



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH RECYKLAČNÍHO ZAŘÍZENÍ PET LAHVÍ NA VÝROBU FILAMENTU PRO 3D TISK

DESIGN OF PET BOTTLE RECYCLATION DEVICE FOR CREATION OF 3D PRINTING FILAMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Huplík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Ondřej Huplík**
Studijní program: Základy strojírenského inženýrství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh recyklačního zařízení PET lahví na výrobu filamentu pro 3D tisk

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technologie 3D tisku se v dnešní době rozšiřuje i do běžných domácností. PET je termoplast ze skupiny polyesterů, který lze v podobě plastových lahví místo běžné recyklace použít např. jako filament k technologii 3D tisku. Teoretická část práce je zaměřena na analýzu existujících způsobů recyklace plastů. Praktická část se zabývá návrhem, konstrukcí a výrobou recyklačního zařízení řešící výrobu filamentu sloužícího jako vstupní materiál pro běžnou domácí 3D tiskárnu pracující na principu aditivní metody Fused Filament Fabrication (FFF). Práce je zakončena výsledným zhodnocením navrženého prototypového řešení a doporučením pro komunitu uživatelů zabývajících se touto problematikou.

Cíle bakalářské práce:

Teoretická část – analýza existujících způsobů recyklace plastů.
Praktická část – návrh konceptu zařízení pro recyklaci PET lahví.
Zhodnocení navrženého prototypového řešení.

Seznam doporučené literatury:

BREMER, M., JANOSCHEK, L., KASCHTA, D., SCHNEIDER, N., WAHL, M. Influence of plastic recycling-a feasibility study for additive manufacturing using glycol modified polyethylene terephthalate (PETG). SN applied sciences. 2022, Vol. 4, No. 5, s. 1-13. ISSN 2523-3963.

CHUA, CH. K., LEONG, K. F. 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fifth edition of Rapid prototyping. New Jersey: World Scientific, 2017. s. 457. ISBN 978-981-3146-76-1.

ASSADI, R., COLIN, X., VERDU, J. Irreversible structural changes during PET recycling by extrusion. Polymer (Guilford). 2004, Vol. 45, No. 13, s. 4403-4412. ISSN 0032-3861.

ALZAHIRANI, M. Modification of Recycled Poly(ethylene terephthalate) for FDM 3D-Printing Applications. UWSpace. Ontario, 2017.

BAKIR, A. A., ATIK, R., ÖZERINÇ, S. Effect of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of recycled polyethylene terephthalate parts. Journal of applied polymer science. 2021, Vol. 138, No. 3. ISSN 0021-8995.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Nárůst na popularitě 3D tisku a rostoucí množství plastového odpadu kladou důraz na hledání nových udržitelných a ekologických řešení. Práce se zabývá problematikou recyklace plastových materiálů a způsobu využití PET plastu v oblasti 3D tisku. V teoretické části jsou popsány současné možnosti recyklace plastů. Praktická část je zaměřena na návrh zařízení, které přijme páskované PET lahve a přivedením nad teplotu skelného přechodu přetvoří na filament. Zařízení je navrženo s ohledem na nákladovost a kompaktnost. Zařízení může být dále zlepšeno a přizpůsobeno pro různé typy plastových hmot.

Klíčová slova

recyklace, filament, PET, plast, 3D tisk, FDM, FFF

ABSTRACT

The rise in popularity of 3D printing and the increasing amount of plastic waste are putting an emphasis on finding new sustainable and environmentally friendly solutions. This thesis addresses the issue of recycling plastic materials and how PET plastic can be used in 3D printing. The theoretical part describes the current possibilities of plastic recycling. The practical part focuses on the design of a device that accepts a PET bottle strip and converts it into filament by bringing it above the glass transition temperature. The device is designed with cost and compactness in mind. The device can be further improved and adapted for different types of plastic materials.

Keywords

recyclation, filament, PET, plastic, 3D printing, FDM, FFF

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HUPLÍK, Ondřej. *Návrh recyklačního zařízení PET lahví na výrobu filamentu pro 3D tisk* [online]. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157821>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Návrh recyklačního zařízení PET lahví na výrobu filamentu pro 3D tisk vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 24. 5. 2024

místo, datum

Ondřej Huplík

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, cenné rady a odborný dohled. Děkuji také Ing. Petře Sliwkové, Ph.D. za pomoc při formální kontrole práce.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 RECYKLACE PLASTŮ	11
2.1 Termomechanická recyklace	12
2.2 Chemická recyklace.....	13
3 ROZDĚLENÍ 3D TISKÁREN	16
4 NÁVRH RECYKLAČNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	19
4.1 Technologie Fused Deposition Modeling	20
4.2 Kupované díly	22
4.3 Návrh jednotky	24
5 ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ.....	34
5.1 Technické zhodnocení.....	34
5.2 Ekonomické zhodnocení	37
ZÁVĚR.....	38

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD

Plastické hmoty jsou nedílnou součástí života naší společnosti. Díky svým mechanickým i chemickým vlastnostem mají uplatnění v mnoha oblastech. Plasty jsou využívány od vesmírných letů až po samotné nakupování v obchodních řetězcích, čímž vzniká spousta plastového odpadu. Kvůli špatné biologické rozložitelnosti je likvidace takového odpadu problematická.

Aktuálním problémem společnosti je právě nakládání s odpadem, jako je plast. Velké procento skončí jako spotřební výrobek, například obaly a PET lahve, a tím dochází k hromadění velkého množství plastového odpadu. Nejčastěji se využívá recyklace mechanickým drcením a následným přidáváním do nově vyráběného výrobku. Touto cestou dochází k degradaci mechanických vlastností plastu a postupem času recyklát přestane splňovat mechanické vlastnosti.

Do domácností se stále více rozšiřují 3D tiskárny (obr. 1) využívající metodu *Fused Filament Fabrication* (tzv. FFF). Tyto tiskárny využívají jako polotovar filament (obr. 2). Jedná se o tenký pružný drát z plastu, který se vytavuje a nanáší na tiskovou plochu. FFF tiskárny si získaly oblibu domácích „kutilů“ pro svůj jednoduchý provoz a možnost vyrobit dle potřeby téměř jakýkoliv produkt. Nabízí se možnost využít recyklačních zařízení a vyrobit vlastní filament. Jelikož některé výtisky nepotřebují mechanické vlastnosti prvotního plastu, nabízí se otázka, proč tedy pro tyto situace nevyužít filament z recyklovaného plastu? Velmi často je používán právě polyethylen-tereftalát, taktéž zkracován na PET. Tento plast se využívá i jako obalový materiál pro nápoje (PET lahve), které se nachází ve velkém množství v mnoha domácnostech. Tyto lahve mohou být využity právě na tvorbu vlastního recyklovaného filamentu. Jednoduchý systém výroby filamentu pro domácí využití by mohl snížit množství nevytříděného plastu. Návrh systému bere ohledy na cenové náklady a praktičnost pro malé domácí využití. Největší část jednotky je vyrobitelná pomocí tiskárny nebo věcí nacházejících se v domácnosti. Díly, které nebude možno vyrobit, jsou jednoduše poříditelné.



Obr. 1 3D tiskárna [1].



Obr. 2 Filament [2].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Průmyslové recyklační jednotky na výrobu filamentů využívají šroubového podavače. Tento podavač dávkuje do trysky jemnou drť, která je přetavována na drát o daném průměru a ten pokračuje přes kladky. Každá další kladka se otáčí rychleji než předchozí, a díky tomu dochází k vyvození vnitřního pnutí uvnitř budoucího filamentu, které způsobí prodloužení drátu. Takto dojde ke kalibraci drátu na přesný rozměr. Filament je tímto způsobem vyráběn na průměr drátu 1,75 mm.

Díky šroubovému podávání lze recyklovat předměty o různých rozměrech. Tyto předměty je zapotřebí jen očistit, nadrtit a vysušit. Jedná se o metodu s nejširším spektrem zdrojů k recyklaci, ale konstrukce je náročnější.

Při návrhu konstrukce jsou stanovena tato omezující kritéria:

- Jednoduchost konstrukce. Umožní zakoupení výkresové dokumentace a možnost jednotku sestavit s minimální znalostí principu.
- Ekonomická náročnost sestavit tuto jednotku. Důležitým bodem návrhu je zkonstruovat zařízení cenově nenáročné, zároveň ale bezpečné pro běžný provoz.
- Rychlé získání náhradních dílů. Při poruše nebo chybě operátora je možné rychle opravit poškozené součásti a využívat normalizované a běžně dostupné díly.

Běžným jednoduše dostupným materiálem, využívaným při tisku, je právě polyethylen-tereftalát. Tento materiál se využívá jako obal pro nápoje (PET lahve). PET lahve jsou využity jako vstupní materiál pro navrhovanou recyklační jednotku. Složité tvary některých lahví mohou značně zkomplikovat jejich recyklaci na filament. Lahve jsou vysušeny a technologicky upraveny pro jednodušší manipulaci a vyšší zisk filamentu. Takto upravené lahve jsou nařezány na pásy známého rozměru. Pásy jsou svařeny dohromady a vytvoří jeden kontinuální pás, který je protahován tryskou. Při průchodu tryskou dojde k tváření pásu na kulatinu o průměru filamentu. Teplota je řízená pomocí teplotního čidla a udržována na konstantní teplotě. Cílem je dosáhnout průměru drátu 1,75 mm při prvním, popřípadě druhém tažení tryskou. Průměr a homogenita průřezu se nesmí výrazně měnit. Změna homogenity průřezu či průměru povede k nerovnoměrnému protlačování materiálu při tisku. Nerovnoměrné protlačování poté vede k vynechávání, nebo naopak přechování materiálu ve vrstvách tisku. Tyto nežádoucí jevy vedou ke snížení kvality povrchu, popřípadě k selhání tisku. Výsledný filament je navíjen na cívku, kdy otáčení cívky vytváří tažnou sílu na filament a umožňuje protahování polotovaru tryskou.

Pro ověření mechanických vlastností recyklovaného filamentu je nutné provést zkoušku, ve které je využito trhacího zařízení a ověřovací parametr bude zkouška tahem. Je nutné také ověřit kvalitu tisku, což proběhne na testovacím modelu. Model bude ve tvaru lodě. Tento tvar nabízí geometrii, při které lze otestovat většinu problémů, které mohou nastat. Jedním z nedostatků je tzv. nitkování, kdy při tisku na objektu zůstávají vlasečnice filamentu. Tento jev nastává během přesunu do dalšího pracovního bodu, pokud filament vytéká ven z trysky. Pokud nebude dodržena homogenita filamentu, může nastat ucpání trysky – nejčastěji k tomu dochází z důvodu vniknutí cizího tělesa.

2 RECYKLACE PLASTŮ

Plasty jsou syntetické nebo částečně syntetické materiály na hlavní bázi polymerů. Jejich předností je jejich dobrá tvárnost a chemická neutralita. Výrobky z tohoto materiálu jsou nejčastěji vyráběny lisováním, litím nebo protlačováním. [3]

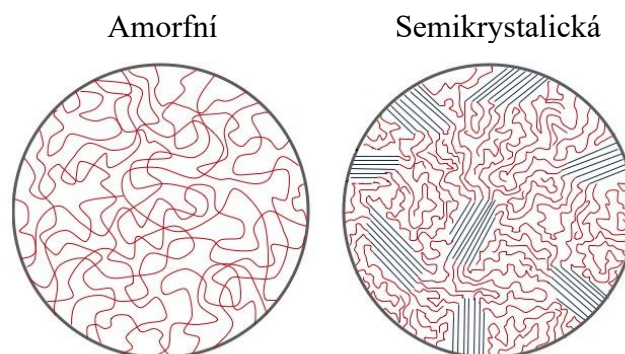
Plasty lze rozdělit do následujících kategorií [3]:

- dle aplikace
 - plasty pro široké využití,
 - inženýrské aplikace,
 - špičkové aplikace,
- dle teplotního chování
 - termoplasty,
 - reaktoplasty,
 - kaučuky, pryže a elastomery,
- dle nadmolekulární struktury
 - amorfní,
 - krystalické.

Termoplasty mohou mít nadmolekulární strukturu – buď amorfní, nebo semikrystalickou (obr. 3). Reaktoplasty mají pouze strukturu amorfní. Pro dosažení semikrystalické struktury je zapotřebí držet termoplast mezi teplotou skelného přechodu a teplotou tání. Pokud teplota nebude v tomto rozmezí, nebude docházet k nukleaci. Hrubost této semikrystalické struktury ovlivňuje čas, který je ponechán na krystalizaci, a teplota, při které probíhá. Pro jemnou strukturu je zapotřebí velkého množství nukleačních bodů. [3]

Termoplasty přechází do plastického stavu při zahřívání. Díky této vlastnosti je lze jednoduše tvářet a zpracovávat. Po ochlazení přejdou zpět do tuhého stavu. Při tomto ději nedochází ke změně chemické struktury což znamená, že tento proces nebude měnit mechanické, ani chemické vlastnosti termoplastu. Mezi termoplasty spadá většina zpracovávaných plastů. Mezi ně patří např. polyethylen (PE), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC), Polyethylentereftalát (PET). [3]

Reaktoplasty, taktéž nazývány jako termosety, rovněž měknou při zahřívání a je možno je tvářet. Toto platí jen po krátkou dobu. Po dalším zahřívání dochází k chemické reakci (tzv. vytvrzení). Vytvrzení je nevratné, a tedy po vytvrzení není možné plast znovu roztavit, ani rozpustit. Dalším zahřátím dochází k degradaci. Mezi tyto plasty patří např. fenolformaldehydové hmoty a epoxidové pryskyřice. [3]



Obr. 3 Nadmolekulární struktury polymerů [4].

Jednotka na výrobu filamentu bude využívat PET plast. Bude nutné řešit, jaké nadmolekulární struktury plast při výrobě nabude. Tento plast se sice vyznačuje velmi nízkou navlhavostí, i přesto však bude potřeba o tomto faktoru uvažovat. Absorpce vlhkosti závisí na teplotě polymeru a relativní vlhkosti vzduchu. Navlhavost plastu je způsobena převážně chemickým složením a přidávanými aditivy. Vlhkost polymeru může zapříčinit povrchové vady, stejně tak i zhoršení mechanických, dielektrických, tepelných a fyzikálních vlastností. Proces absorpce vlhkosti i proces sušení jsou procesy vratné. Z hlediska sušení lze rozlišit vlhkost povrchovou a kapilární. [5, 6]

Při povrchové vlhkosti je voda přilnavostí vázána k povrchu a vysušení této vlhkosti není nijak narušeno. Kapilární vlhkost je vázána kapilárními silami v mikrokapilárách. Odpařování je v tomto případě ztíženo. Pro vysušení je zapotřebí dosáhnout vyšší teploty, než je teplota bodu varu. Polymer je možné sušit do určité vlhkosti, které se říká rovnovážná vlhkost. Pokud dochází k sušení, musí být splněna podmínka sušení (rovnice 1.1). [5, 6]

$$p_{pp} > p_{po}, \quad (1.1)$$

kde: p_{pp} – tlak páry těsně nad povrchem sušeného materiálu [Pa],
 p_{po} – parciální tlak páry okolí [Pa].

2.1 Termomechanická recyklace

Nejjednodušší a ekonomicky zatím nejvýhodnější, je stále recyklace mechanická. Recyklovat se řádně dají jen termoplasty, jejichž recyklace probíhá podobným principem, jako recyklace kovu či skla. [7, 8]

Lze rozlišit tato základní stádia recyklace [7, 8]:

- separace a třídění,
- paketování,
- čištění,
- drcení,
- granulování.

Separace probíhá dle tvaru, hustoty, velikosti, barvy nebo chemického složení. Nejčastěji se využívá v automatických třídících linkách infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací. Tato metoda má své limity, jedná se totiž o optické zařízení. Pokud je plast silně znečištěn, nebo má na sobě etiketu, může dojít ke špatnému vyhodnocení. Toto platí i pro produkty složené z více různých typů polymerů. Lidský vstup je nezbytný pro dodatečnou kontrolu. Následně po této operaci zpravidla přichází paketování z důvodu lepší přepravy. Dalším důležitým krokem je vyčištění polymeru od znečištění. Tyto děje se mohou opakovat dle potřeby. Výsledně očištěný a roztríděný polymer je poté rozdrcen na malé kousky. [8]

Směs plastů je pásovým dopravníkem poslána k hrubému rozdrcení, a tato hrubá drť následně putuje do prvního čistícího zařízení. *Rotating drum washer* za pomoci gravitace oddělí nečistoty, jako například kameny, sklo a kovy. Voda proudící systémem pomáhá k vymývání. *Friction washer* je dalším krokem v čištění, tentokrát pro odstranění organických nečistot přichycených na plastu. Očištěná hrubá drť podstupuje další drcení. Relativně jemná drť je následně znovu poslána na *friction washer*. *Float-sink separation* (separace usazováním) je dalším krokem. Rozdělení probíhá na principu rozdílů hustoty lázně a tuhých částic. Částice s vyšší hustotou než lázeň klesnou ke dnu, a částice s nižší hustotou zůstanou na hladině. Plasty jako PP a PE budou plavat na hladině. Ostatní polymery jako PET, PS nebo PVC klesnou ke dnu. Drť se taktéž v této vodní lázni znovu promyje. Směs plastů, usazená na dně, projde přes silný magnet pro odstranění zbytkových kovových materiálů k *mechanical drier*, kde dojde

k vysušení plastu. Tímto je připraven druhotný surový materiál. Plast, který zůstane plavat na hladině, taktéž projde vysušením a pokračuje k *wind sifter*, kde dojde k separaci na základě hmotnosti. Tím dojde například k oddělení fólií (nejčastěji PP a LDPE) od ostatních plastů. Tímto je tento plast připraven i jako druhotný surový materiál. [8]

Kousky polymeru se následně roztaví a využijí na výrobu pelet. Tento proces probíhá za užití speciálně navrhnutého šroubu, kdy se za využití tření dosahuje rovnoměrnějšího teplotního rozložení. Tyto pelety se nejčastěji přimíchávají k peletám prvotního plastu. [8]

Nevýhodou této metody recyklace je degradace polymeru. Kvůli působení vysokých teplot a tlaků dochází k rozpadu řetězců polymeru. Nečistoty mohou mít negativní vliv na taveninu. Jejich přítomnost může způsobit nežádoucí chemickou reakci vedoucí k rozpadu chemických vazeb. Pokud by se nečistoty (např. celulóza) dostaly do roztaveného plastu, mohly způsobit urychlení rozkladu řetězců, a proto je potřeba důkladné očištění před začátkem tavení. [7, 8]

2.2 Chemická recyklace

Polymery je též možné recyklovat chemickou cestou. Existuje několik cest, a každá nabízí jiný způsob návratnosti. Polymery je možné chemicky rozložit na cenné chemikálie a palivo. Nejvyhledávanější jsou monomery a petrochemické suroviny. Mezi takový polymer patří právě například PET nebo nylon. Na rozdíl od biomasy plastový odpad neobsahuje velké množství kyslíku, a díky tomu má lepší uhlíkovou účinnost. [8]

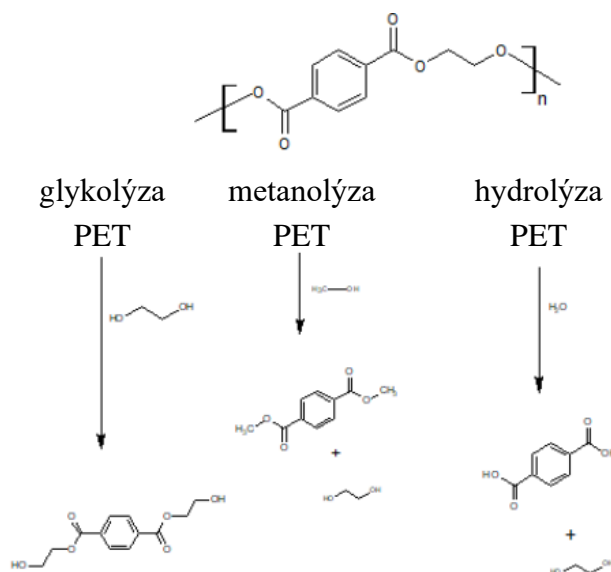
V dnešní době se využívají tyto metody pro zpracování [8]:

- chemolýzy,
- zplyňování,
- pyrolýzy,
- katalytického krakování,
- hydrokrakování.

Při chemolýze lze rozlišit několik chemolytických procesů (obr. 4). Metanolýza je proces, při kterém se využívá metanol jako rozpouštědlo za teplot okolo 200 °C a tlaku okolo 30 atm. Hlavními katalysty pro tento proces je octan zinečnatý, octan hořečnatý, octan kobaltnatý a oxid olovičitý. Vedlejším produktem je dimethyl-terephthalát (DMT) a ethylenglykol (EG). Problémem této metody je odseparování EG od DMT a rezidua katalystů. [8, 9]

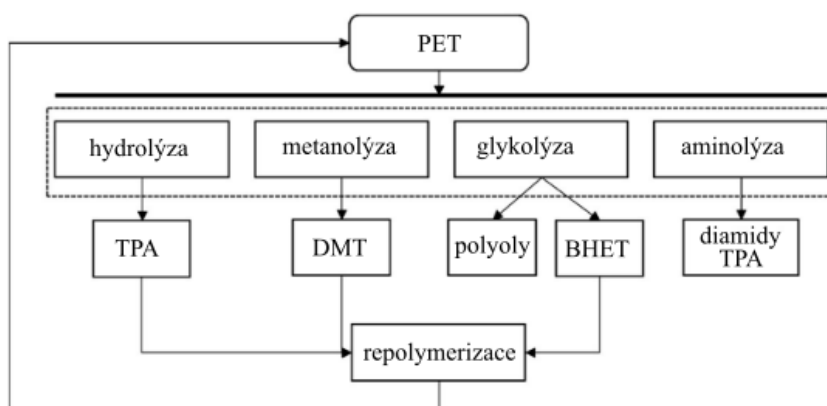
Hydrolyza rozbíjí polyesterové řetězce na kyselinu tereftalovou (TPA) a EG. Důležité je rozlišit, zda je voda v reakci s PET bazická, alkalická, či neutrální. Probíhá za vysokých teplot a tlaků. Pro alkalickou hydrolyzu se využívá nejčastěji hydroxid sodný. Bazická hydrolyza využívá kyseliny sírové. Neutrální hydrolyzy lze dosáhnout vodou nebo parou za přítomnosti octanu alkalických kovů. Nevýhodou tohoto procesu je nízká čistota TPA a rychlost reakce. [8, 9]

Glykolýza je nejstarší a rovněž nejjednodušší metodou. PET reaguje s glykoly za teplot přibližně 200 °C. Tato reakce rozbíjí polymerové řetězce na TPA, EG a polyalkoholy. Polyalkoholy se následně využívají při produkci různých polymerů, jejichž příkladem jsou polyuretany, polyestery atd. Procesy jsou zakresleny na základě jejich hlavních produktů. [8, 9]

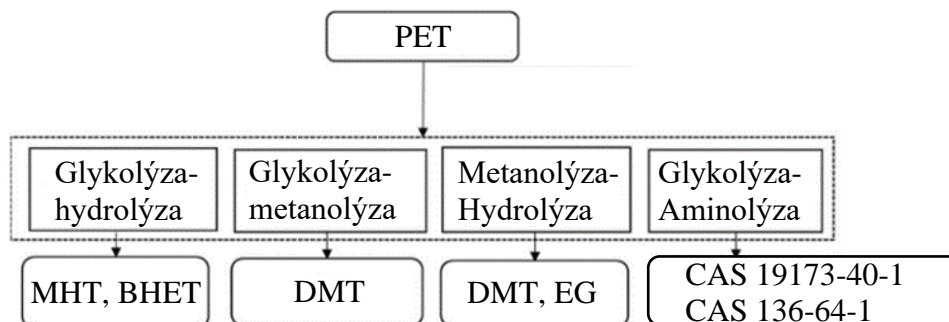


Obr. 4 Chemický rozklad PET [10].

Nejčastěji se však používají kombinace těchto procesů. Kombinací těchto procesů se může zvýšit časová efektivita, případně zvýšit čistota finálního produktu. Problémy těchto procesů jsou aditiva přidávána do plastů, která mohou mít nežádoucí účinky na reakce. Totéž platí pro stopová množství kovů, jako jsou antimón, kobalt či mangan. Na obr. 5 je porovnání mezi jednotlivými procesy chemolýzy. Obr. 6 popisuje porovnání různých kombinovaných chemolýz z hlediska hlavních výstupních produktů.

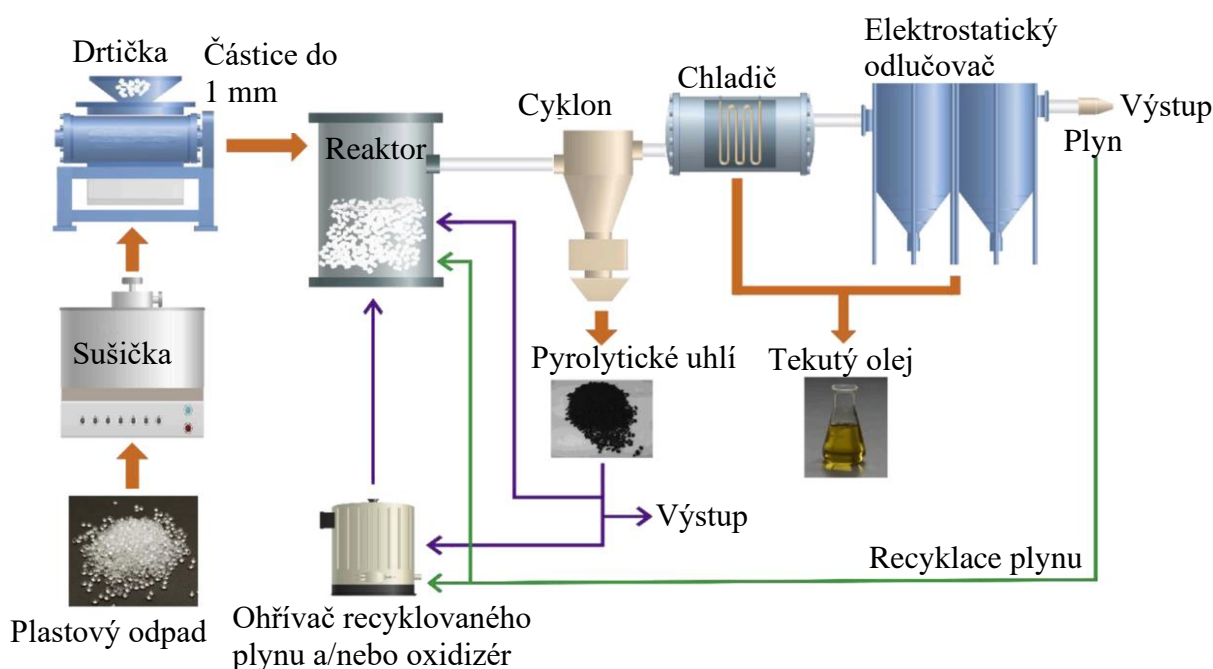


Obr. 5 Jednoduchá chemolýza [9].



Obr. 6 Kombinovaná chemolýza [9].

Pyrolýza je další metodou chemického zpracování polymerů. Výhodou pyrolýzy je její schopnost využít polymery, které jsou jinak špatně depolymerizovatelné, nebo by skončily na skládkách. Mezi takové polymery jsou zařazeny polyethylen či polypropylen a také výrobky složené z více druhů polymerů (vícevrstvé obaly) nebo vláken vyztužených kompozity. Pyrolýza probíhá za teplot v rozsahu 500–800 °C bez kyslíku po krátký čas [11]. Vysoká teplota umožní rozpad makrostruktury polymeru. Dle druhu polymeru bude převažovat depolymerizace nebo fragmentace. PET se touto metodou depolymerizuje na TPA a plynné palivo. Pyrolytické uhlí (*char*) je nevyhnutelným by-produktem. Parou podpořená pyrolýza však tvorbu pyrolytického uhlí omezuje. Tento proces nezpůsobí kontaminaci vody. Plyny a oleje vzniklé tímto procesem mohou být využity jako zdroj energie a paliva. Také není vyžadován náročný třídící proces, jak tomu bylo u termomechanické recyklace. Schéma pyrolytické jednotky je možno vidět na obr. 7. [8, 11, 12]



Obr. 7 Schéma pyrolýzy [13].

Katalytické krakování využívá katalyzátor. Teplota potřebná na tyto procesy je nižší než při pyrolýze (300–450 °C) [8]. Nejčastěji užívanými katalyzátory jsou kyselé zeolitové katalyzátory. Část výstupních produktů tohoto procesu se dá využít pro výrobu palivových směsí a zbylé produkty jsou využívány do dalších petrochemických procesů. Katalytické krakování je výhodnější z hlediska získaného benzínu (*gasoline*) na rozdíl od tepelného krakování. Proces je velmi citlivý na částičky anorganických materiálů, které mohou učinit katalyzátor nereagující. Tyto částičky mohou ucpat póry katalyzátoru a učinit ho tak inertním. [8, 14]

Všechny uvedené recyklační metody vedou ke stejnému cíli: pomocí chemické reakce přetvořit různé druhy plastů na petrochemické chemikálie. Tyto petrochemikálie slouží k výrobě nových polymerů, nebo vstupují do jiných petrochemických procesů jako přísady. Tím je možno z těchto recyklovaných chemikálií buď znovu vyrobit daný plast, nebo je využít v jiné oblasti. Část chemikálií získaných recyklací se využívá na výrobu palivových směsí, které jsou spalovány pro výrobu elektrické energie. Moderní metody chemické recyklace výrazně snižují, nebo zcela zastavují, degradaci plastu z důvodu recyklace. Vysoké pořizovací ceny a vysoké náklady na chod je prozatím činí ekonomicky neudržitelné.

3 ROZDĚLENÍ 3D TISKÁREN

V dnešní době se využívá několik metod pro výrobu 3D tištěných dílů. Materiál použitý při tisku se využívá jako jeden ze způsobů rozdělení. Samozřejmě ne každá metoda 3D tisku se hodí pro daný materiál. Proto jsou některé metody převážně pro specifickou kategorii materiálu. Nejvíce užívanými jsou:

- 3D tisk kovem,
- 3D tisk plastem.

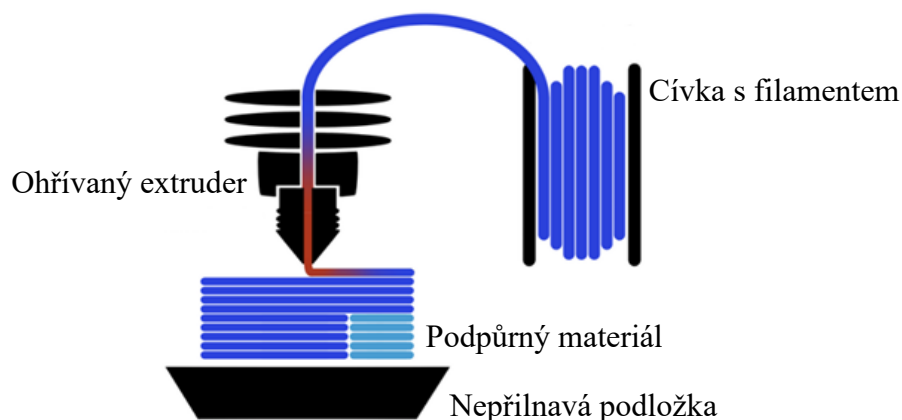
Není zde však omezení jen na tisk kovem či plastem. Velmi často používaným materiálem jsou například pryskyřice vytvrzované ultrafialovým zářením. Ve stavebnictví se experimentuje s možností rychle a levně stavět struktury 3D tiskem. Pro tisk těchto struktur se často využívá beton. Pro méně běžný tisk se využívá i kompozitní filament. Příkladem může být filament s příměsí drtě z uhlíkových vláken. Jsou taktéž pokusy o 3D tisk keramických kostních náhrad a v lékařství také tisk enterických tobolek.

Pro tisk plastů/pryskyřic se rozlišuje několik metod. Každá metoda má své výhody i nevýhody a každá z nich má své uplatnění v určitých oblastech. Mezi základní metody patří tyto:

- FDM/FFF
- SLA,
- SLS.

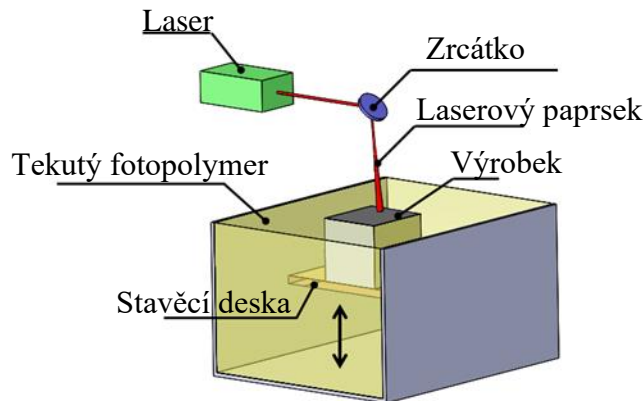
Tyto metody samozřejmě nejsou jediné. Několik dalších metod bylo vyvinuto a stále se vyvíjí a zdokonalují. Patří mezi ně například *Laminated Object Manufacturing* (LOM) využívající tenkou fólii jako materiál nebo metoda *Direct Energy Deposition* (DED), která místo nanášení vrstvy materiálu po celé tiskové ploše využívá trysek, které dodávají materiál přímo do místa tisku. [15]

FDM (*Fused Deposition Modeling*) je původním názvem dnes nejvíce rozšířeného způsobu 3D tisku. Princip této technologie je na pohybu hlavy s tryskou, která nanáší natavený plast na podložku (obr. 8). Pokud se jedná o díl se složitější geometrií, může být zapotřebí využít podpor. Tyto podpory se následně po vytištění odstraní. Celá tato operace však probíhá v uzavřené komoře s řízenou teplotou pro lepší tiskové podmínky. Tato technologie a název byly patentovány Scottem Crumpem. Rozvojem postupně vznikla metoda FFF (*Fused Filament Fabrication*), která byla zavedena skupinou RepRap. Jedná se v principu o stejnou technologii, ale FFF není obvykle provozována v tepelně řízené komoře. [15]



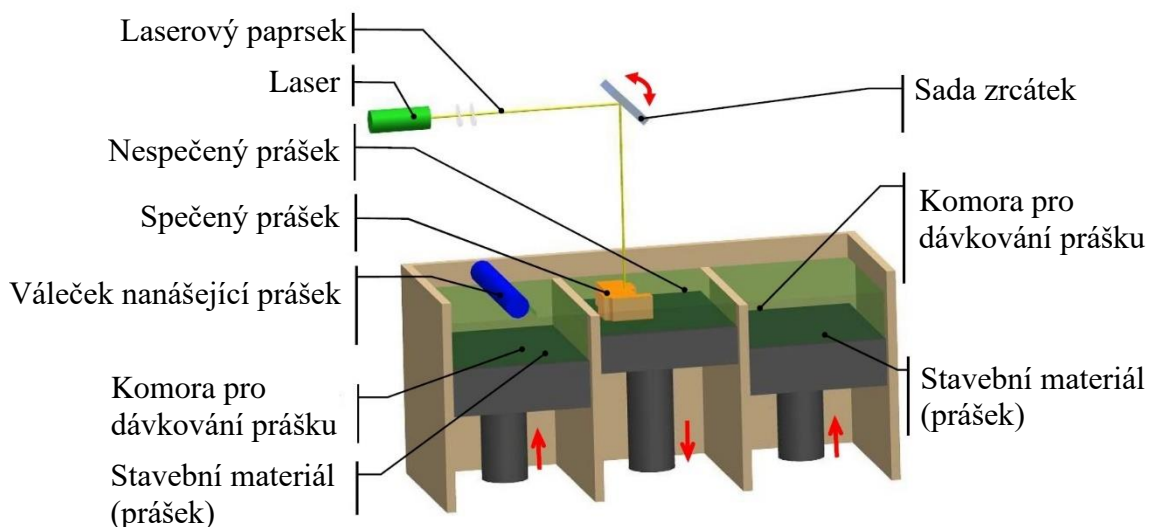
Obr. 8 Metoda FDM/FFF [16].

SLA (Stereolitografie) je metodou tisku s využitím pryskyřice (obr. 9). Na tiskové ploše je tekutá pryskyřice, která tvrdne za působení ultrafialového záření. Ultrafialový laserový paprsek po vrstvách vytvrzuje pryskyřici. Po vytvrzení vrstvy se tisková plocha posune o tloušťku další vrstvy a proces se opakuje. Jedná se o poměrně přesnou metodu, která zanechává relativně hladký povrch. Na rozdíl od FFF dosahuje SLA výrazně tenčích vrstev (přibližně 0,025 až 0,1 mm). Využívání laseru také přináší lepší přesnost v polohování nánosu další vrstvy (až 0,02 mm). Při tisku velkého dílu bude pravděpodobně zapotřebí využít podpor, které se následně po zhotovení odstraní. Tato metoda je poměrně drahá na provoz kvůli ceně pryskyřic a nutnosti důkladné údržby tohoto zařízení. [15]



Obr. 9 Metoda SLA [15].

SLS (*Selective Laser Sintering*) je další metodou využívanou pro tisk plastem (obr. 10), kdy tisk probíhá v komoře zaplněné inertním plynem. Při zahájení tisku tzv. *recoater* aplikuje tenkou vrstvu jemného prášku na tiskovou plochu, která je nahřata jeden stupeň pod teplotu tání daného materiálu. Za využití laseru dochází k následnému sintrování prášku. Sintrování neboli spékání je výrobní metoda, kdy je prášek převeden pod bod tavení. Může tak docházet k difuzi mezi jednotlivými zrny. Po dokončení sintrování vrstvy tisková deska poklesne o výšku další vrstvy a cyklus se opakuje, než dojde k dokončení tisku dílu. Výhodou této metody je možnost využívat širší spektrum materiálů. Také je méně materiálu spotřebováno na podpory. Uvnitř komory zůstává spousta nevyužitého materiálu, jelikož se nanáší tenká vrstva po celé tiskové ploše. Prášek je tedy nanášen na místa, kde jej není třeba pro tisk.



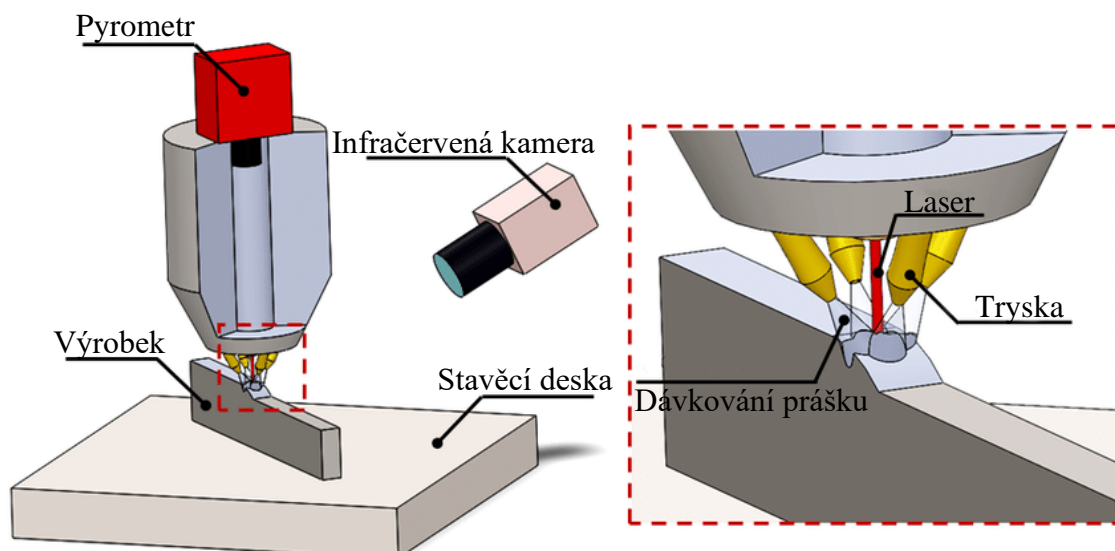
Obr. 10 Metoda SLS/DMLS [17].

Tisk kovem je též užívaným způsobem výroby dílů. Nabízí výhody v prototypování a výrobě geometricky složitých dílů. Často se využívá v kombinaci s generativním designem, jelikož díly navržené touto metodou bývají jinak těžko vyrobitelné.

Metody 3D tisku jsou rozděleny do těchto základních skupin [15, 18]:

- PBF – (*Powder Bed Fusion*) je obecný název pro technologii využívající tenkou práškovou vrstvu po celé tiskové ploše. Další dělení je dle využívané metody tavení.
 - DMLS/SLM – (*Direct Metal Laser Sintering*) je na stejném principu jako SLS při práci s plastem – také využívá laser pro roztavení prášku. Rozdíl je v potřebném výkonu laseru.
 - EBM – (*Electron Beam Melting*) je metoda využívající elektronového paprsku jako způsob tavení prášku.
- DED – (*Direct Energy Deposition*) je obecným názvem pro několik metod. Jedná se o způsob tisku, který dodává materiál přímo do oblasti tisku. Rozdílné jsou pouze způsoby roztavení materiálu. Vše probíhá v inertní atmosféře, aby se zabránilo oxidaci. Vstupní materiál v technologii DED je zpravidla prášek nebo drát.
 - LMD – (*Laser Metal Deposition*) využívá laser jako zdroj tepla (obr. 11). Od ostatních metod se nijak zvlášť neodlišuje. Jako vstupní materiál využívá prášek.
 - WAAM – (*Wire Arc Additive Manufacturing*) je metoda využívající elektrický oblouk pro tisk. Tato metoda byla založena na možnosti využití svařovacích zařízení za účelem tisku. Vstupním materiálem pro tuto metodu je drát.

V kategorii DED jsou i další metody. Například metoda PTA (*Plasma Transfer Arc*) a EBAM (*Electron Beam Additive Manufacturing*). Tyto metody jsou velmi podobné ostatním. PTA využívá plazmu pro tavení prášku, který je dodáván do místa tavení. EBAM využívá elektronový paprsek pro tavení práškového materiálu dodávaného do místa tavení. [15, 19]



Obr. 11 Metoda DED (LMD) [15].

4 NÁVRH RECYKLAČNÍHO ZAŘÍZENÍ

Zařízení je potřeba udržet cenově dostupné a jednoduché na operaci. Nabízí se několik možností, jak těchto předpokladů dosáhnout. Analyzovat tyto postupy řešení je důležité pro volbu potřebných dílů a návrh samotné jednotky. Dle principu výroby filamentu lze rozlišit:

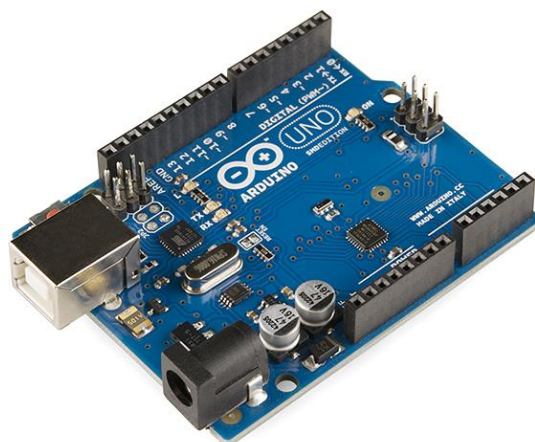
- Metoda protahování – polotovar v podobě pásku bude protahován přes nahřátou trysku o teplotě dle materiálu polotovaru. Konstrukčně jednodušší, bohužel přináší nevýhodu z hlediska kvality. Může docházet k degradaci polymeru v důsledku přehřátí. Materiál neprochází bodem tavení, projde jen přes bod skelného přechodu. Dosáhnout plné výplně průřezu filamentu je tedy velmi obtížné.
- Metoda protlačování – polotovar v podobě vloček je podáván šnekovým podavačem. Celá komora šnekového podavače je vyhřívána. Při této metodě materiál dosahuje bodu tavení a je protlačován tryskou. Za tryskou musí být následně ochlazen, nejčastěji ve vodní lázni. Konstrukce takového zařízení je výrazně dražší a náročnější. Vstupním materiálem jsou vločky, PET lahve by bylo nutno rozdrtit. Pro kontinuální výrobu filamentu se jedná o nejlepší možnost.

Zvolena je metoda protahování, která je pro občasnou tvorbu filamentu nejvhodnější a cenově nejodstropnější.

Zásadním bodem při návrhu je způsob řízení. Nabízí se tyto možnosti:

- Využit řídicí desky 3D tiskárny. Jedná se o konstrukčně nejjednodušší způsob, vše je již na desce připravené. Stačí jen zapojit napájení, elektromotor, čidla a připravit program v G kódu. Nevýhodou je horší možnost modifikace. Případné změny kódu desky jsou také problematické.
- Využit jednodeskový malý počítač. Příkladem takového mikropočítače je Arduino (obr. 12) nebo Nucleo. Jsou to programovatelné mikropočítače, které lze libovolně modifikovat. Zapotřebí je nutnost znát základy programování a elektrotechniky. Pro potřeby toho projektu by bylo nutné vytvořit PID regulátor pro teplotu. Využití jednodeskového malého počítače je univerzální způsob umožňující zapojení jakékoliv dodatečné elektroniky.

Při konstrukci je brána v potaz možnost využití náhradních dílů 3D tiskáren, tudíž návrh využije řídicí desku z 3D tiskárny. Způsob řízení deskou z 3D tiskárny přináší určité problémy, které je nutné vyřešit.



Obr. 12 Arduino UNO [20].

4.1 Technologie Fused Deposition Modeling

Metoda FDM využívá drát o definovaném průměru (1,75 mm) jako polotovar. Průměr je zapotřebí hlídat při návrhu a ověřování funkčnosti prototypu. Tento drát je natavován a následně nanášen po tenkých vrstvách (0,1 až 0,32 mm pro standardní trysku o průměru 0,4 mm). Materiálem používaným pro tisk je široké spektrum termoplastů (PET, PLA, PA atd.) do teploty tisku 300 °C. V tab. 1 jsou uvedeny základní doporučené hodnoty teplot trysky a podložky pro daný materiál.

Tab. 1 Nastavení teplot pro tisk [21].

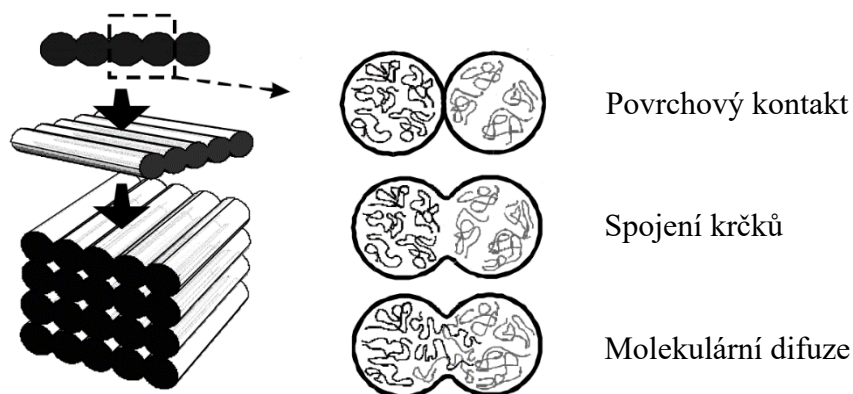
Materiál	Teplota trysky [°C]	Teplota podložky [°C]
PLA	185–235	50–60
PET-G	215–270	70–90
PA	240–285	70–115

Při tisku dílu může nastat několik typů spojení vláken (obr. 13). Typ spojení ovlivňuje mechanické vlastnosti vyhotoveného dílu. Nejslabšími místy je napojení vrstev.

Druhy spojení vláken [22]:

- bez kontaktu,
- povrchový kontakt,
- spojení krčků,
- spojení molekulární difuzí.

Při molekulární difuzi dochází k promíchání polymerních řetězců mezi vlákny. Nabízí tak nejlepší mechanické vlastnosti v mezivrstvě. Nejčastěji však nastává spojení krčků, popřípadě povrchový kontakt.



Obr. 13 Spojení vláken [22].

FDM tiskárny jsou děleny do dalších skupin dle typu mechanismu pohybu. Rozlišují se na kartézské, polární, DELTA, SCARA a průmyslové roboty. Kartézský mechanismus se dále dělí podle os. [23]

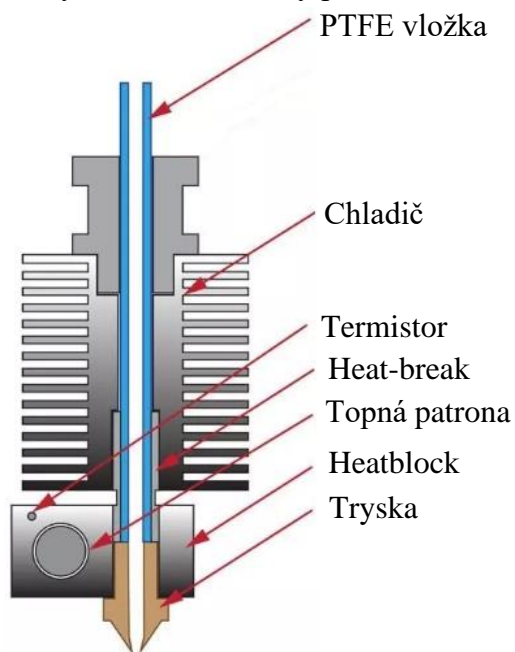
Kartézský mechanismus os XY využívají tiskárny MakerBot a Ultimaker. Tisková hlava se pohybuje ve dvou osách (X a Y). Tato konfigurace umožňuje vyšší rychlosti tisku. Tisková deska se pohybuje ve směru osy Z. [23]

Kartézský mechanismus os XZ využívají tiskárny Prusa i3, LulzBot a PrintrBot. Tisková hlava se stále pohybuje ve dvou osách (XZ). Tisková plocha se pohybuje v ose Y. Tato konfigurace může způsobovat vibrace. [23]

Kartézský systém X využívají tiskárny UP mini, MakerGear M2 a Felix. Tisková hlava se pohybuje jen v jedné ose (osa X). Tisková deska koná pohyb v ose Y a Z. Tato konfigurace umožňuje kompaktnější konstrukci rámu. [23]

SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) nabízí velmi jednoduchou a kompaktní konstrukci a vysokou rychlost tisku. Pro pohyb je využito více motorů. Synchronizace pohybu motorů je pro správnou funkci klíčová. [23]

Mechanické uspořádání delta nabízí vysokou rychlost tisku (obr. 15). Pohyb je realizován všemi pohony, nepohyblivá tisková plocha má pozitivní vliv na kvalitu tisku. Výška rámu je mnohem vyšší než tisknutelný prostor, dochází tedy ke ztrátě tuhosti konstrukce. [23]



Obr. 14 Hotend [24].



Obr. 15 Mechanismus delta [25].

Posledním mechanismem je robotické rameno. Nabízí velký tiskový prostor a možnost využít těžkých extruderů. Tisková plocha je nepohyblivá, robotické rameno umožňuje tisk v šesti osách a taktéž znatelně neplanární tisk. Problémem tohoto mechanismu jsou vysoká pořizovací cena a nestandardní *slicery*. [23]

Extruder je mechanismus, který posouvá filament do trysky. Rozlišují se dva typy. Pevně spojený s tiskovou hlavou a samostatný. Samostatný *extruder* je připevněn k rámu a přes bowden (PTFE trubice) podává filament do tiskové hlavy. Je pevně spjatý s tiskovou hlavou, podává filament na mnohem kratší vzdálenost a snižuje dobu odezvy. [23]

Hotend (obr. 14) je důležitou součástí každé FDM tiskárny. V trysce dochází k tavení filamentu. *Heat-break* je distanční prvek snižuje přenos tepla mezi tryskou a chladičem, PTFE (polytetrafluorethylen) vložka snižuje tření mezi *hotendem* a filamentem. *Heatblock* vede teplo mezi tryskou a topnou patronou. [23]

Některé tiskárny mají možnost střídat materiál při tisku. Tato funkce umožňuje měnit barvu nebo materiál filamentu během tisku. Změna materiálu filamentu se využívá při výrobě dílů s podporami nebo se specifickými požadavky. Podpory mohou být vyrobeny z materiálu, který je rozpustný v chemických sloučeninách nebo v čisté vodě. Příkladem ve vodě rozpustného materiálu je polyvinylalkohol (PVA).

Výměna materiálu může probíhat několika způsoby. Některé tiskárny mají do jedné trysky vyvedeno několik filamentů a jsou podávány dle potřeby. Druhou možností je mít pro každý materiál vlastní trysku.

Každá z metod má své výhody i nevýhody. Filamenty vyvedené do jedné trysky jsou kompaktnější, avšak nastává kontaminace protlačovaného filamentu zbytkovým množstvím z filamentu předchozího. Tryska pro každý filament zvlášť zabírá spoustu místa, nedochází však ke kontaminaci tlačného filamentu. Tiskárny využívající trysky pro každý filament mohou využívat možnosti vyměňovat celé tiskové hlavy.

4.2 Kupované díly

Některé díly není 3D tiskárna schopna vyrobit. Mezi takové díly například spadá řídicí deska, zdroj, displej, konektory, kabely a spojovací materiál. Výběr těchto dílů proběhl s důrazem na cenu a vhodnost pro danou aplikaci.

Pro řízení je využito staré řídicí desky z 3D tiskárny, přesněji z tiskárny Ender-3. Tato deska je vybrána z důvodu jednoduchosti získání za snížené ceny. Samozřejmostí je možnost využít jakékoliv programovatelné řídicí desky, jako je Arduino nebo Nucleo.

Pro zobrazení rozhraní byl využit oficiální displej pro tiskárnu Ender-3. Displej byl při konstrukci k dispozici a nebylo nutné vyhledávat jiné alternativy. Kombinace oficiálního displeje s řídicí deskou pro Ender-3 usnadnil konfiguraci systému. Nebylo třeba zasahovat do programování řídicí desky, neboť knihovny pro tento displej již byly nahrány. Jedná se o LCD displej typu 12 864. Pohledová plocha je o rozměrech 700 x 440 mm. Rozlišení je 128 x 64 bodů. Displej je modře podsvícen a jeho pracovní teplota je od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Napájecí napětí je 5 V.

Pro pohon navíjecí cívky je využit krokový motor Creality 42-40 NEMA 17 (obr. 17). Šířka a výška elektromotoru je 42 mm, délka 40 mm. Průměr hřídele je 5 mm, délka 22 mm. Délka kroku motoru je $1,8^{\circ}$. Z toho vyplývá, že motor udělá 200 kroků, než udělá plnou otočku o 360° . Záběrný moment je 0,54 Nm. Krokové motory velmi rychle ztrácejí výkon při zvyšování otáček. Pokud řízení bude probíhat na programovatelné řídicí desce Arduino či Nucleo, je potřeba zakoupit také *driver* pro krokový motor. Tento krokový motor je napájen jmenovitým proudem 1,5 A. Pro tento motor by mohl být použit *driver* TB6600 (obr. 16), ale při využití řídicí desky z 3D tiskárny není zapotřebí *driver* kupovat, jelikož řídicí deska má *driver* zabudovaný. [26]



Obr. 16 Driver pro krokové motory TB6600 [27].



Obr. 17 Krokový motor NEMA 17 [26].

Hotend s drobnou modifikací může sloužit pro natavování PET proužku na filament. Je využit *hotend* z tiskárny Ender-3, ale dá se využít *hotend* kterékoliv tiskárny. Mohou mít rozdíly v uchycení nebo rozměrech a může být zapotřebí modifikovat uchycení k zařízení.

Ohřev na provozní teploty probíhá za pomoci topného tělesa. Pro usazení do *hotendu* je nutné hlídat základní rozměry. *Hotend* má otvor pro topné těleso o průměru 20 mm. Vybrané topné těleso je napájeno 24 V s možným výkonem až 40 W.

Tepelné těleso zařídí ohřev, avšak není možné řídit teplotu bez snímače teploty. Zvolen je termistor s žáruvzdorným kabelem pod označením 100 k Ω NTC 3950. Jedná se o negistor, jehož odpor klesá s rostoucí teplotou. Tolerance měření je do 1 %. Odpor při 25 °C činí 100 k Ω a jeho materiálová konstanta je 3 950 K. Pomocí těchto parametrů lze stanovit rovnici, kterou se termistor řídí. Rozsah pracovních teplot je od -40 °C až po 300 °C. Pro potřebu výroby filamentu se teplota bude pohybovat maximálně do teploty 250 °C a pracovní teplota termistoru nebude překročena.

Výpočet pomocí aproximace R-T křivky s využitím materiálové konstanty B [28, 29]:

$$R(T) = R(T_0) \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad (4.1)$$

kde: R(T) – elektrický odpor [Ω] při teplotě T [K],
 R(T₀) – elektrický odpor [Ω] při pokojové teplotě T₀ [K],
 e – Eulerovo číslo [-],
 B – materiálová konstanta [K],
 T – teplota prostředí [K],
 T₀ – pokojová teplota [K].

Všechna tato zařízení musí být napájena. Přibližný výkon zdroje byl získán součtem všech příkonů dílčích součástí:

$$P = \sum_{i=1}^n P_n, \quad (4.2)$$

kde: P – příkon [W].

Pro výpočet příkonu připojených součástí byl využit tento vztah:

$$P = U \cdot I, \quad (4.3)$$

kde: P – příkon [W],
 U – napětí [V],
 I – proud [A].

Elektromotor je dvoufázový. Příkon na fázi elektromotoru s napájecím napětím 4,8 V a fázovým proudem 1,5 A je spočten dle vztahu (4.3):

$$P = U \cdot I = 4,8 \cdot 1,5 = 7,2 \text{ W}$$

Maximální příkon driveru při doporučeném napájecím napětí 32 V a výstupním proudu 1,5 A je spočten dle vztahu (4.3):

$$P = U \cdot I = 32 \cdot 1,5 = 48 \text{ W}$$

Příkon topného tělesa je poslední veličina, vstupující do výpočtu přibližného výkonu.

Dosazením do vztahu (4.2) byl vypočten přibližný výkon:

$$P = \sum_{i=1}^n P_n = P_1 + P_2 + P_3 = 7,2 \cdot 2 + 48 + 40 = 102,4 \text{ W}$$

Příkon driveru je připočten pro možnost úpravy konfigurace zařízení. Zdroj pro pohánění tohoto zařízení musí mít aspoň 102,4 W. Při návrhu byl použit zdroj s výkonem 350 W a 24 V (obr. 18). Tento zdroj byl k dispozici při návrhu.



Obr. 18 Zdroj s výkonem 350 W.

Pro připojení do elektrické sítě je potřeba koupit euro síťovou vidlici IEC C14 pro připojení napájecího kabelu – zakoupen je konektor s jištěním. Zakoupen byl také kolébkový spínač s podsvícením, jehož jmenovité napětí je 250 V a jmenovitý proud 15 A.

Pro přívod mezi zdrojem a základní deskou byl použit třížilový silový pohyblivý kabel pod označením H05VV-F. Kabel je určen pro aplikaci ve středně namáhaných instalacích v suchém prostředí. Pro připojení LCD displeje k řídicí jednotce byl využit plochý kabel s desetipinovým IDC konektorem. Kabel s konektorem XH2.54 byl využit pro připojení krokového motoru řady NEMA 17 k řídicí jednotce.

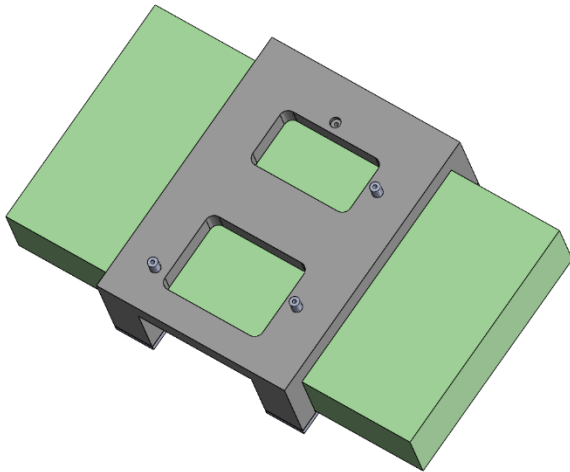
Pro usnadnění montáže je využito jen šroubů velikosti M3 a M5. Veškeré použité spojovací materiály jsou obsaženy v tab. 2. Pro připojení sítě ke zdroji jsou využity vidlicové koncovky. Připojení kolébkového spínače a síťové vidlice je přes koncovky faston o velikosti 6,3. Zdroj k řídicí jednotce je připojen přes vidlice a dutinky.

Tab. 2 Spojovací materiál.

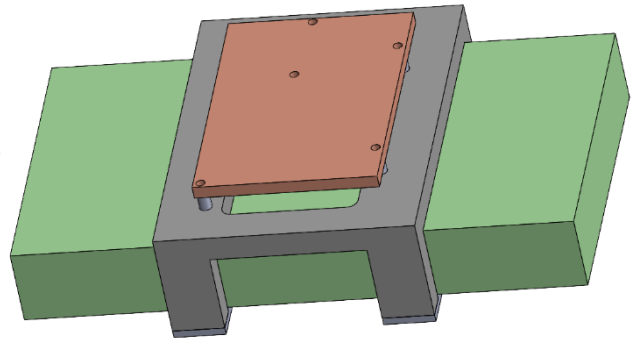
Typ šroubu	Šrouby	Maticе	Podložky
M3	18	10	18
M5	9	9	18

4.3 Návrh jednotky

Vybrané díly je nutné uložit a zakrytovat. Silové části nesmí být volně přístupné, aby nedošlo k úrazu elektrickým proudem. Pro kompaktnost je kryt zdroje využit jako hlavní nosná plocha pro zařízení. Nejprve bylo vyřešeno uložení řídicí desky (obr. 19, obr. 20) za použití konstrukce, která objímá zdroj (zelené těleso). Tím dojde k vymezení polohy uložení desky i zdroje vůči skříni. Jelikož deska nemůže volně ležet na rovné ploše, je využito distančních členů, které desku přidrží nad tělesem. Distanční prvky jsou zapuštěny 3 mm do tělesa a následně kyanoakrylátovým lepidlem slepeny. Těleso je odlehčeno pro snížení výrobních nákladů. Distanční členy i uchycení desky byly vyrobeny z materiálu PET-G metodou FDM. Deska je uchycena k tělesu pomocí šroubů M3.

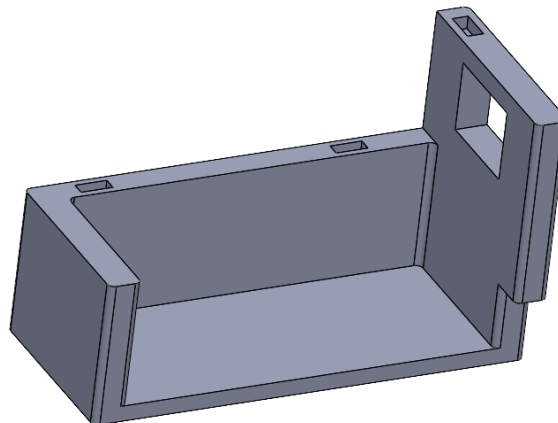


Obr. 19 Uložení řídicí jednotky.



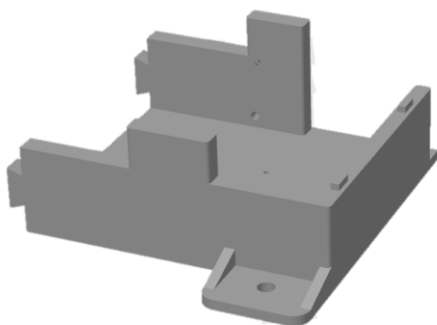
Obr. 20 Zobrazení uložení s řídicí jednotkou.

Kryt silové části má otvor pro uložení kolébkového spínače (obr. 21). Mezi zdrojem a krytem, kde se připojují kabely, musí být značná vůle kvůli uložení drátů. Dráty nesmí být příliš prohnuté, aby nedošlo k poškození spoje. Od kraje zdroje jsou ponechány mezery 30 mm. Pro uložení do příslušného protikusu jsou do krytu navrženy tvarové prvky (obr. 22, obr. 23). Přesnost tisku by mohla způsobit nedosednutí dílů vůči sobě, proto je pro kompenzaci vymodelován otvor o něco větší, než je rozměr protikusu. Otvor pro uložení kolébkového spínače je též zvětšen o 0,2 mm oproti doporučení výrobce pro lepší sestavitelnost. Tloušťka bočních stěn je zvolena 8 mm. Díl je tištěn z materiálu PET-G.

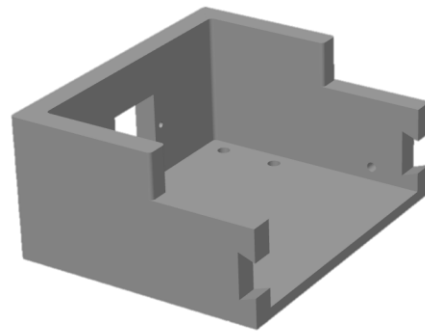


Obr. 21 Kryt silové části zdroje.

Horní kryt je největším dílem. Musí být rozdělen a tištěn na dva kusy. Tento kryt nese všechny prvky potřebné pro recyklaci PET lahví na filament. Pomocí programu OrcaSlicer je rozdělen na dva díly s lichoběžníkovou západkou (obr. 22, obr. 23).

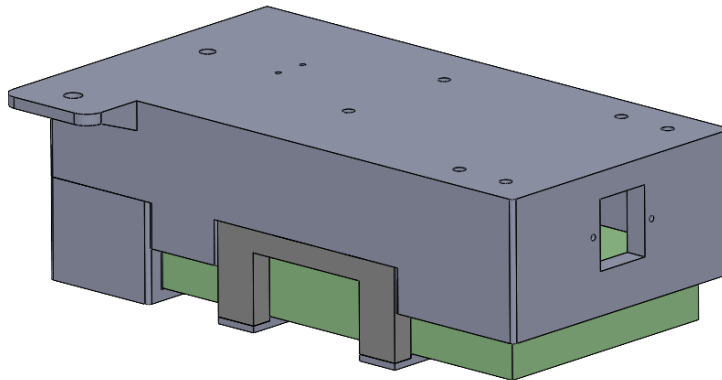


Obr. 22 Zadní část krytu.



Obr. 23 Přední část krytu.

Zdroj je plně zakrytován (obr. 24). Silové zakrytované části a řídicí deska jsou uloženy bezpečně uvnitř krytování. Zdroj je aktivně chlazen a jeho ventilátor je umístěn v otevřené části krytu, aby nedošlo k přehřátí zdroje. Zdroj je vyvýšen od podlahy o 5 mm, aby nebyl omezen přístup vzduchu k ventilátoru.



Obr. 24 Plně zakrytovaný zdroj.

Pro návrh pracovní části jednotky je zapotřebí udělat několik předpokladů. Po tažení musí mít filament konzistentní průměr 1,75 mm. Pro dosažení přetvoření PET proužku na filament s průměrem 1,75 mm musí být v každém okamžiku shodný příčný průřez proužku a filamentu. Tento fakt může být popsán rovnicí:

$$S_O = S_{\text{proužek}}, \quad (4.4)$$

kde: S_O – příčný průřez filamentu [mm^2],

$$S_O = \frac{\pi \cdot d_O^2}{4}, \quad (4.5)$$

kde: d_O – průměr filamentu [mm],

$S_{\text{proužek}}$ – příčný průřez proužku [mm^2],

$$S_{\text{proužek}} = t \cdot h, \quad (4.6)$$

kde: t – tloušťka stěny PET lahve [mm],

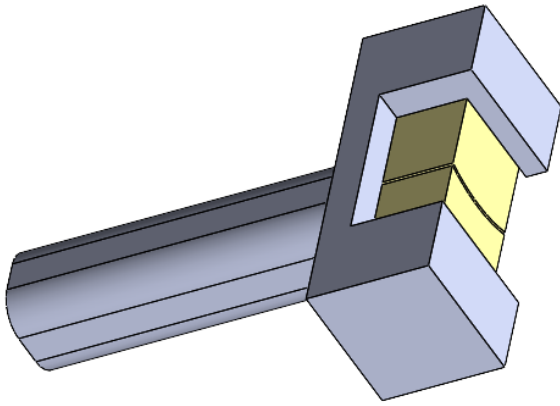
h – výška proužku PET lahve [mm].

Tloušťka stěny PET lahve je změřena na lahvi od nápoje Kofola. Změřená tloušťka je 0,2 mm a bude uvažována jako konstantní pro všechny lahve.

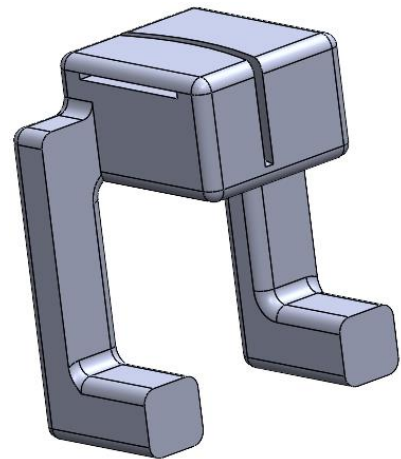
Dosažením vztahů (4.5, 4.6) do vztahů (4.4) a následným vyjádřením je určena výška proužku pro dosažení úplného vyplnění při protahování:

$$h = \frac{\pi \cdot d_O^2}{4 \cdot t} = \frac{\pi \cdot 1,75^2}{4 \cdot 0,2} = 12,03 \text{ mm}$$

Pro dosažení kompletního zaplnění příčného průřezu materiálem musí být minimální výška 12,03 mm. Při připuštění neúplného vyplnění průřezu budou pásy řezány na výšku 12 mm, přičemž výška pásu musí být konzistentní, jinak dojde ke změnám průřezu, které nepůjdou korigovat nastavením tiskárny. Prvním návrhem na řezání je ruční řezací přípravek s vyměnitelnými kameny (obr. 25). Tato konstrukce se neosvědčila, dochází k deformacím způsobujícím zajištění PET lahve pod kameny. Výška pásu je nestálá a docházelo k zadrhávání. Druhá konstrukce je jednodušší. Jedná se o jednoúčelový řezací přípravek přichycený ke stolu (obr. 26) tištěný jako jeden kus. PET lahev je vedena v definované drážce, ze které nemá, jak uhnout. Výška pásu je konzistentní. Stále je potřeba vyrovnávat PET lahev a udržovat ji ve správné poloze.



Obr. 25 Řezání filamentu s vyměnitelnými kameny.



Obr. 26 Jednoúčelový řezací přípravek.

Pro uskladnění pásky byla vymodelována cívka o šířce 13 mm. Tato cívka dokáže udržet maximálně $137\,837,38\text{ mm}^3$. Pokud bude uvažována hustota PET $1,38\text{ g/cm}^3$, může být spočtena celková hmotnost, kterou je jedna cívka schopna nést.

Výpočet hmotnosti na základě objemu:

$$m = \rho \cdot V, \quad (4.7)$$

kde: m – hmotnost [g],
 ρ – hustota [g/mm^3],
 V – objem [mm^3].

Dosazením do vzorce (4.7) je získána největší možná nosná kapacita cívky:

$$m = \rho \cdot V = 0,00138 \cdot 137\,837,38 = 189,59\text{ g}$$

Pokud je cívka zaplněna bez jakékoliv mezery, mohla by nést až 159,6 g. Hmotnost je ve skutečnosti menší z důvodu navíjení. Cívka je navržena s odlehčením pro snížení potřebného filamentu k tisku.

Pro navýšení krouticího momentu je krokový motor připojen na dvoustupňový převod. Převod byl realizován čelním přímým ozubením bez korekce. Modul je zvolen dle normy ČSN 01 4608 z řady 1., a to 1 mm.

Výpočet převodového čísla prvního stupně je definován vztahem:

$$u_{12} = \frac{z_2}{z_1}, \quad (4.8)$$

kde: u_{12} – převodové číslo [-],
 z_1 – počet zubů pastorku [-],
 z_2 – počet zubů kola [-].

Dosazením do vztahu (4.8) je určeno převodové číslo prvního stupně:

$$u_{12} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{52}{17} = 3,0588$$

Stejným vztahem (4.8) je spočítáno převodové číslo druhého stupně:

$$u_{34} = \frac{z_4}{z_3} = \frac{139}{17} = 8,1765$$

Celkové převodové číslo se vypočítá tímto vztahem:

$$u_{celk} = u_{12} \cdot u_{34}, \quad (4.9)$$

kde: u_{12} – převodové číslo prvního stupně [-],
 u_{34} – převodové číslo druhého stupně [-],
 u_{celk} – celkové převodové číslo [-].

Vztahem (4.9) je spočítáno celkové převodové číslo:

$$u_{celk} = u_{12} \cdot u_{34} = 3,0588 \cdot 8,1765 = 25,01$$

S vybraným počtem zubů, který dosahuje žádaného převodového čísla, je možné spočítat všechny rozměry ozubených kol. První je výpočet rozměrů kol prvního soukolí.

Čelní modul určen vztahem:

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta}, \quad (4.10)$$

kde: m_t – čelní modul [mm],
 m_n – normálový modul [mm],
 β – úhel sklonu zubu (pro přímá ozubení rovno 0) [°].

Pro výpočet čelního modulu je využit vztah (4.10):

$$m_t = \frac{m_n}{\cos \beta} = \frac{1}{\cos 0} = 1$$

Průměr roztečné kružnice je počítán vztahem:

$$d = m_t \cdot z, \quad (4.11)$$

kde: m_t – čelní modul [mm],
 z – počet zubů kola [-].

Čelní úhel záběru je spočten vztahem:

$$\alpha_t = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right), \quad (4.12)$$

kde: α_t – čelní úhel záběru [°],
 α_n – normálový úhel záběru [°],
 β – úhel sklonu zubu (pro přímá ozubení rovno 0) [°].

Vztah (4.12) je využit na výpočet čelního úhlu záběru:

$$\alpha_t = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\tan 20}{1} \right) = 20^\circ$$

Průměr základní kružnice je vypočítán vztahem:

$$d_b = d \cdot \cos \alpha_t, \quad (4.13)$$

kde: d_b – průměr základní kružnice [mm],
 d – průměr roztečné kružnice [mm],
 α_t – čelní úhel záběru (pro přímá ozubení rovno α_n) [°].

Průměr hlavové kružnice je vypočítán vztahem:

$$d_a = d + 2 \cdot m_n, \quad (4.14)$$

kde: d – průměr roztečné kružnice [mm],
 d_a – průměr hlavové kružnice [mm],
 m_n – normálový modul [mm].

Průměr patní kružnice je vyjádřen vztahem:

$$d_f = d - 2 \cdot (m_n + c), \quad (4.15)$$

kde: d_b – průměr základní kružnice [mm],
 d – průměr roztečné kružnice [mm],
 β – úhel sklonu zubu (pro přímá ozubení rovno 0) [°],
 c – hlavová vůle [mm],
 m_n – normálový modul [mm].

Výpočet osové vzdálenosti je dán vztahem:

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (4.16)$$

kde: d_1 – průměr roztečné kružnice pastorku [mm],
 d_2 – průměr roztečné kružnice kola [mm],
 a – osová vzdálenost [mm]

Výpočet hlavové vůle je dán vztahem:

$$c = 0,25 \cdot m_n, \quad (4.17)$$

kde: m_n – normálový modul [mm].

Tab. 3 Parametry prvního převodového stupně.

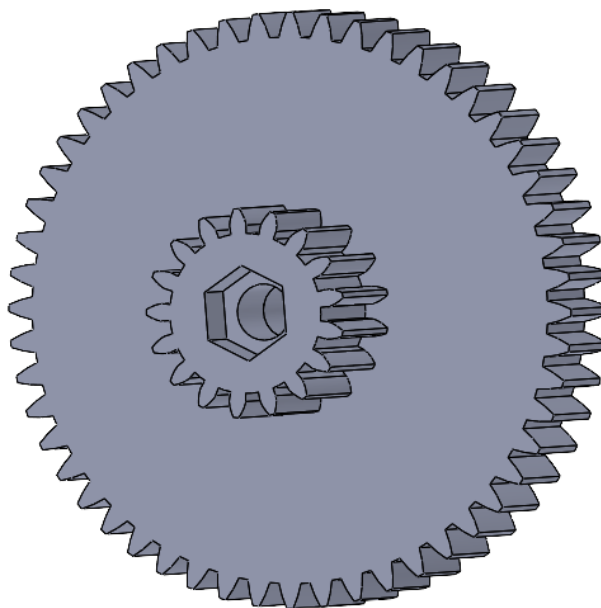
	Hnací pastorek	Hnané kolo
Průměr roztečné kružnice [mm]	17	52
Průměr hlavové kružnice [mm]	19	54
Průměr patní kružnice [mm]	14,5	49,5
Průměr základní kružnice [mm]	15,975	48,864
Osová vzdálenost [mm]	34,5	
Normálový modul [mm]	1	
Úhel profilu [°]	20	
Převodové číslo [-]	3,0588	
Šířka ozubení [mm]	10	

Hlavní geometrické rozměry potřebné pro konstrukci modelu soukolí (tab. 3). Pomocí softwaru SolidWorks a jeho přidruženého modulu Toolbox je soukolí vymodelováno. Každé ozubené kolo, které se přidá do hlavní sestavy, je navrženo zvlášť. Stejným způsobem je vyrobeno i druhé soukolí (tab. 4).

Tab. 4 Parametry druhého převodového stupně.

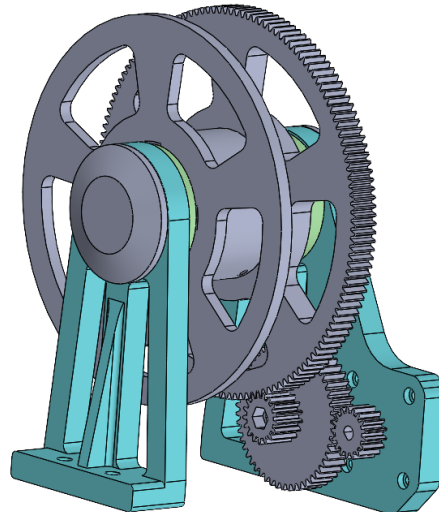
	Hnací pastorek	Hnané kolo
Průměr roztečné kružnice [mm]	17	139
Průměr hlavové kružnice [mm]	19	141
Průměr patní kružnice [mm]	14,5	136,5
Průměr základní kružnice [mm]	15,975	130,6173
Osová vzdálenost [mm]	78	
Normálový modul [mm]	1	
Úhel profilu [°]	20	
Převodové číslo [-]	8,1765	
Šířka ozubení [mm]	12	10

Převodová soukolí jsou navržena a nyní se musí uchytit ke zbytku sestavy. Pro uchycení je využito ramen, která nesou hřídele převodových soukolí. Pro snížení komplexity konstrukce je hnané kolo taktéž součástí navíjecí cívky. Pastorek prvního soukolí je pevně uchycen k hřídeli krokového motoru v uložení s přesahem. Hnané kolo prvního soukolí je spojeno s hnacím pastorkem druhého soukolí a je uloženo na předlohové hřídeli, kterou tvoří šroub M5 x 32 mm. Pro přenos krouticího momentu je ozubené kolo uchyceno do maticového insertu uvnitř kola (obr. 27). Pro zaručení hladkého chodu otáčení je předlohová hřídel uložena ve valivém ložisku firmy ZKL pod kódem 608-2RSR.



Obr. 27 Ozubené kolo předlohového hřídele.

Ramena jsou nezaměnitelná. Každé rameno má svou specifickou pozici, které náleží. První rameno má jen nosnou funkci pro navíjecí cívku, tedy i hnaného ozubeného kola druhého převodového stupně. Druhé rameno nese všechny převodové stupně a krokový motor. Navíjecí cívka je uložena s vůlí na trubce s vnitřním závitem. Závít slouží pro ustavení polohy. Pro správné uložení navíjecí cívky jsou z obou stran nasazeny distanční kroužky. Kroužky vymezí polohu cívky do místa záběru s protějším ozubeným kolem (obr. 28).

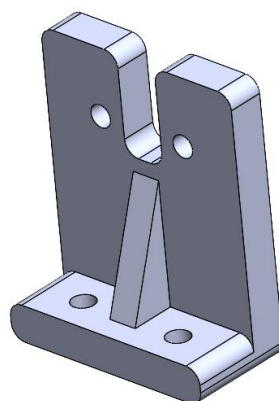


Obr. 28 Uložení navíjecí cívky a převodového soukolí.

Displej je uchycen podobným způsobem jako řídicí deska. Přes distanční prvky je upevněn ke stojánku displeje. Distanční prvky jsou zapuštěny 3 mm do stojánku a spojeny kyanoakrylátovým lepidlem. Displej je přichycen ke stojánku pomocí čtyř šroubů M3, které jsou navrtány do distančního tělesa. Zakrytování desky displeje je za pomoci krytu uchyceného ke stojánku přes tzv. Snap-Fit spojení.

Není žádané, aby filament opouštěl trysku pod úhlem. Kuželový vodící kámen je pro změnu úhlu navíjení přidán za tryskou. Kámen je volně uložen na ose. Umožní tak možnost navíjet filament na cívku rovnoměrně.

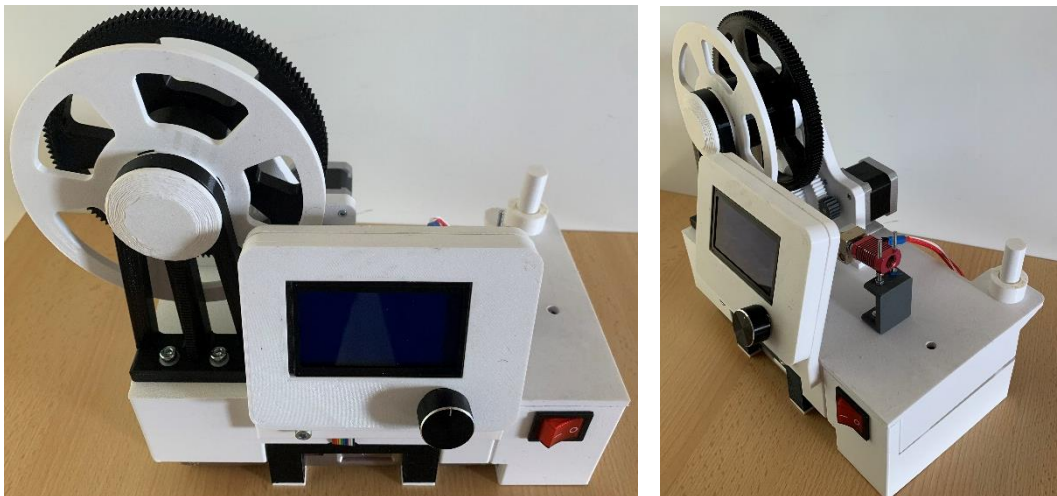
Při prvním návrhu je *heatblock* spojen přímo k plastovému držáku pomocí šroubů (obr. 29). Řešení není vhodné, teplota *heatblocku* je při prvním návrhu opomenuta. Teplota, při které probíhá přetváření PET pásku na filament, se pohybuje mezi 230 °C až 250 °C. Je nutné navrhnout uchycení *hotendu* (*heatblock* a chladič) tak, aby neroztavil nosné nebo jiné prvky konstrukce. Uchycení *hotendu* přímo přes šrouby k nosnému prvku způsobí roztavení nosného prvku. Přidání tepelně izolujícího prvku mezi nosný prvek a *hotend*, vyřeší tento problém, kdy keramická vložka je možným řešením. Přidání aktivního chladičího prvku k chladiči pro navýšení konvexního přenosu tepla do okolí pomůže snížit teplotu. Volba většího chladiče je krokem, který může vést k dostatečnému snížení teploty. Konstrukce je vyrobena z materiálu PET-G. Pokud teplota přesáhne 85 °C, dojde k překročení bodu skelného přechodu. Pro tento účel může být využito například dřevo, jako materiál mezi tryskou a uchycení ke konstrukci. Nemůže být však uchyceno bez dřívějšího ochlazení pod teplotu 170 °C [30]. Pod touto teplotou nebude docházet k termickému rozkladu [30].



Obr. 29 Návrh uchycení hotendu.

Pro protahování je použita modifikovaná tryska z tiskárny. Tryska z tiskárny o průměru 0,4 mm je na soustruhu nebo na vrtačce převrtaná na průměr 1,8 mm. Z důvodu teplotní roztažnosti a zúžení, způsobeného tažením, je tryska navrtaná na větší rozměr, než je průměr filamentu. Pro lepší zavádění a snížení rizika zaseknutí pásku je vstup do trysky kuželový. Výstup má zkosení hrany, kalibrační průměr je uvnitř trysky.

Všechny součásti jsou již navrženy a zařízení je připraveno na výrobu. Zhotovený prototyp zařízení je vidět na obr. 30. Protože řízení probíhá pomocí desky z 3D tiskárny, je nutné připravit program, podle kterého se bude řídit. Řízení kroků motoru je stejné, jako u počítačem řízených obráběcích strojů (CNC). Deska přijme instrukce v podobě G kódu a vykoná je. Kód, který odpovídá požadovanému výkonu, je přes mikro SD kartu nahrán a spuštěn. Nutno podotknout, že osy jsou na desce firmwarově limitované na celkovou posuvnou desku – je tedy nutno motor připojit na konektor extruderu. Extruder, jako jediný, nemá limitovanou maximální délku pojezdu. Pro využití konektorů pro pohyb v osách je nutno nahrát do desky modifikovaný firmware s posunutými mezemi. Zasahování do firmwaru je potenciálně nebezpečné a vyžaduje programátor s připojením do ISP (*In-System Programming*) konektoru. Obvykle tento konektor je šestipinový nebo desetipinový. Poskytuje nezbytná spojení pro programování. Využívaný protokol na této desce je SPI (*Serial Peripheral Interface*). SPI je sériová komunikace, kde data jsou posílána bit po bitu přes jedno datové vedení. SPI je duplexní, komunikace je umožněna současně v obou směrech. *Master* a *slave* mohou současně odesílat i přijímat data. *Master* je hlavní zařízení, které řídí komunikaci a *slave* čeká a reaguje na příkazy od hlavního zařízení, nemohou samy zahájit komunikaci. Výhodou SPI je vysoká rychlost přenosu díky duplex komunikaci a umožňuje komunikaci s více zařízeními. Nevýhodou je větší počet vodičů potřebných pro komunikaci.



Obr. 30 Prototyp zařízení.

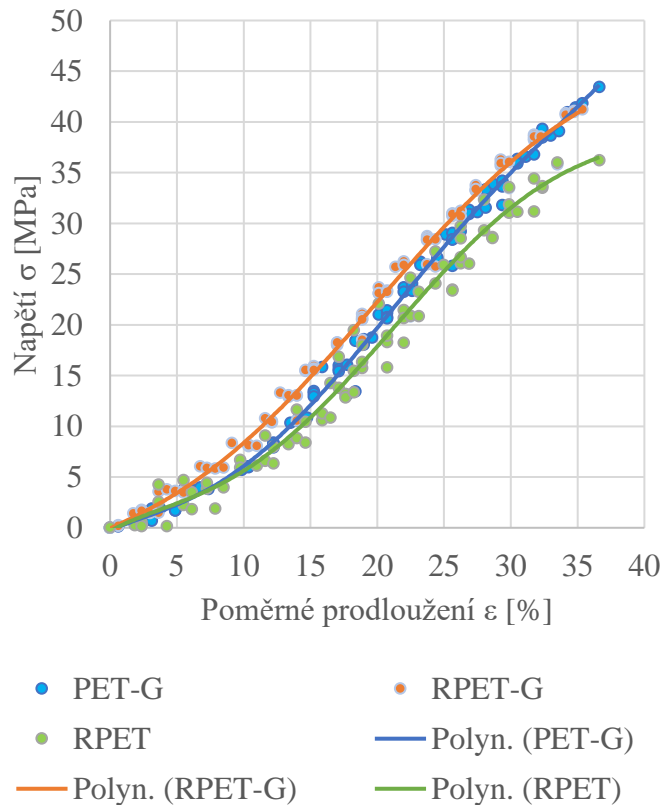
K porovnání mechanických vlastností je provedena tahová zkouška. Jsou zvoleny testovací vzorky z materiálu PET-G a komerčně prodávaného recyklovaného PET plastu z nápojových lahví. Při výrobě vzorků je vidět rozdílné chování za stejného nastavení tiskárny. Vzorky z recyklovaného PET je potřeba tisknout při vyšších teplotách (240 °C až 270 °C) než PET-G. Filament absorbuje okolní vlhkost mnohem rychleji – již po 2 hodinách se projevují náznaky nadměrně vlhkého filamentu. Z trysky se ozývá charakteristický praskající zvuk od unikajících vodních par a při tisku dochází k intenzivnějšímu vzniku vlásečnic. Filament je před tiskem vzorku sušen 5 hodin na teplotu 65 °C.

Vzorky jsou otestovány na trhacím zařízení (obr. 31). Trhací zařízení je omezeno na trhací sílu do 500 N. Příčný průřez musí být dostatečně malý, aby zařízení mohlo přetrhnout vzorek. Příčný průřez vzorku je 9 mm². Trhací vzorky nejsou uchyceny do čelistí – jsou umístěny do upínacího přípravku o specifickém tvaru. Vzorek je vložen a následně přetržen. Zařízení je dostačující na předběžné experimentální vyhodnocení.



Obr. 31 Trhací zařízení.

Naměřený průběh tahové zkoušky lze pozorovat v grafické závislosti na obr. 32. Testovány jsou komerčně dostupné materiály PET-G, recyklované PET-G a recyklované PET z lahví. Pro každý materiál je provedeno pět měření. Metodou nejmenších čtverců je znázorněn průběh tahové zkoušky. Na grafu lze pozorovat chování materiálu s nevýraznou mezí kluzu, materiály vykazují vůči sobě podobné vlastnosti. Nejmenší mez pevnosti vykazuje recyklovaný PET.



Obr. 32 Tahová zkouška.

5 ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ

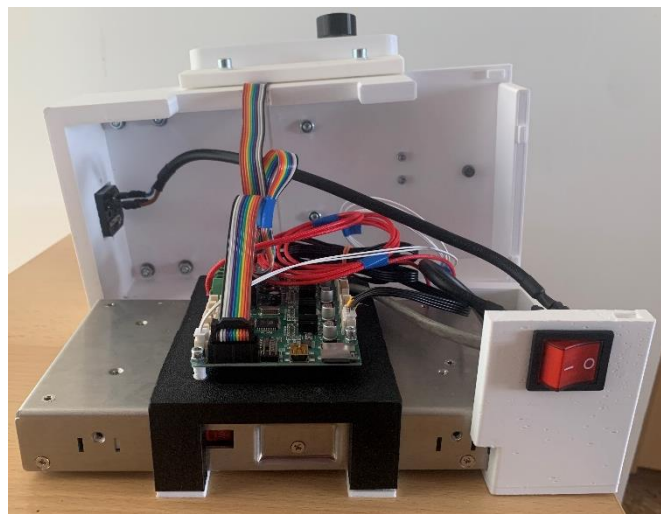
Součástí zadání je technické a ekonomické zhodnocení navrženého řešení. Hodnocen je návrh konstrukce a náklady na výrobu. Výrobní náklady jsou porovnány s komerčně dostupným zařízením.

5.1 Technické zhodnocení

Návrh krytů umožňuje rychlé otevření a složení zpět, možnost vyklopení horního krytu zjednoduší přístup k řídicí desce (obr. 33). Kabelové rozložení uvnitř jednotky komplikuje zpětné složení. Vedení kabelů a drátů je potřeba pozměnit (obr. 34). Zabudování konektorů do krytu pro snadnější připojení a odpojení je první zlepšení. Návrh dedikovaných prostorů a úchytů pro kabely je krokem pro úhlednější a jednodušší složení. Zavedení těchto změn přinese zlepšení přehlednosti uvnitř jednotky a sníží riziko neúmyslného poškození kabelů nebo jednotky.



Obr. 33 Vyklonění horního krytu.

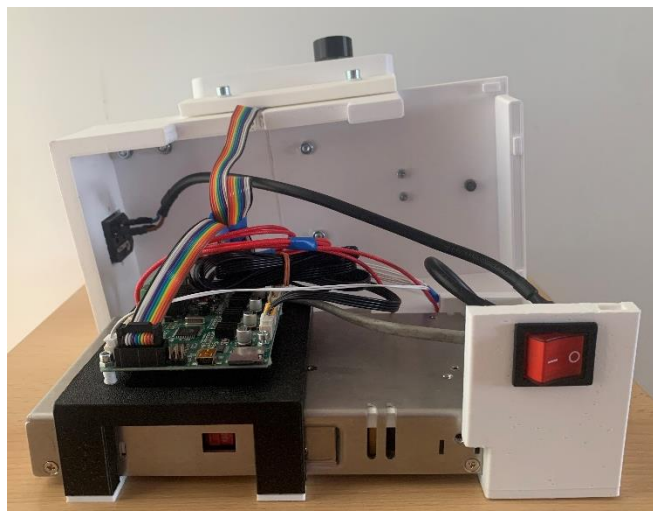


Obr. 34 Vnitřek jednotky.

Větší část hmotnosti jednotky je umístěna v méně podepřené oblasti a může tedy způsobit vypadnutí krytu z jeho tvarového úchytu k protikusu. Zvolení jiného tvarového spojení může vypadnutí z uchycení vyřešit (obr. 35). Změna dílu držící řídicí jednotku vyřeší problém s vypadnutím, stačí změnit polohu dílu posunutím blíže ke kraji, jak lze vidět na obr. 36.



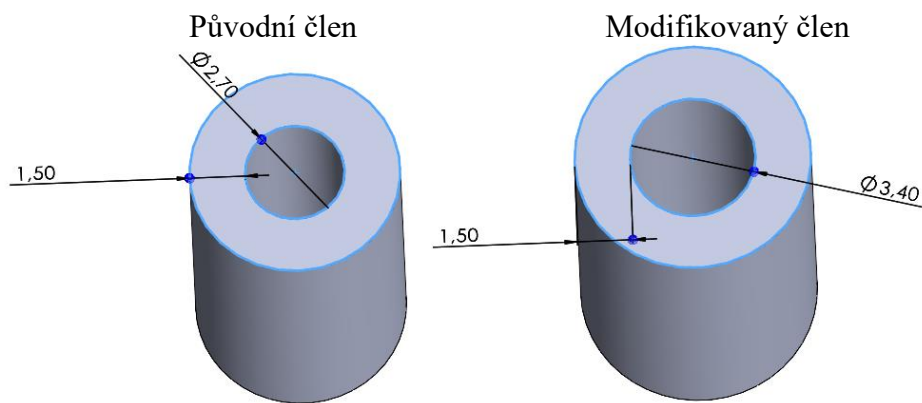
Obr. 35 Stávající tvarové prvky.



Obr. 36 Posunutí uchycení řídicí jednotky.

Tvarové prvky pro vymezení poloh nejsou zcela vhodné (obr. 35). Výrobní tolerance tiskárny může vést k obtížnému uložení dílů. Kvůli provedení konstrukce může dojít k uvolnění krytu. Náhradním řešením je spojení pomocí perodrážky nebo šrouby. Šrouby jsou jednoduchý a spolehlivý způsob spojení, ale výrazně prodlužují montáž a demontáž.

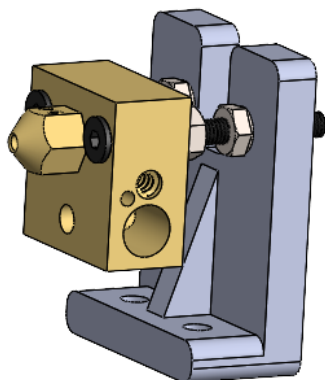
Distanční členy mezi deskami plošných spojů nejsou vhodně navrženy pro uchycení. Původním návrhem je zařezat šroub do distančního členu a uchytit tak desky ke krytu. Distanční členy jsou kyanoakrylátovým lepidlem spojeny ke krytu. Může dojít k selhání lepeného spoje a distanční člen se pod snahou zařezat šroub do členu začne protáčet. Řešením je průměr distančních členů vymodelovat větší, pro volný průchod šroubu. Původní vnitřní průměr distančního členu je 2,7 mm, tím umožňuje zařezání šroubu M3. Po úpravě je vnitřní průměr distančního členu je 3,4 mm dle ČSN EN 20 273 pro šroub M3 střední řady (obr. 37). Šroub je zařezáván do krytu, kde nenastane protočení z důvodu selhání lepeného spoje. Distanční členy nemusí být lepeny pro splnění své funkce po této úpravě.



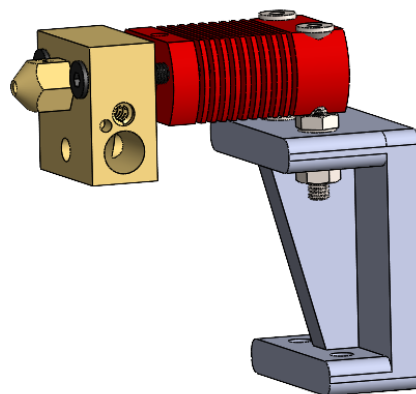
Obr. 37 Distanční členy.

Není potřeba měnit uchycení a krytování displeje. Může být přidán tvarový prvek pro přichycení kabelu, který vede k displeji. Pro řešení jsou na krytu displeje navrženy otvory, kterými budou provlečeny stahovací pásky.

Nosný prvek *heatblocku* je tepelně namáhán. Pokud je *heatblock* připojen přímo k plastovému držáku z PET-G (obr. 38), dojde k překročení teploty skelného přechodu. Návrh není adekvátní a je potřeba jej modifikovat. Místo využití jen *heatblocku* je možné využít celého *hotendu* bez *heatbreaku* (obr. 39). Pravděpodobně ani tato modifikace nebude dostatečná. Výměna za větší pasivní chladič povede ke změně teplotního gradientu a snížení tepla přiváděného k plastovému držáku. Zvětšení chladiče může být dostačující úprava. Přidání aktivního chladičového prvku přispěje k dalšímu snížení teploty; příkladem takového prvku je ventilátor, který zvýší konvekci tepla do okolí prouděním.

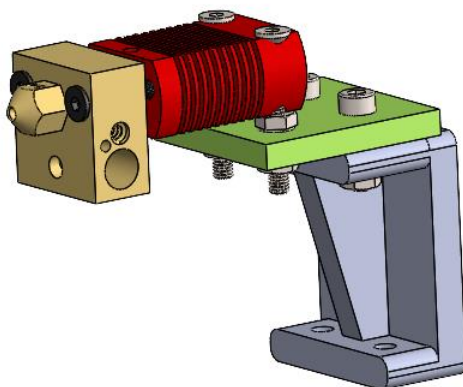


Obr. 38 Původní řešení s heatblockem.



Obr. 39 Řešení s hotendem.

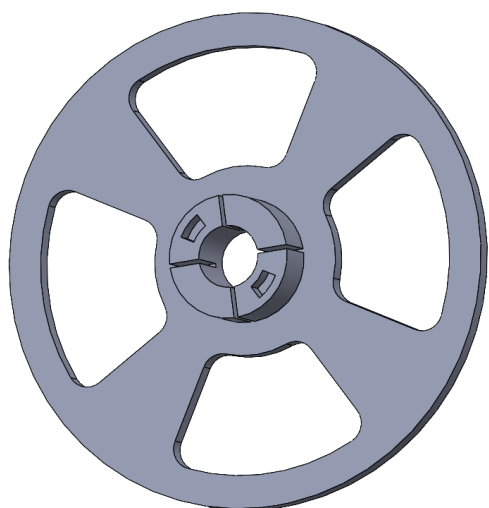
Alternativním řešením může být Peltierův článek. Pokud článkem prochází proud, dochází k ochlazování jedné strany článku. Druhá strana je ohřívána a je nutné ji chladit. Článek je možné chladit pasivně. Dalším možným řešením je oddělit PET-G držák a *hotend*, materiálem s nízkou tepelnou vodivostí – například využít keramické destičky a pokud teplota nepřekročí 170 °C, může být využito i dřeva [30].



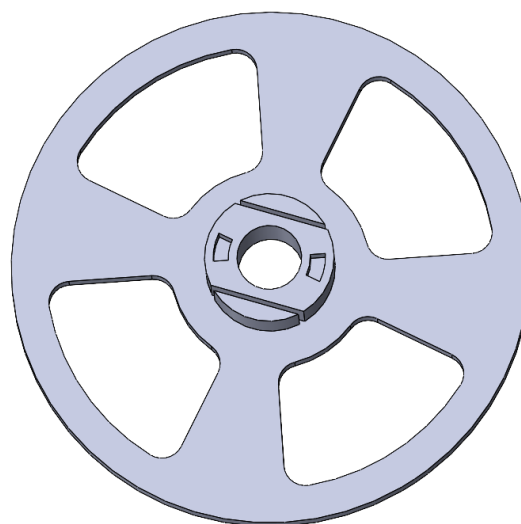
Obr. 40 Řešení s destičkou.

Držák může být také vyroben například z polyetherketonu (PEEK). PEEK má oproti PET-G mnohem vyšší tepelnou odolnost a tepelnou stabilitu. Teplota skelného přechodu pro PEEK nastává až od 143 °C [31].

Provedení cívky pro páskovanou PET lahev je vhodné modifikovat. Návrh řešení způsobí jemné drhnutí cívky na čepu při provléknutí pásku (obr. 41) a změnou konstrukce je možné problém eliminovat. Návrh cívky s hladkým chodem otáčení je na obr. 42.

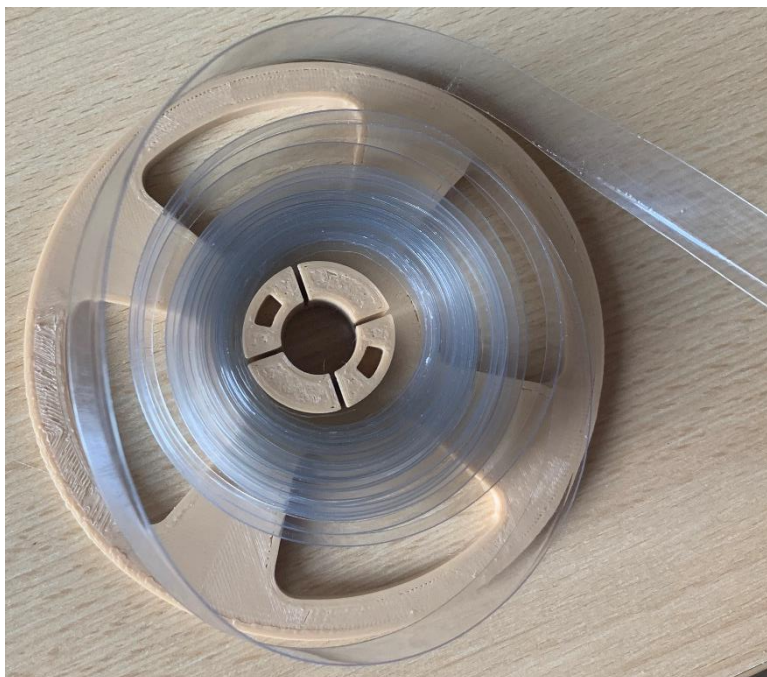


Obr. 41 Původní provedení cívky pro pásek.



Obr. 42 Modifikace cívky pro pásek.

Přípravek pro páskování PET lahví potřebuje drobné modifikace pro zlepšení manipulace. Uživatel přípravku musí manuálně korigovat pozici PET lahve pro konzistentní proužky. Zvýšení vodící výšky může napomoci ke stabilnějšímu záběru bez vstupu uživatele. Pásek je hladce oddělován od PET lahve pomocí bříty z odlamovacího nože. Ukázka namotané cívky s páskem je na obr. 43.



Obr. 43 Cívka s PET páskem.

5.2 Ekonomické zhodnocení

Pro vyhodnocení ceny prototypu je vypracován seznam zakoupených součástí a využitého filamentu. Vyhodnocením seznamu jsme schopni prototypu přiřadit přibližnou cenu. Při výpočtu ceny není uvažována elektrická energie potřebná na výrobu a lidská práce. Celková cena nákladů na výrobu prototypu bez těchto položek činí 3 697 Kč podle tab. 5.

Po provedení průzkumu trhu obdobných zařízení, například fungujících na principu protlačování, lze pozorovat výrazný cenový rozdíl (400 %). Zařízení je výrazně dražší než navržené řešení, avšak nabízí větší variabilitu využitelných materiálů. Díky tomu že zařízení přijímá drcený plast jako vstupní materiál není vázáno jen na PET lahve. Hlavní nevýhodou zařízení fungujících na principu protlačování je potřeba doprovodného zařízení – drtičky. [32]

Tab. 5 Cena dílů.

Díly	Pořizovací cena [Kč]
Spojovací materiál	217,-
Elektroinstalace	450,-
Krokový motor	360,-
Zdroj	785,-
<i>Hotend</i>	272,-
Displej	292,-
Řídící jednotka	821,-
Využitý filament	500,-
Výsledná cena	3 697,-

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá návrhem recyklačního zařízení pro výrobu 3D tiskového filamentu z použitých PET lahví. Cílem je vytvořit zařízení, které je kompaktní a jednoduché na výrobu. Teoretická část práce analyzuje současné metody recyklace. Ke každé metodě jsou rozepsány principy a výsledné produkty. Praktická část je zaměřena na návrh zařízení, které využívá páskované PET lahve, které jsou protahovány tryskou nahřátou na 240 °C. Tento přístup umožňuje relativně rychlou a jednoduchou přeměnu PET lahví na filament. Navržené zařízení je koncipováno s důrazem na kompaktnost. Model může produkovat filament, který by mohl konkurovat komerčně dostupným filamentům. Řádným vysušením pásovin se omezí vznik vodních par unikajících z trysky a dojde ke zlepšení povrchu filamentu.

Nevýhodou této metody je nízká produkce s velmi limitovaným vstupem polotovaru. Mohou být využity jen lahve, které se dají rozřezat na pásovinu. Při změně technologie z protahování na protlačování pomocí ohřívané komory se šnekovým podavačem je dosaženo lepší kvality a rovnoměrnosti filamentu. Zařízení je dražší z důvodu výroby komory a šnekového podavače a také z důvodu doprovodného drcení. Velkou výhodou metody protlačování je možnost jejího použití pro jakýkoliv materiál.

Podávání filamentu do 3D tiskárny je provedeno ozubenými koly, které vtahují filament do trysky. Návrh systému pro měření průměru filamentu, vystupujícího z trysky, umožní softwarové řízení teploty a rychlosti tažení pro dosažení konzistentnějšího výstupu.

Navržené ukotvení *hotendu* k zařízení je nedostačující a proto je nutná změna. Zapojení *hotendu* do původního návrhu konstrukce povede k změknutí držáku z důvodu překročení teploty skelného přechodu. Při pracovním cyklu vysoká teplota může zapříčinit odpadnutí *hotendu* z držáku a způsobit neopravitelné škody na zařízení nebo úraz na zdraví. Přidání materiálu s nízkou tepelnou vodivostí mezi držák a *hotend* vyřeší tento problém. Původní návrh uvažuje držák vyrobený z PET-G, pokud bude držák vyroben z PEEK, není nutné provádět žádné změny, neboť PEEK je tepelně odolný polymer. Cena zařízení výrazně naroste, na rozdíl od jiných řešení kvůli pořizovací ceně PEEKu.

Výhodou navrženého řešení je jednoduchost konstrukce a kompaktnost. Celé zařízení je možné přepravit v jedné ruce, jeho rozměry jsou 263 x 165 x 259 mm. Kompaktnost tiskárny umožní umístění do malých prostorů.

Závěrem je možné konstatovat, že všechny cíle bakalářské práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Prusa3D. *3D tiskárna Original Prusa MK4*. Online. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-mk4-2/>. [cit. 2024-03-12].
 2. BOTLAND . *Filament Velleman ABS 1,75 mm 0,75 kg - přírodní*. Online. Dostupné z: <https://botland.cz/abs-filamenty/10279-filament-velleman-abs-175-mm-075-kg-prirodni-5410329669744.html>. [cit. 2024-03-12].
 3. LENFELD, Petr. *Katedra tváření kovů a plastů*. Online. Skripta. Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm. [cit. 2024-03-13].
 4. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Verze knihy: 15. Online: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-66-3.
 5. Ensinger. *PET – polyethylentereftalát*. Online. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/konstrukcni-plasty/pet-polyester>. [cit. 2024-03-13].
 6. BĚHÁLEK, Luboš. *Navlhavost a sušení plastů*. Online. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6854933-Navlhavost-a-suseni-plastu.html>. [cit. 2024-03-13].
 7. SCHANDL, Albert; VÁCLAVÍK, Lukáš. *Recyklace plastů: proces a jeho problémy*. Online. Zajímej.se. Dostupné z: <https://zajimej.se/recyklace-plastu-proces-a-jeho-problemy/>. [cit. 2024-03-13].
 8. RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens a VAN GEEM, Kevin. *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. Online. *Waste management (Elmsford)*. 2017, roč. 69, s. 24-58. ISSN 0956-053X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>. [cit. 2024-03-13].
 9. THOMAS, Sabu; RANE, Ajay Vasudeo; KANNY, Krishnan; VK, Abitha a THOMAS, Martin George. *Chemical Depolymerization of PET Bottles via Combined Chemolysis Methods*. Online. *Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles*. United States: Elsevier, 2019, s. 135-147. ISBN 9780128113615. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811361-5.00007-9>.
 10. KAMENÍKOVÁ, Eliška. *Detekce PET mikroplastů v půdách*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Jiří Kučerík. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí, 2019. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/173462>. [cit. 2024-05-21].
 11. YANG, Ren-xuan; JAN, Kalsoom; CHEN, Ching-tien; CHEN, Wan-ting a WU, Kevin C.-W. *Thermochemical Conversion of Plastic Waste into Fuels, Chemicals, and Value-Added Materials: A Critical Review and Outlooks*. Online. *ChemSusChem*. 2022, roč. 15, č. 11, s. e202200171-n/a. ISSN 1864-5631. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/cssc.202200171>. [cit. 2024-05-21].
 12. ANUAR SHARUDDIN, Shafferina Dayana; ABNISA, Faisal; WAN DAUD, Wan Mohd Ashri a AROUA, Mohamed Kheireddine. *A review on pyrolysis of plastic wastes*. Online. *Energy conversion and management*. 2016, roč. 115, s. 308-326. ISSN 0196-8904. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>. [cit. 2024-03-14].
 13. MAQSOOD, Tariq; DAI, Jinze; ZHANG, Yaning; GUANG, Mengmeng a LI, Bingxi. *Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products*. Online. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2021, roč. 159. ISSN 0165-2370. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105295>. [cit. 2024-03-14].
-

-
14. MISKOLCZI, N.; BARTHA, L. a DEÁK, Gy. Thermal degradation of polyethylene and polystyrene from the packaging industry over different catalysts into fuel-like feed stocks. Online. *Polymer degradation and stability*. 2006, roč. 91, č. 3, s. 517-526. ISSN 0141-3910. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.01.056>. [cit. 2024-04-02].
 15. RAZAVYKIA, Abbas; BRUSA, Eugenio; DELPRETE, Cristiana a YAVARI, Reza. *An overview of additive manufacturing technologies-A review to technical synthesis in numerical study of selective laser melting*. Online. *Materials*. 2020, roč. 13, č. 17, s. 3895. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma13173895>. [cit. 2024-04-02].
 16. SEVAK, Chinmay. *Introduction to Fused Deposition Modeling (FDM)*. Online. University of Maryland. Dostupné z: [https://dozuki.umd.edu/Wiki/Introduction to Fused Deposition Modeling %28FDM%29](https://dozuki.umd.edu/Wiki/Introduction%20to%20Fused%20Deposition%20Modeling%20%28FDM%29). [cit. 2024-04-02].
 17. DK METAL PROMINENT. *Přehled technologií 3D tisku*. Online. Dkmp Nový Jičín, Ostrava. Dostupné z: <https://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3D-tisku>. [cit. 2024-04-02].
 18. GOKULDOSS, Prashanth Konda; KOLLA, Sri a ECKERT, Jürgen. Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting-selection guidelines. Online. *Materials*. 2017, roč. 10, č. 6, s. 672. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma10060672>. [cit. 2024-05-21].
 19. RÍOS, Sergio; COLEGROVE, Paul A. a WILLIAMS, Stewart W. Metal transfer modes in plasma Wire + Arc additive manufacture. Online. *Journal of materials processing technology*. 2019, roč. 264, s. 45-54. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.043>. [cit. 2024-05-21].
 20. SparkFun Electronics. *File: Arduino Uno - R3.jpg*. Online. Wikimedia Commons. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arduino Uno - R3.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arduino_Uno_-_R3.jpg). [cit. 2024-05-21].
 21. Prusa3D. *Prusa Tabulka Materiálů*. Online. Prusa Knowledge Base. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/materials>. [cit. 2024-05-21].
 22. SUN, Q.; RIZVI, G.M.; BELLEHUMEUR, C.T. a GU, P. *Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments*. Online. *Rapid prototyping journal*. 2008, roč. 14, č. 2, s. 72-80. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/13552540810862028>. [cit. 2024-05-21].
 23. DOČKAL, Kryštof; KŘIVOHLAVÝ, Petr. *Konstrukční uzly 3D tiskáren*. Cvičení. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 21. května 2024.
 24. Filament2Print. *Basic hotend maintenance*. Online. Dostupné z: https://filament2print.com/gb/blog/135_basic-hotend-maintenance.html. [cit. 2024-05-21].
 25. Adafruit Industries. *ORION Delta 3D Printer - Black*. Online. Flickr. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/adafruit/15870518462/>. [cit. 2024-05-21].
 26. FYSETC . *Nema 17 Stepper Motor 42-40 MS17HD2P420A-01 42 Motor 2.0A 2 Phase 1.8 Degree 2.74 V DC With Cable For Extruder CNC*. Online. Dostupné z: <https://www.fysetc.com/products/nema-17-stepper-motor-42-40-ms17hd2p420a-01-42-motor-2-0a-2-phase-1-8-degree-2-74-v-dc-with-cable-for-extruder-cnc>. [cit. 2024-05-21].
 27. Dratek.cz. *Driver pro krokové motory 4A TB6600*. Online. Dratek.cz. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/7899-driver-pro-krokovye-motory-4a-tb6600.html>. [cit. 2024-05-21].
-

28. LAVIČKA, Jiří. *Senzor měření rychlosti proudění vzduchu v elektrickém stroji*. Online, Diplomová práce, vedoucí Radek Vlach. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2018. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/82646>. [cit. 2024-05-21].
 29. NOVÁK, Milan. *NTC termistor Amphenol Advanced Sensors SC30F103V - nastavení, kalibrace, programování*. Online. VOXCAFE - internet full service. Dostupné z: <https://www.voxcafe.cz/index.php?article=/mindblog/clanky/arduino/ntc-termistor-amphenol-advanced-sensors-sc30f103v---nastaveni,-kalibrace,-programovani.html>. [cit. 2024-05-21].
 30. FABIÁN, Michal. *Samovznícení dřevěných konstrukcí ve vztahu k požární bezpečnosti komínů*. Online, Diplomová práce, vedoucí Maker Pokorný. Praha: České vysoké učení technické s Praze. Fakulta stavební. Katedra konstrukcí pozemních staveb. 2020. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/86763>. [cit. 2024-05-21].
 31. Ensinger. *PEEK – polyetheretherketon*. Online. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/vysokovykonne-plasty/peek>. [cit. 2024-05-24].
 32. ARTME 3D. Online. ARTME 3D. Dostupné z: <https://artme-3d.shop/>. [cit. 2024-05-24].
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
a	osová vzdálenost	[mm]
b	šířka ozubení	[mm]
d	průměr roztečné kružnice	[mm]
d _a	průměr hlavové kružnice	[mm]
d _b	průměr základní kružnice	[mm]
d _f	průměr patní kružnice	[mm]
d _o	průměr filamentu	[mm]
h	výška PET proužku	[mm]
I	elektrický proud	[A]
m	hmotnost	[kg]
m _n	normálový modul	[mm]
m _t	čelní modul	[mm]
P	výkon	[W]
p _{po}	parciální tlak páry okolí	[Pa]
p _{pp}	tlak páry těsně nad povrchem sušeného materiálu	[Pa]
R	elektrický odpor	[Ω]
S	příčný průřez	[mm ²]
T	teplota prostředí	[K]
t	tloušťka PET proužku	[mm]
T _o	pokožová teplota	[K]
U	elektrické napětí	[V]
u	převodové číslo	[-]
V	objem	[mm ³]
z	počet zubů	[-]
α_n	normálový úhel záběru	
α_t	čelní úhel záběru	
β	úhel sklonu zubu	

Zkratky

Označení	Legenda
DED	Direct Energy Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DMT	Dimethyl-terephthalát
EBAM	Electron Beam Additive Manufacturing
EBM	Electron Beam Melting
EG	Ethylenglykol
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
ISP	In-System Programming
LCD	Liquid Crystal Display
LDPE	Low Density Polyethylen
LMD	Laser Metal Deposition
PA	Polyamid
PBF	Powder Bed Fusion

PE	Polyethylén
SPI	Serial Peripheral Interface
Označení	Legenda

PEEK	Polyetherketon
PET	Polyethylén-tereftalát
PET-G	Polyethylene terephthalate glycol modified
PLA	Kyselina polymléčná
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PTA	Plasma Transfer Arc
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVA	Polyvinylalkohol
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
TPA	Kyselina tereftalová
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Přední pohled na prototyp
Příloha 2 Pohled z boku na prototyp
Příloha 3 Zadní pohled na prototyp
-

