite(stepPin, LOW);
        digitalWrite(stepPinX, LOW);
    }
}

void readings() {
    if (readMillis - readBetweenMillis >= 1000/fps) {
        readBetweenMillis = readMillis;
        if (switchon == true) {
            Serial.print(scale.get_units(), 1);
            Serial.println();
        }
    }
}

void timer() {
    if (x - y >= 1000) {
        digitalWrite(x_en, HIGH);
        digitalWrite(y_en, HIGH);
    }
}

```

```
    scale.tare();  
  }  
}
```