

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MECHANIKY, BIOMECHANIKY A MECHATRONIKY

Odbor mechaniky a mechatroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Automatizace snímání výrobků z FDM 3D tiskárny

Autorka: Eliška Matásková

Vedoucí práce: Ing. Pavel Steinbauer, Ph.D.

Praha, 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Matásková** Jméno: **Eliška** Osobní číslo: **492481**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Automatizace snímání výrobků z FDM 3D tiskárny

Název bakalářské práce anglicky:

Automation of product removal from FDM 3D printer

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s aditivní technologií FDM
2. Proveďte rešerši existujících metod pro automatické snímání výrobků z FDM tiskárny
3. Navrhněte přípravek pro automatizaci postupu snímání výrobku z 3D tiskárny Průša, spočívající v prostorově složitě deformaci pružinového plátu
4. Vytvořte model přípravku a pružinového plátu metodou konečných prvků a ověřte dovozená napětí v plátu
5. Zkonstruujte funkční vzorek přípravku a ověřte jeho funkčnost

Seznam doporučené literatury:

ŠPANIEL, Miroslav; HORÁK, Zdeněk. Úvod do metody konečných prvků. České vysoké učení technické, 2011.
Firemní literatura SolidWorks
Attaran Mohsen 2017, The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing.
Business Horison, Volume 60, Issue 5. P. 677-688.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Steinbauer, Ph.D. odbor mechaniky a mechatroniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **22.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Pavel Steinbauer, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem k tomu pouze zdroje, které jsou uvedeny v seznamu literatury na konci této práce.

V Praze dne

.....

Eliška Matásková

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat panu Ing. Pavlu Steinbauerovi, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za veškerou trpělivost, ochotu, cenné rady a pomoc při tvorbě této práce. Dále děkuji panu Ing. Vítu Pawlikovi za poskytnutí 3D výtisku pro protažení. V poslední řadě děkuji své rodině, partnerovi a přátelům za podporu během celého studia.

Anotační list

<i>Jméno autorky:</i>	Eliška Matásková
<i>Název bakalářské práce:</i>	Automatizace snímání výrobků z FDM 3D tiskárny
<i>Anglický název:</i>	Automation of product removal from FDM 3D printer
<i>Akademický rok:</i>	2021/2022
<i>Studijní obor:</i>	Teoretický základ strojního inženýrství
<i>Ústav, obor:</i>	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Odbor mechaniky a mechatroniky
<i>Vedoucí bakalářské práce:</i>	Ing. Pavel Steinbauer, Ph.D.
<i>Bibliografické údaje:</i>	48 stran 43 obrázků 1 graf 1 tabulka 1 x CD příloha
<i>Klíčová slova:</i>	3D tisk, FDM 3D tisk, tisková podložka, automatické snímání výrobků z 3D tiskárny
<i>Keywords:</i>	3D print, FDM 3D print, print bed, automation of product removal from 3D printer

Abstrakt: Tato práce se zabývá návrhem přípravku pro automatizaci snímání hotových výrobků z FDM 3D tiskárny Original prusa MINI+. Je rozdělena do dvou částí – teoretické a praktické. Teoretická část seznamuje čtenáře s FDM 3D tiskem a způsoby manuálního a automatického snímání výrobků z FDM 3D tiskáren. Praktická část se zabývá návrhem, výrobou a ověřením funkčnosti přípravku pro automatizaci snímání výrobků z FDM 3D tiskárny Original prusa MINI+.

Abstract: This thesis deals with the design of a device for automating the removal process of finished products from the FDM 3D printer Original prusa MINI+. It is divided into two parts - theoretical and practical. The theoretical part introduces the reader to FDM 3D printing and methods of manual and automatic products removal from FDM 3D printers. The practical part deals with the design, production and verification of the functionality of the device for automating the removal process of products from the FDM 3D printer Original prusa MINI+.

Obsah

1	Úvod.....	7
1.1	Cíl práce.....	8
TEORETICKÁ ČÁST		9
1	3D tisk.....	9
1.1	Princip 3D tisku	9
1.2	Technologie 3D tisku	10
2	Způsoby snímání výrobků z FDM 3D tiskárny	17
2.1	Manuální snímání	17
2.2	Automatické snímání.....	18
PRAKTICKÁ ČÁST		24
1	Návrh přípravku pro automatizaci postupu snímání výrobku z FDM 3D tiskárny	24
1.1	Myšlenka provedení	24
1.2	Návrh	25
2	Postup vytvoření modelu přípravku a plátu metodou konečných prvků ve výpočetním softwaru	28
2.1	Postup tvoření simulace.....	28
3	Kontrola dovolených napětí v pružinovém plátu tiskárny.....	32
4	Konstrukce, výroba a ověření funkčnosti přípravku	36
4.1	Konstrukce a výroba.....	36
4.2	Ověření funkčnosti přípravku.....	36
Závěr		41
Seznam literatury		43
Seznam obrázků, grafů a tabulek.....		46
Seznam elektronických příloh		48

1 Úvod

Přestože byl FDM 3D tisk ještě donedávna považován jen za jakousi obskurní technologii, v posledních desetiletích se čím dál více stává nezbytnou součástí mnoha strojírenských podniků. Umožňuje jim rychle, efektivně a levně zhmotňovat konstrukční nápady bez nutnosti odebrání materiálu složitými nástroji nebo vytváření komplikovaných tvarů vstřikovacích forem. Právě díky tomu má v současné době potenciál stát se prostředkem masivní sériové výroby. [1]



Obrázek 1: 135 FDM 3D tiskáren připravených k sériové výrobě [1]

Použití FDM 3D tiskáren k sériové výrobě má však své úskalí. Tím je skutečnost, že když tiskárna dokončí požadovaný výrobek, přilepí se jeho první vrstva vlivem natavení a zchladnutí materiálové struny k tiskové podložce. Z tohoto důvodu je třeba zaměstnávat obsluhu, která k hotovému výtisku přijde, manuálně jej sejme a spustí další tisk. Tiskárna je tak nucena na určitý čas pozastavit svou činnost, čímž se snižuje její produktivita. Tomu bychom mohli zabránit nalezením vhodného řešení automatizace celého procesu snímání hotových výrobků. S jeho zavedením by FDM 3D tiskárny mohly vyrábět výtisky seřazené v dlouhých tiskových frontách v podstatě nepřetržitě. [2]

Některá řešení automatizace snímacího procesu z FDM 3D tiskáren v současné době již existují, ale každé z nich zahrnuje určité nevýhody jeho použití. Tato bakalářská práce se těmito řešeními zabývá. Představuje jejich nedostatky, na jejichž základě realizuje nápad lepšího řešení, a to pro konkrétní FDM 3D tiskárnu - Original prusa MINI+.

1.1 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je navrhnout přípravek pro automatizaci snímacího procesu hotových výrobků z FDM 3D tiskárny Original prusa MINI+. Toho docílit na základě představení nedostatků již existujících způsobů automatického snímání hotových výrobků z FDM 3D tiskáren.

Práce je rozdělena do dvou částí, a to teoretické a praktické. Stanoveného cíle je dosaženo splněním následujících dílčích úkolů obou částí.

TEORETICKÁ ČÁST

1. Představení technologie FDM 3D tisku, typy FDM 3D tiskáren, jejich stavba a mechanismy tisku.
2. Vytvoření rešerše již existujících způsobů manuálního a automatického snímání hotových výrobků z FDM 3D tiskáren.

PRAKTICKÁ ČÁST

1. Návrh přípravku pro automatizaci postupu snímání výrobku z FDM 3D tiskárny Original prusa MINI+ spočívající ve složité prostorové deformaci pružinového plátu.
2. Vytvoření modelu přípravku a plátu metodou konečných prvků ve výpočetním softwaru.
3. Provedení kontroly dovolených napětí v pružinovém plátu tiskárny.
4. Konstrukce, výroba a ověření funkčnosti vzorku přípravku.

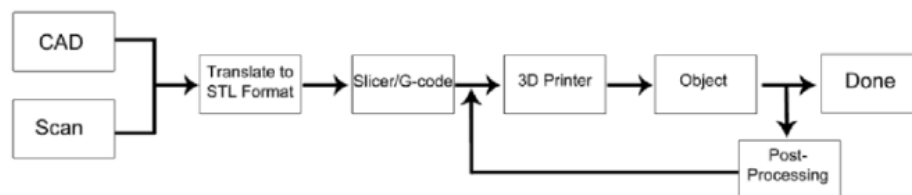
TEORETICKÁ ČÁST

1 3D tisk

3D tisk nebo také aditivní výroba (anglicky 3D printing neboli additive manufacturing (AM)) je proces tvorby třídimenzionálních pevných objektů z digitálního souboru. V aditivních procesech je objekt vytvořen pokládáním souvislých vrstev materiálu na sebe tak dlouho, dokud není celý výrobek dokončen. Výrobění produktů 3D tiskem, narozdíl od klasických metod jako jsou CNC obrábění (substraktivní výroba) nebo lití do formy, šetří čas, množství odpadu, použitého materiálu ale hlavně peníze. [3]

1.1 Princip 3D tisku

Základní princip 3D tisku začíná sestavením virtuálního modelu objektu, který chceme tisknout. Ten se nejčastěji tvoří pomocí CAD (Computer-Aided Design) softwaru nebo 3D skeneru. Nejprve je tento model uložen do formátu, který je 3D tiskárna schopna rozpoznat. Jedná se o formát STL. Následně je model pomocí slicer softwaru “rozřezán” do takového počtu vrstev, který je potřeba, v závislosti na požadované přesnosti vytvářené geometrie výtisku. Výstupem tohoto softwaru je g-kód, který je následně poslán do 3D tiskárny. Ta na jeho základě vytváří finální výrobek. Jeho tvorba může trvat několik minut až hodin v závislosti na požadované velikosti výrobku, složitosti jeho geometrie nebo počtu tiskových materiálů, ze kterých je složen. Po dokončení 3D tisku je finální výrobek kontrolován uživatelem tiskárny, který většinou jeho geometrii podle svých požadavků vylepšuje, dokud není spokojen. Následující obrázek tento princip znázorňuje.



Obrázek 2: Základní princip 3D tisku [4]

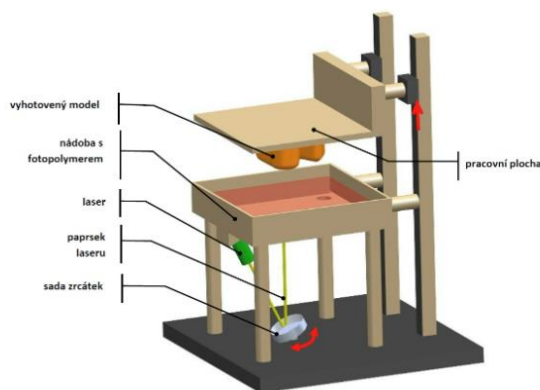
Existují však i jiné principy 3D tisku v závislosti na použité technologii. [4]

1.2 Technologie 3D tisku

Nabízí se několik způsobů, jak tisknout, všechny jsou však aditivní. Liší se cenou, způsobem, kterým jsou vrstvy materiálu přidávány na sebe, podobou materiálu a použitím hotových výrobků. Nejznámější z nich jsou uvedeny níže.

Stereolithography (SLA)

Jedná se o nejstarší z metod. Využívá různých umístění laseru a pracovní plochy vůči sobě za účelem vytvrzování tekutého materiálu vrstvu po vrstvě v konečný výrobek. Tímto tekutým materiálem jsou fotopolymery, nejčastěji fotopolymerická pryskyřice.

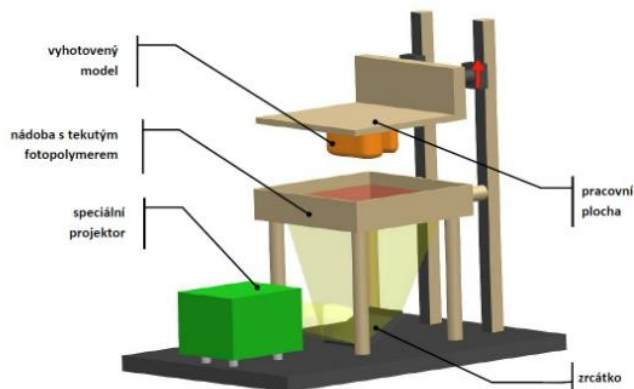


Obrázek 3: Technologie SLA [5]

Výhodou této technologie je výborná přesnost v řádu mikronů. Nevýhodou však může být skutečnost, že je výběr tiskového materiálu omezen pouze na fotocitlivé materiály. Výrobky se také po vytisknutí musí dale dotvrdit, aby se zlepšily jejich mechanické vlastnosti.

Digital Light Processing (DLP)

Princip je podobný jako u SLA. Energie vzniklá UV zářením vytvrdí tekutý materiál do požadovaného tvaru. Tímto tekutým materiálem jsou fotopolymery, nejčastěji fotopolymerická pryskyřice. Namísto laseru, jako u SLA, však DLP využívá speciální projektor, který vytvrdí celou pracovní plochu v jedné vrstvě. Tisk výrobků je tak oproti jiným technologiím rychlý.



Obrázek 4: Technologie DLP [5]

Tisk metodou DLP je levný a přesný. Jeho nevýhody jsou stejné jako u SLA. Omezení tiskového materiálu na fotopolymery a potřeba hotové výrobky ještě dále dotvrdit. [5]

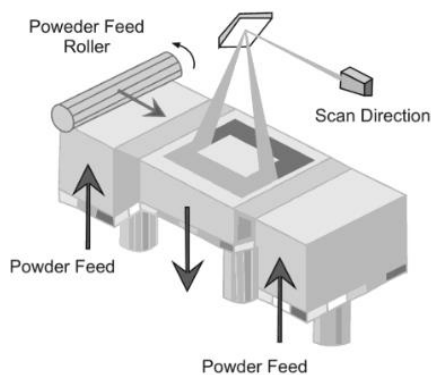
Selective Laser Sintering (SLS)

Využívá práškového materiálu, který je pomocí tepelné energie vyzařené laserem vrstvu po vrstvě zapékán v požadovaný výrobek. Protože SLS tiskárny po každém jednom zapečení přidávají další vrstvu práškového materiálu, je výrobek tímto práškem obklopen a nepotřebuje tak žádné podpurné struktury. Tímto práškovým materiálem může být například nylon, keramika, sklo, ocel nebo třeba stříbro.

Selective Laser Melting (SLM)

Velmi podobný SLS, nedochází však k zapékání práškového materiálu, ale jeho úplnému roztavení. Vzniká tak homogenní výrobek, který má lepší fyzikální vlastnosti než výrobek tvořený technologií SLS. Materiálem, ze kterého se prášek skládá může být hliník, korozivzdorná ocel nebo třeba titanium.

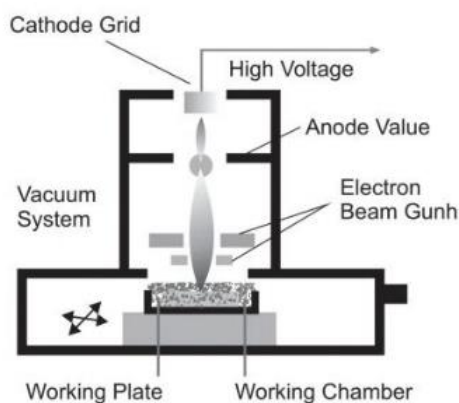
SLM tiskárny k tavení práškového materiálu využívají mimořádně silné lasery usměrňované speciálními zrcadly, jak je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obrázek 5: Technologie SLM [6]

Electronic Beam Melting (EBM)

Využívá kovového prášku nebo struny, které jsou umístěny do vakua a roztaveny proudem elektronů řízeným magnetickým polem. Tento princip je znázorněn na následujícím obrázku.



Obrázek 6: Technologie EBM [6]

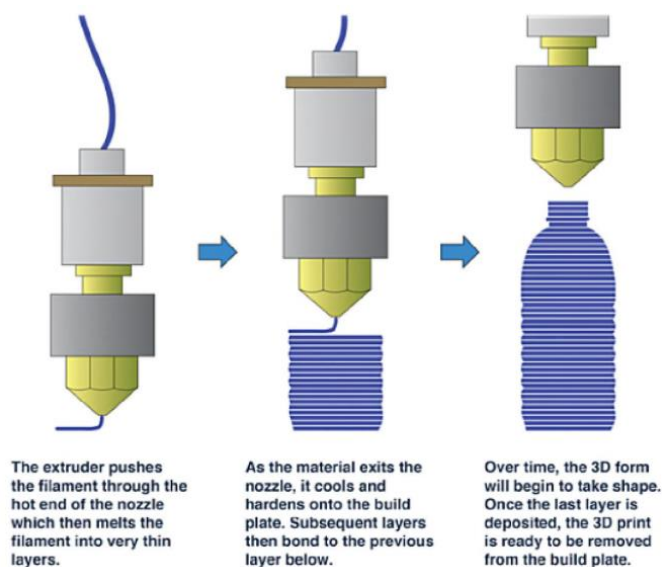
EBM tiskárny jsou oproti výše popisovaným tiskárnám pomalejší a dražší. Využívají se tak primárně v medicíně k výrobě implantátů. Užitek si našly i v leteckém průmyslu.

Laminated Object Manufacturing (LOM)

Jednotlivé vrstvy jsou vyříznuty buď z papíru nebo z plastu a spojeny k sobě LOM technikou. [6]

Fused Deposition Modeling (FDM)

Také někdy označovaný jako FFF (Fused Filament Fabrication) 3D tisk je z hlediska počtu instalovaných tiskáren po celém světě nejběžnějším typem 3D tisku. Využívá procesu protlačování materiálu tryskou. Ten pracuje především s polymerními materiály, ale lze říci, že jakýkoli materiál, který dokáže kontinuálně vytékat z trysky a pak tvrdnout, může být použit. Vhodné jsou tak i kompozity s polymerní matricí, jíl, beton, hydrogely, jídlo a jiné další. FDM tiskárny používají materiál na bázi vláken, většinou struny z termoplastů, které jsou v trysce pod teplotou okolo 200 °C roztaveny a jednotlivě pokládány vrstvu po vrstvě na plochý povrch, kde materiál vychladne a ztvrdne v požadovaný objekt. [7]

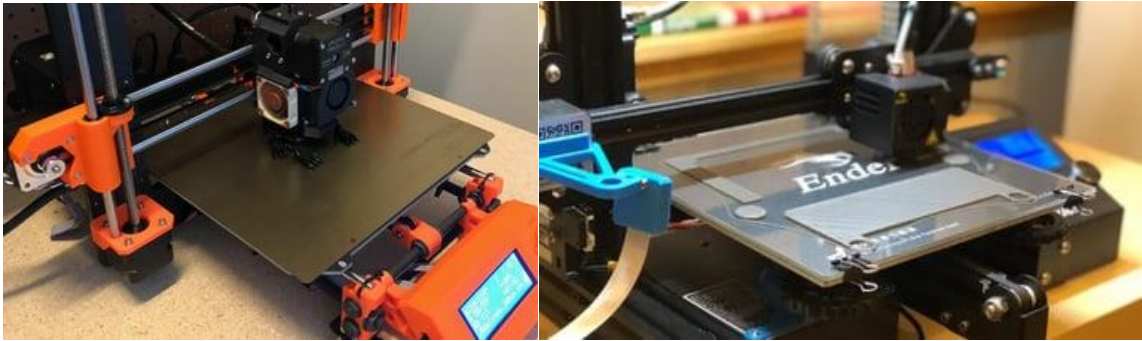


Obrázek 7: Proces FDM 3D tisku [7]

Každá FDM 3D tiskárna sestává z následujících součástí:

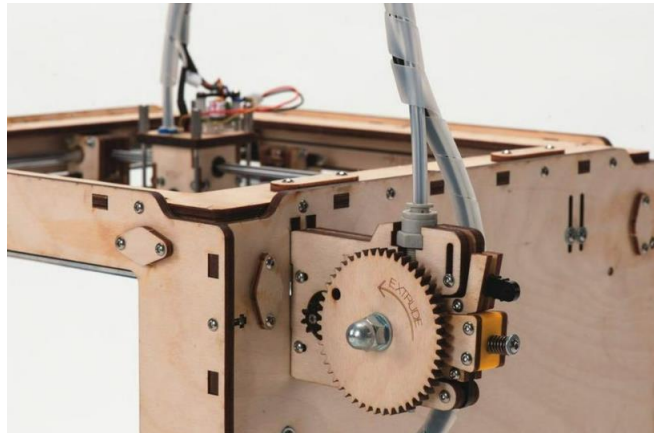
Tisková podložka (print bed) - Součást tiskárny, na kterou jsou jednotlivé vrstvy natavené struny z termoplastu postupně nanášeny. Aby první nanesená vrstva k podložce správně přilnula a nevznikaly nerovnosti, je třeba podložku nahřát na vyšší teplotu nebo ji opatřit povrchovou úpravou. Nahřívání podložky je pak schopna během tisku udržovat konstantní teplotu od 40 °C do 110 °C. Nenahřívání podložky jsou prodávány se zmiňovanou povrchovou úpravou nebo je uživatel nesmí používat s některými typy termoplastů, aby byl tisk kvalitní.

Tiskové podložky jsou nejčastěji vyráběny z oceli, skla nebo plastů.



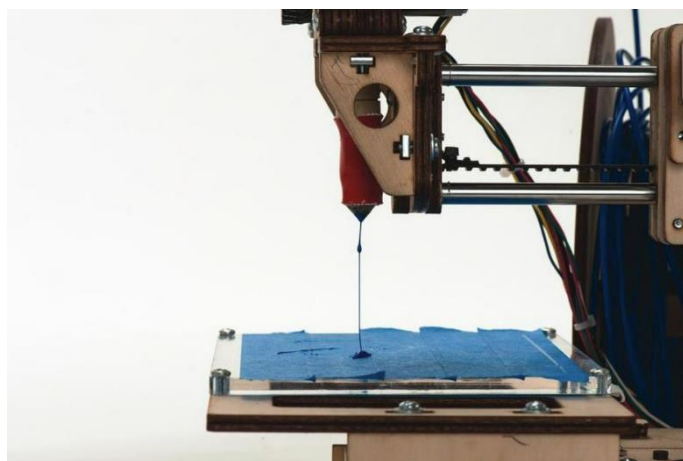
Obrázek 8: Podložka z pružinové oceli s hladkým PEI povrchem (vlevo) a skleněná podložka (vpravo) [9]

Extruder – Jedná se o podavač materiálové struny, který ji natlačí do hot-endu. Některé extrudery jsou součástí hot-endu (direct drive), jiné se umísťují samostatně. Samostatné extrudery strunu před hot-endem tlačí ještě PTFE (teflonovou) trubicí (princip Bowdenova kabelu).



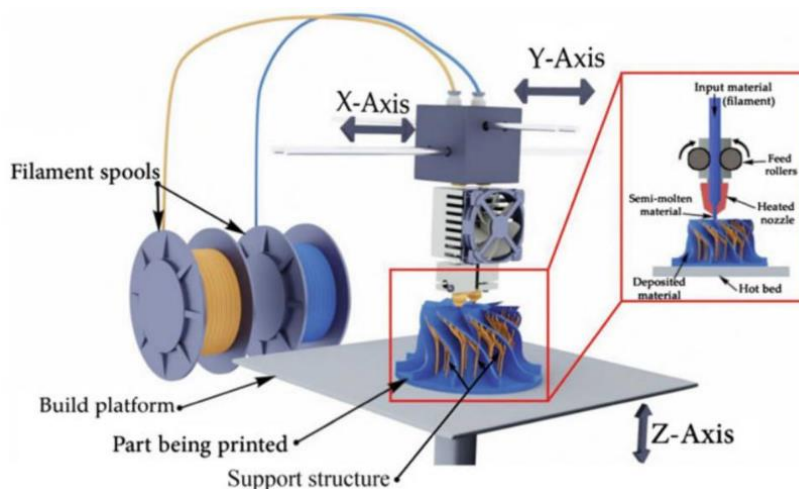
Obrázek 9: Extruder umístěný samostatně [8]

Hot-end (tisková hlava) – Skládá se z heatblocku, heatbreaku, topného tělesa, heatsinku (chladiče) a trysky. Tyto součásti jsou většinou uzavřeny do obálky z hliníku nebo jsou konfigurovány do tvaru barelu. Pomocí tepla taví hot-end materiálovou strunu, kterou pak tryska nanáší na podložku. Průměr díry na konci trysky, ze které materiál vytéká se pohybuje okolo 0,2 mm až 0,8 mm.



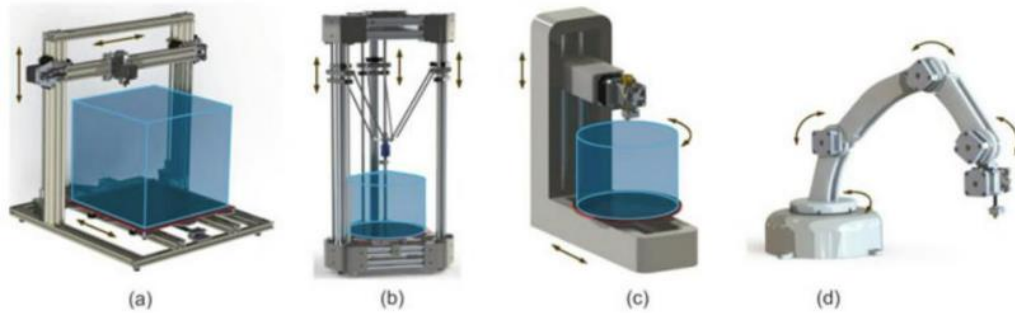
Obrázek 10: Hot-end FDM 3D tiskárny zvané Printrbot [8]

Plastový filament – Materiálová struna, kterou extruder zásobuje hot-end. Může být vyrobena z různých materiálů jako třeba ABS (akrylonitrilbutadienstyren), PLA (polyaktid) nebo PVA (polyvinylalkohol). Liší se mírou toxicity, potřebnou teplotou natavení struny, cenou nebo třeba možnostmi použití. [8]



Obrázek 11: Sestava FDM 3D tiskárny [10]

FDM 3D tiskárny se dodávají v různých velikostech, konfiguraci a s různým mechanismem tisku. Mohou být rozděleny do čtyř typů podle způsobu, kterým má software tiskárny definované souřadnice tiskové hlavy vůči tiskové podložce. Dělíme je tak na kartézské, polární, delta a speciální – robotické. Každá z nich je omezena tiskovým prostorem znázorněným modrou barvou na následujícím obrázku.



Obrázek 12: Typy FDM 3D tiskáren, a) kartézská, b) delta, c) polární, d) robotické rameno, a jejich tiskový prostor [10]

Nejběžnějším typem je kartézská FDM 3D tiskárna. Jak už název napovídá, tisková hlava pracuje v kartézském souřadnicovém systému. Tiskový prostor vymezuje kvádr nebo krychle, což je důvodem, proč je tisková podložka vyráběna do tvaru čverce nebo obdélníku. Tiskárna tvoří výtisk ve třech na sebe kolmých osách X, Y a Z, a to především následujícími třemi způsoby:

- a) Tisková hlava se pohybuje v rovině X-Y a tisková podložka v ose Z. Takovými tiskárnami jsou například Stratasys F123, Ultimaker S5, MakerBot Replicator+.
- b) Tisková hlava se pohybuje v osách X a Z, tisková podložka v ose Y. Příkladem takových tiskáren jsou: Original prusa MINI+, LulzBot Mini, da Vinci Jr. 2.0.
- c) Tisková hlava se pohybuje ve všech třech osách X, Y a Z, zatímco tisková podložka je nehybná. Příklady těchto tiskáren: BigRep ONE, Cincinnati MAAM. [10]



Obrázek 13: Zleva MakerBot Replicator+, Original prusa MINI+, BigRep ONE [11] [12] [13]

2 Způsoby snímání výrobků z FDM 3D tiskárny

Tiskové hlavy FDM 3D tiskáren pokládají jednotlivé vrstvy roztaveného materiálu na podložku, kam se první z nich vlivem poklesu teploty přilepí. Výrobek následně musí být odstraněn, aby tiskárna mohla pokračovat v 3D tisku. Velikost adhezních sil, které uživatel musí při snímání výtisku překonat poté záleží především na tom, jestli je tisková podložka vyhřívána (rozdíl pokládací teploty filamentu a podložky) a jakou povrchovou úpravu má. Uživatelé mohou využít několika metod snímání výrobků.

2.1 Manuální snímání

Ruka

První metodou je snímání hotových výrobků rukou. Použití této metody je výhodné u výtisků s malou kontaktní plochou s podložkou 3D tiskárny kvůli menším adhezním silám. Snímání rukou však není vhodné pro výrobky se složitou geometrií nebo výrobky velkých rozměrů. Složitou geometrii můžeme tímto způsobem snadno poškodit a velké výtisky přenášejí potenciálně škodlivé síly prostřednictvím podložky do rámu tiskárny.

Škrabka

Nejběžnější metodou snímání hotových výrobků je použití ostré, ploché čepele, kterou má například škrabka. Některé firmy dokonce vyrábějí škrabky určené přímo ke snímání 3D výtisků. Lze však použít i žiletka nebo velký plochý šroubovák. Nezávisle na tom, jaký z těchto nástrojů uživatel použije, musí dávat pozor na to, aby si ostrou čepelí nezpůsobil úraz nebo nepoškodil podložku 3D tiskárny agresivními údery škrabky. Poškození podložky by totiž ovlivnilo přilnavost první vrstvy nataveného materiálu při dalším tisku a vyrovnání podložky by bylo obtížné.



Obrázek 14: Snímání hotových výtisků škrabkou [14]

Pružné odnímatelné tiskové podložky

Některé odnímatelné tiskové podložky jsou vyráběny z takového materiálu, aby se daly prohýbat. Toho se využívá k porušení povrchové adheze mezi tiskovou plochou podložky a výtiskem. Podložky jsou navrženy tak, aby se při ohybu plasticky nedeformovaly. V současnosti je vyrábí několik firem jako například Prusa, BuildTak, Easy-Peelzy nebo třeba Ziflex.



Obrázek 15: Snímání výtisku pomocí ohýbání pružné odnímatelné tiskové podložky [14]

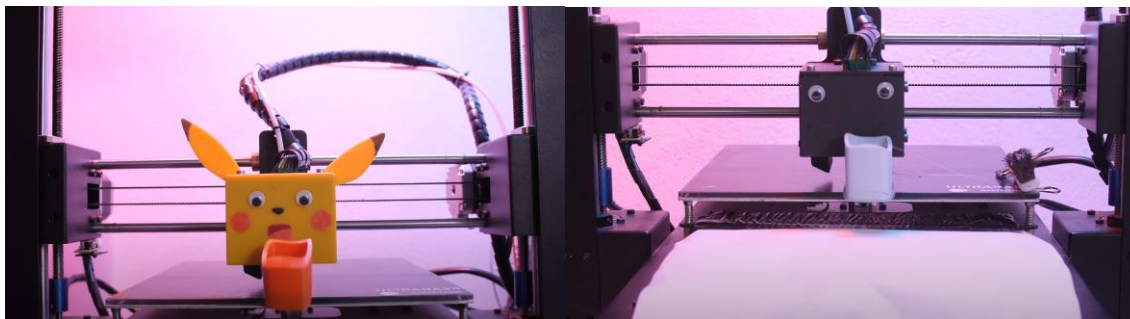
Metoda prohýbání tiskové podložky je považována za jednu z nejlepších metod snímání výtisků, protože vyžaduje nejméně úsilí, je spolehlivá a riziko poškození dílů tiskárny je minimální. [14]

2.2 Automatické snímání

Zatímco drtivá většina uživatelů 3D tiskáren snímá své výtisky manuálně, v současné době existují i některé způsoby automatického snímání. Snaha o automatizaci probíhá jak ze strany fanoušků 3D tisků, tak ze strany vývojářů za účelem prodávat tiskárny společně s automatickým snímáním.

Snímání kolizí

Nejběžnější metodou automatického snímání výtisků je snímání kolizí. Funguje na principu přidání kolizní cesty tiskové hlavě po dokončení tisku. Ta spočívá v zarovnání tiskové hlavy v ose X s hotovým výrobkem a následném pohybu tiskové podložky v ose Y, čímž dojde ke kolizi výtisku s hlavou. Adhezní síly se poruší a výtisk je sražen z tiskové podložky. Tento princip je znázorněn na následujícím obrázku:



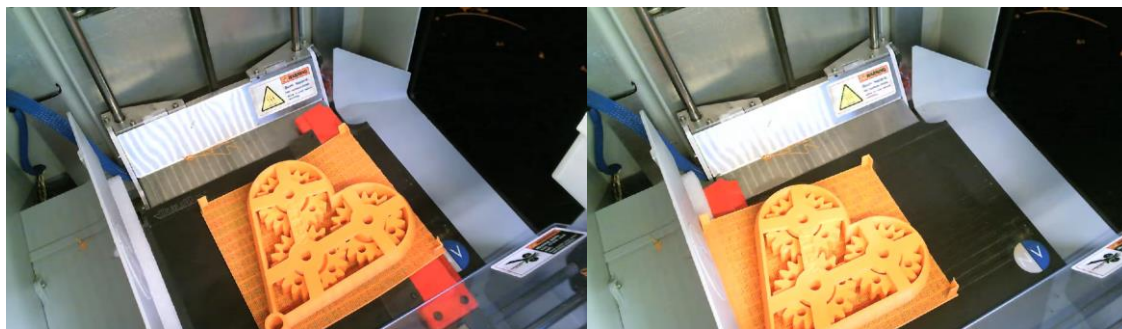
Obrázek 16: Automatické snímání výtisku kolizí [15]

Tato metoda je velmi populární mezi fanoušky 3D tisku, protože nepotřebuje žádné speciální vybavení, stačí jen pár příkazových řádků kódu g navíc.

Snímání kolizí má však i své nevýhody. Nebude totiž dobře fungovat u výtisků s malou výškou. Výtisk musí přesahovat alespoň výšku spodní části tiskové hlavy nad podložkou (jak je znázorněno na obrázku 16), aby byl vzájemný kontakt výrobku s tiskovou hlavou dostatečně velký pro sražení výrobku z podložky. Tato výška se liší v závislosti na typu tiskárny, obvykle se však pohybuje okolo 2,5 cm. Se zvyšující se styčnou plochou výrobku s podložkou se navíc srážení stává mnohem obtížnějším. Může dojít k poškození mechaniky stroje, který není pro rázové namáhání konstruován. [15]

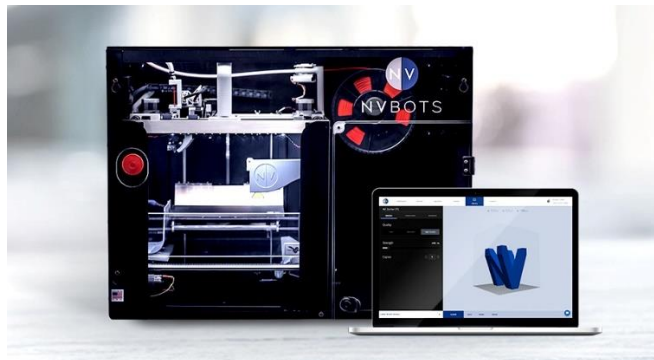
Automatizovaná škrabka

S dalším způsobem automatického snímání výrobků z FDM tiskáren přišla společnost NVBots. Vytvořili 3D tiskárny NVPro, jejichž součástí je zabudovaná automatizovaná škrabka. Jakmile je 3D tisk dokončen, rozjede se škrabka z jednoho konce tiskové podložky na druhý, čímž poruší adhezní síly a sejme hotový výtisk. Následně narazí do stěny, čímž výrobek přizvedne a odveze jej do sběrného koše.



Obrázek 17: Princip funkce FDM 3D tiskáren NVPro [16]

Tiskárny NVPro byly vytvořeny specificky pro firmy a instituce jako jsou školy. Z tohoto důvodu jsou připojeny na sdílený NVCloud. Tiskové soubory uživatelů se nahrávají do fronty, která je kontrolována místním administrátorem.



Obrázek 18: Tiskárna NVPro [16]

Princip snímání výrobků, který tiskárna NVPro nabízí, se ukázal být účinný pro různé velikosti výtisků. Má však i své nevýhody. Například vyrovnání podložky musí být konzistentní, aby se zabránilo tomu, že se počáteční vrstva připojí k tiskové podložce v určitých oblastech více, čímž by její odstranění vyžadovalo mnohem větší sílu od škrabky. Výška tiskové podložky musí být také extrémně stálá, aby se škrabka při oddělování výtisku dotýkala tiskové podložky a nezajížděla do vrstev výtisku. Pokud je navíc výtisk náročný na sejmání, vodící šroub, který vede škrabku, bude vystaven velkému točivému momentu, čímž může být systém poškozen. Tato situace u manuálního snímání nenastává, protože obsluha může sejmout výtisk v jakékoli výšce s jakýmkoli nerovnostmi. [16]

Tisk na tenké plastové fólie

S dalším způsobem automatického snímání hotových výtisků z FDM 3D tiskárny přišla společnost Stratasys s její tiskárnou Stratasys Continuous Build™ 3D. Princip snímání výtisku spočívá v tom, že tisková hlava této tiskárny nanáší natavený filament na tenký polymerový list, který je v zadní části tiskárny namotán na roli. Po dokončení tisku je tento list vysunut ven z tiskárny, kde jej kráječ oddělí od zbytku role. List tak společně s výtiskem spadne do sběrného koše umístěného před tiskárnou. Uživatel poté výtisky ze sběrného koše vyjme a jeden po druhém oddělí od listů.



Obrázek 19: Tiskárny Stratasys Continuous Build™ 3D a množství výtisků na tenké plastové fólii [17]

Tyto tiskárny jsou určeny pro průmyslové použití, nikoli osobní, a prodávají se přímo prostřednictvím Stratasys.

Jejich nevýhoda spočívá především v tom, že pořád potřebují obsluhu, která výtisky z fólií sejme. To znamená, že jen přesouvají problém snímání výrobků do jiných míst. Navíc vytvářejí mnoho plastového odpadu, protože fólie jsou určeny jen na jedno použití. [17]

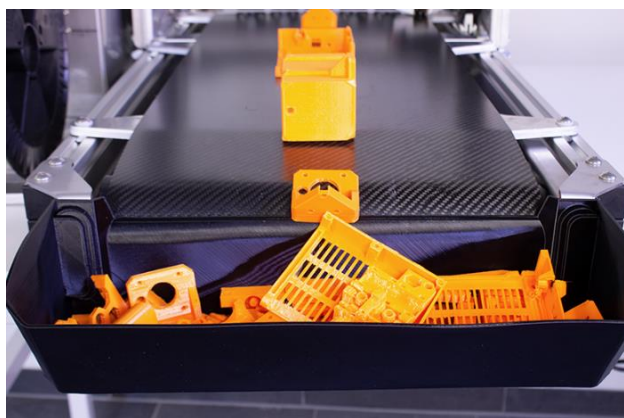
Pásová tiskárna

Další metodu automatického snímání výrobků z FDM 3D tiskáren představila společnost BLACKBELT se svojí stejnojmennou tiskárnou BLACKBELT 3D printer. Jedná se o tiskárnu, která tiskne výrobky na dopravníkový pás, ke kterému tisková hlava svírá úhel 45°. Dopravníkový pás je vyráběn z uhlíkových vláken a nahrazuje typickou osu Z. Rovinu, ve které se pohybuje tisková hlava označujeme jako X-Y. Samotná tiskárna je přimontována k BOSCH hliníkovým profilům, které zajišťují kompatibility s průmyslovým prostředím.



Obrázek 20: BLACKBELT 3D printer [18]

Uživatel tisk zahájí použitím programu BLACKBELT Cura. Jedná se o slicer program, který je navržen tak, aby byly návrhy výtisků rozřezány do vrstev pod úhlem 45 stupňů. Tím se generuje g-kód specifický pouze pro tuto tiskárnu. Po dokončení tisku se výrobek pohybuje společně s pásem až k válci, přes který je pás ohnut. Odtud se díky ohnutí skutálí do sběrného koše, čímž je sejmut.



Obrázek 21: Princip snímání výrobků pohybem dopravníkového pásu [19]

Největší výhodou této tiskárny je dopravníkový pás, který uživateli umožňuje tisknout výrobky s velkým rozměrem v ose Z (až 1300 mm). Delší výtisky je doporučeno podepřít válečkovým dopravníkem. Ten se dá výhodně přišroubovat ke zmíněným BOSCH profilům. [18]



Obrázek 22: BLACKBELT 3D printer s válečkovým dopravníkem a ukázka tisku výrobku s velkým rozměrem v ose Z [18] [19]

Tato tiskárna však má i své nevýhody. Jsou jimi například vysoká cena (okolo 300 000 Kč), inkompatibilita s tiskovými materiály jako je třeba ABS (akrylonitrilbutadienstyren), neschopnost udržet vysokou rychlost tisku, nižší kvalita výtisků nebo třeba hmotnost a velikost rámu tiskárny. [20]

2.2.1 Shrnutí poznatků

Jak z výše vytvořené rešerše vyplývá, každý z popsaných způsobů automatického snímání výrobků z FDM 3D tiskáren má své nevýhody použití. Proto si tato bakalářská práce dala za cíl navrhnout a představit nový způsob, který by tyto nevýhody řešil. Šlo tedy o to, vymyslet takový, který by nebyl drahý svou pořizovací cenou, neničil svou funkcí komponenty tiskárny a nepřesouval problém snímání výrobků na jiná místa, jako již způsoby existující. K tomu byla vybrána konkrétní tiskárna – Original prusa MINI+.

Následující část práce se tomuto novému způsobu snímání hotových výrobků věnuje.

PRAKTICKÁ ČÁST

1 Návrh přípravku pro automatizaci postupu snímání výrobku z FDM 3D tiskárny

1.1 Myšlenka provedení

Jak již bylo v teoretické části uvedeno, jedním z manuálních způsobů snímání výrobků z FDM 3D tiskáren je použití odnímatelné tiskové podložky z pružného materiálu. Tato podložka se dá z tiskárny vyjmout a zprohýbat, čímž se výtisk od podložky oddělí.

Návrh přípravku pro automatizaci tohoto procesu spočívá v myšlence vytvoření dvou protilehlých drážek, kterými by tato pružná tisková podložka po dokončení 3D tisku procházela a nahrazovala tím právě manuální prohýbání obsluhy tiskárny.

Při tomto průchodu by se tiskový plát složitě deformoval, čímž by se narušily adhezní síly mezi výtiskem a podložkou a výrobek na tiskárně by tak byl sejmут. Napětí v podložce vyvolaná deformací by však nesměla přesáhnout mez kluzu materiálu, ze kterého je podložka vyrobena, aby v podložce vznikaly jen pružné deformace, nikoli plastické. Za této podmínky by se tisková podložka po protažení drážkami vždy vrátila do svého původního tvaru, čímž by se jimi dala bez problémů opakovaně protahovat bez ničení komponentů 3D tiskárny.

Výtisky by po protažení drážkami mohly vlivem gravitace odpadávat do sběrného koše. Pokud bychom navíc využili dopředného a zpětného tažení podložky drážkami, vracela by se podložka zpátky na 3D tiskárnu, čímž by byl proces snímání plně automatický a nepřesouval tak problém snímání do jiných míst. Pokud by navíc potřebné deformace v podložce nebyly příliš velké, nebyla by ani potřebná průtažná síla příliš velká. Součásti dimenzované na tuto sílu by tak byly levné.

Realizací této myšlenky by tak mohly být vyřešeny problémy stávajících řešení automatického snímání hotových výrobků z FDM 3D tiskáren a cíl práce tak naplněn.

1.2 Návrh

Návrh spočívá ve vytvoření geometrie dvou již zmíněných drážek. Tyto drážky musí mít takový tvar, aby deformace tiskové podložky byly složité a vyvozená napětí v podložce zasahovala do jejích tiskových částí. Nejvhodnější by bylo, aby se tato napětí blížila mezi kluzu materiálu podložky, ale zároveň ji nepřesáhla.

Ke zjištění velikosti těchto napětí a jejich průběhu byl použit konečněprvkový řešič Abaqus 6.14. Výsledky z něj pomohly k optimalizaci tvaru drážek.

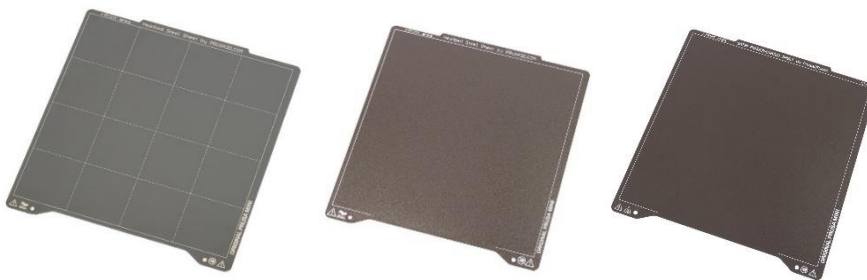
1.2.1 Postup tvorby návrhu

K návrhu drážek byla použita tisková podložka z FDM 3D tiskárny Original prusa MINI+. Jak je již uvedeno v teorii výše, jedná se o kartézskou FDM 3D tiskárnu, jejíž tisková hlava se pohybuje v osách X a Z, podložka pouze v ose Y.



Obrázek 23: FDM 3D tiskárna Original Prusa MINI+ [12]

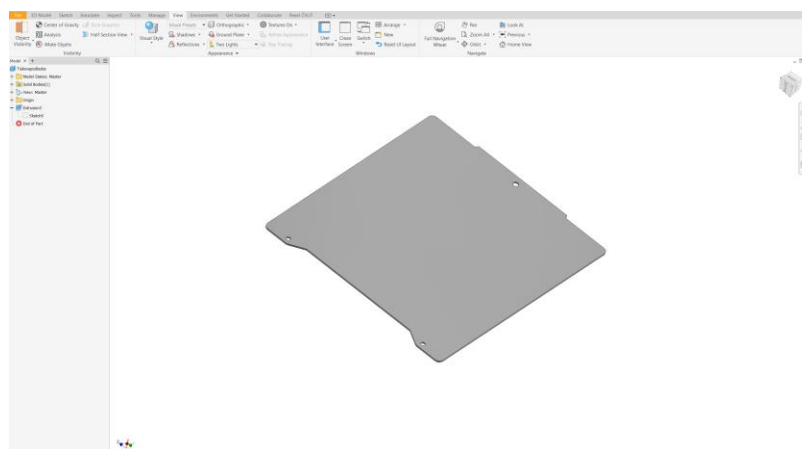
Podložky na tuto tiskárnu jsou vyráběny společností Prusa Research v různých provedeních. Vždy se však jedná o ocelový plát s různým typem povrchu. Je tak na výběr hladký PEI povrch na obou stranách, zrnitý práškový povrch a saténový práškový povrch.



Obrázek 24: Podložka s hladkým PEI povrchem na obou stranách, zrnitým práškovým povrchem a saténovým práškovým povrchem [21]

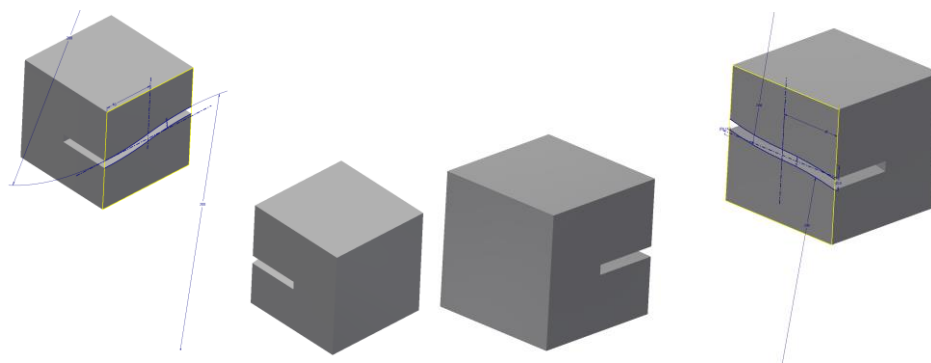
Z těchto tří variant byla vybrána podložka s hladkým oboustranným PEI povrchem. Její rozměry byly proměřeny a k jejímu zkonstruování bylo využito parametrického 3D CAD modeláře od společnosti Autodesk – Inventor Professionalu 2022.

Model podložky na následujícím obrázku obsahuje i díru, která byla do podložky později navrtána pro její zachycení mechanismem posuvu.



Obrázek 25: Tisková podložka s hladkým oboustranným PEI povrchem sestavená v CAD softwaru

Jako počáteční odhad byly vytvořeny prvotní modely protilehlých drážek. Ty byly frézovány v šířce 6 mm a hloubce 40 mm do dvou kostek o straně 80 mm. Jejich křivky byly tvořeny dvěma navazujícími poloměry o rozměru 200 mm. Ty byly proti sobě otočeny o 180°. To mělo za úkol simulovat obsluhu tiskárny, která podložku na okrajích zajíždějících do drážek drží a kroutí na obě dvě strany. Aby se tisková podložka dala do drážek dobře nasměrovat, byly její nájezdy konstruovány ve stejné výšce, v jedné ose.



Obrázek 26: Prvotní modely drážek ze dvou pohledů

Podle výsledků výpočtů napětí v podložce v Abaqusu 6.14 byla však podoba těchto drážek iteračně měněna směrem k vhodnému řešení jejich tvaru.

2 Postup vytvoření modelu přípravku a plátu metodou konečných prvků ve výpočetním softwaru

Tisková podložka společně s modely drážek byla následně importována z Autodesk Inventoru 2022 do výpočetního softwaru Abaqus 6.14. Jak je uvedeno v [22], jedná se o robustní konečněprvkový řešič, který je vhodný například pro simulace kontaktních úloh, porušení součástí nebo nárazů. Tento software pomocí metody konečných prvků zobrazuje průběh napětí a deformací ve vytvořené síti přidělené součásti. Slouží tak především ke kontrole dovolených napětí.

Abaqus 6.14 nabízí dva řešiče - Abaqus Standard a Abaqus Explicit. V případě tiskové podložky procházející drážkami byl použit explicitní řešič. Ten při řešení úloh využívá postupnou časovou integraci po malých časových úsecích. Je tak vhodný pro děje jako jsou třeba nárazy, kterým tisková podložka v kontaktu s drážkami v podstatě je.

V následující části bakalářské práce je popsán postup tvoření simulace tiskové podložky zajíždějící do navržených drážek v Abaqusu 6.14. Pomocí této simulace je totiž možné zobrazit si a zmapovat napětí procházející tiskovou podložkou v důsledku její deformace. To nám umožňuje tvar drážek optimalizovat k získání vhodného řešení jeho tvaru. U finálního řešení je poté zobrazena velikost průtažné síly potřebná k budoucímu návrhu tažného mechanismu.

2.1 Postup tvoření simulace

Nejdříve byl v Abaqusu zadefinován materiál tiskové podložky – pružinová ocel. Na webových stránkách produktů od společnosti Prusa Research není nikde uvedeno, z jakého typu pružinové oceli je vybraná tisková podložka vyrobena. Bylo tak prohledáno několik internetových obchodů nabízejících plechy a pásy z pružinové oceli [23] [24] společně s jejich materiálovými vlastnostmi. Pružinové oceli se vyznačují především svou vysokou mezí kluzu Re . Některé plechy se dodávají i s hodnotou $Re = 1500$ MPa. Došlo však ke snaze o to vybrat plech s hodnotou meze kluzu menší ($Re = 700$ MPa), aby tisková podložka při následném experimentu nebyla porušena a průtažná síla nebyla zbytečně velká. Následně byla tato hodnota do Abaqusu doplněna společně s hodnotami hustoty pružinové oceli $\rho = 7,86 \cdot 10^{-9}$ t/mm³, Youngova modulu pružnosti $E = 206000$ MPa a Poissonovy konstanty $\gamma = 0,3$. Protože vzniklá napětí v podložce vlivem její deformace nesměla mez kluzu překročit, charakter plastické deformace již nebyl uváděn.

Jelikož byly modely tiskové podložky a drážek tvořeny v CAD modeláři, kde byly jejich rozměry zadávány v milimetrech, byly i jejich materiálové parametry zadávány podle tabulky uvedené na stránkách výrobce softwaru Abaqus.

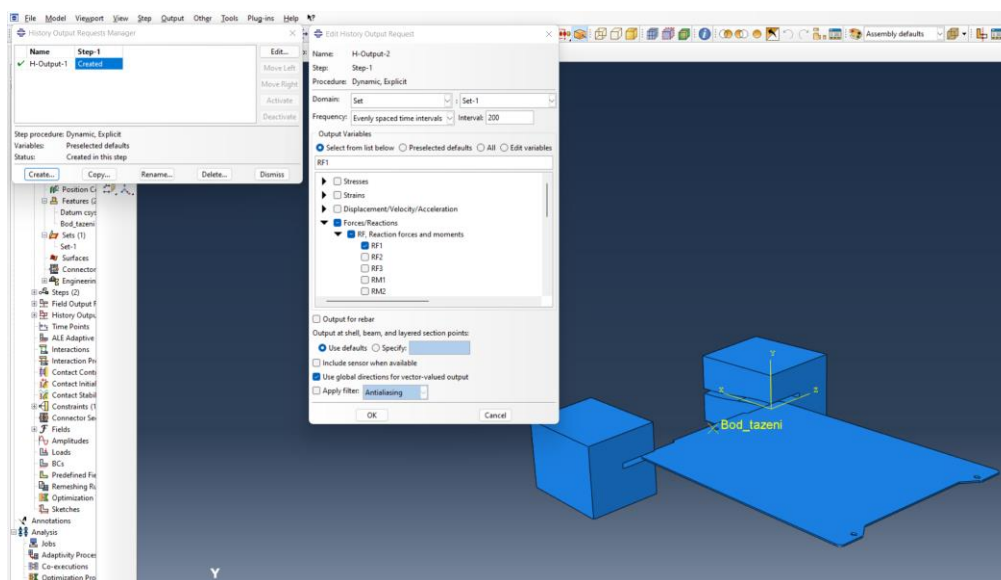
Table 1. Consistent units.

Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10^3 kg)	slug	lbf s ² /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	mJ (10^{-3} J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Tabulka 1: Konzistentnost zadávaných jednotek v softwaru Abaqus [25]

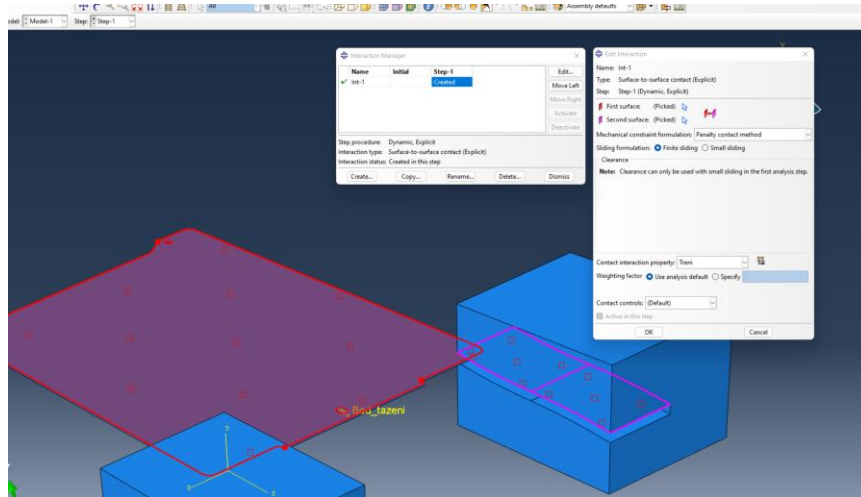
Tento způsob zadávání jednotek v Abaqusu byl hlavním kamenem úrazu práce. Materiálové parametry byly totiž zpočátku zadávány v jednotkách soustavy SI, ale CAD modely byly vytvářeny v milimetrech. Ze simulace poté vycházela obrovská napětí v podložce (v řádech stovek MPa), která nedovolovala příliš měnit navazující poloměry křivky drážek.

Podložka společně s kostkami byla následně opozicována. V místě tažení podložky drážkami byl v této sestavě vytvořen referenční bod “Bod_tazeni”. Tento bod byl následně kinematickou vazbou spojen s podložkou a byl v něm vytvořen set, pro který byla ve výstupu historie napočítána reakční síla v ose tažení X, aby bylo možno zjistit velikost průtažné síly.



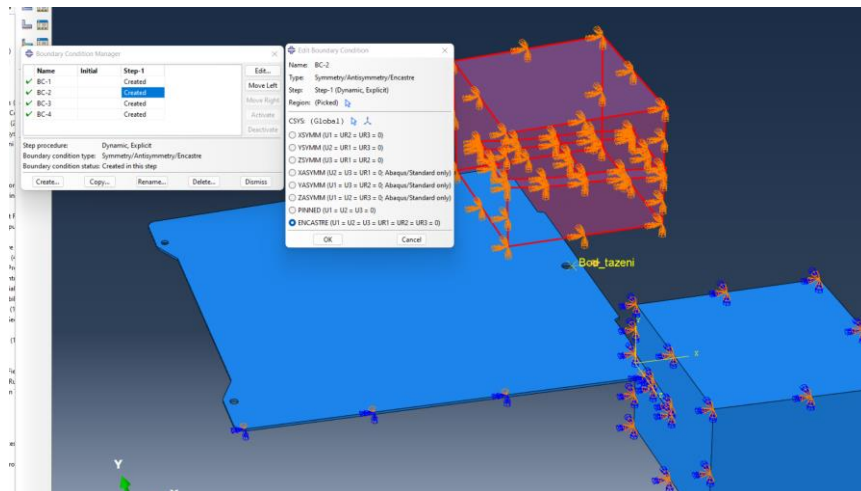
Obrázek 27: Nastavení referenčního bodu a výstupu historie

Následně byl nastaven kontakt tiskové podložky s drážkami jako styk povrchu s povrchem s uvažováním smykového tření (hladký PEI povrch v kontaktu s ocelí; třecí koeficient $f = 0,2$ [26]). Tento kontakt byl zaveden pro první krok, který byl vzhledem k charakteru simulace zvolen jako dynamický, explicitní. První krok byl také jediným krokem této simulace.



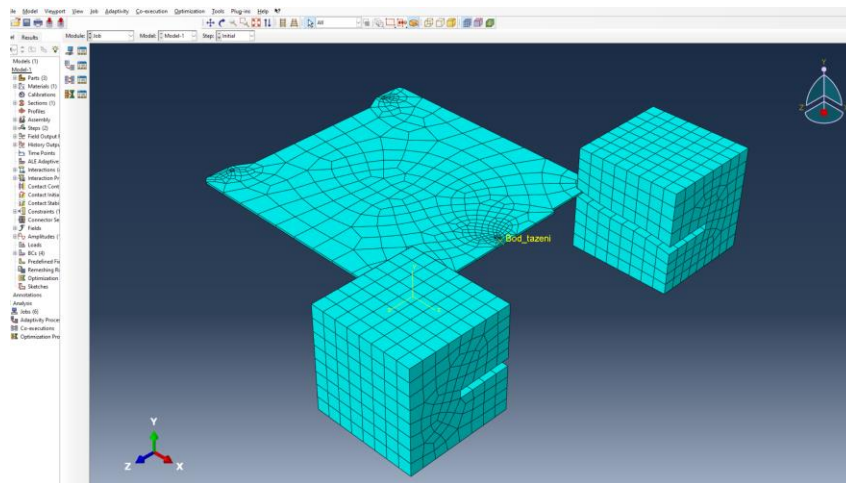
Obrázek 28: Kontakt mezi drážkou a podložkou

Poté byla do referenčního bodu zadána rychlost 200 mm/s v ose X. Ta byla nastavena tak, aby podložka postupně lineárně zvyšovala svoji rychlost z 0 mm/s až na uvedenou maximální hodnotu. Protože byly obě kostky v této simulaci považovány za absolutně tuhé, bylo jejich bodům zakázáno posouvat se a rotovat ve všech směrech. Aby navíc podložka vlivem tření nevybočovala z osy pohybu X, bylo jedné z jejích bočních stran zakázáno posouvat se v ose Z.



Obrázek 29: Kostky jako tuhá tělesa a usměrnění tiskové podložky

Následně byly kostky společně s tiskovou podložkou síťovány. K tomu byly využity prvky hex (čtyřstěny). Bylo totiž ze zdroje [27] zjištěno, že je při tomto druhu simulace zhruba dostačující tyto prvky v co největším možném množství použít pro uvěřitelný výsledek. Z tohoto důvodu došlo ke snaze nedělat síť příliš hrubé, aby byly výsledky vzniklých napětí vlivem deformace uvěřitelné.



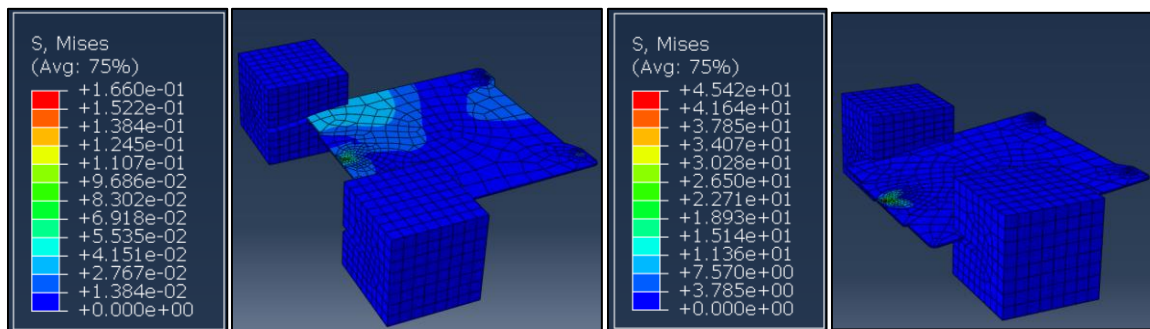
Obrázek 30: Síťování sestavy

Nakonec byl pro všechna tato nastavení spuštěn výpočet napětí a tažné síly. Tento postup simulace byl poté opakován pro všechny další navržené geometrie drážek směrem k finálnímu řešení.

3 Kontrola dovolených napětí v pružinovém plátu tiskárny

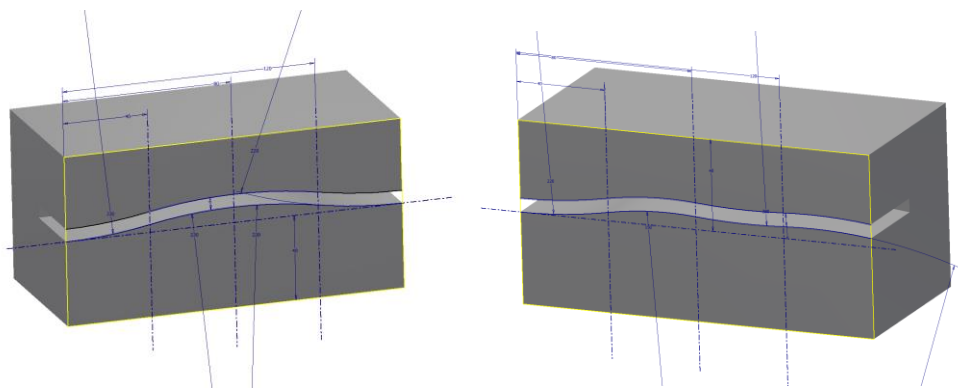
Po skončení výpočtů metodou konečných prvků v Abaqusu byla napětí vzniklá v tiskové podložce vlivem její deformace projížděním drážkami kontrolována. Tato napětí nesměla v čase průchodu drážkou překročit mez kluzu, která byla určena jako $Re = 700 \text{ MPa}$.

Po zaměření se na prvotní výpočet průchodu podložky drážkami v kostkách, došlo ke zjištění, že napětí vzniklá v tiskové ploše podložky dosahovala řádově setin MPa, a to jen v prvním poloměru křivky drážky. Podložka se zároveň skoro vůbec nedeformovala.

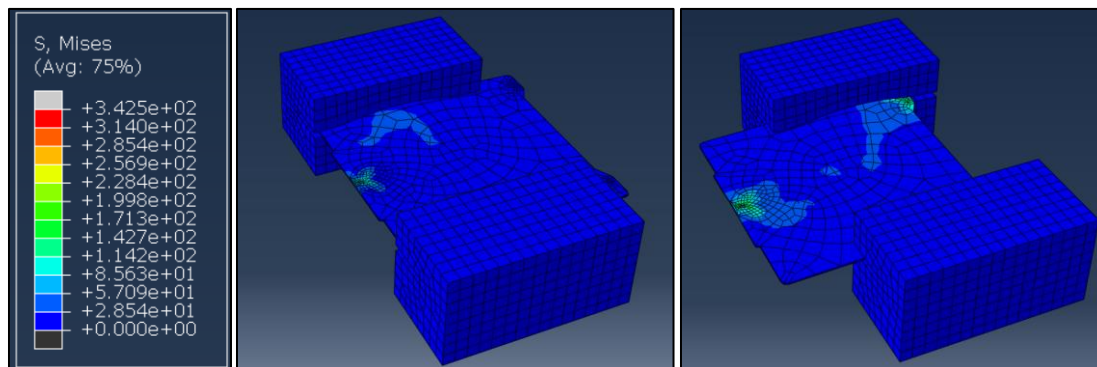


Obrázek 31: Prvotní výpočet průchodu tiskové podložky drážkami

Z tohoto důvodu došlo k úpravám geometrie drážek. Kostky byly nejdříve prodlouženy do dvou kvádrů o rozměrech stran 160 x 80 x 80, aby byly deformace v podložce jejím delším průchodem složitější. Zároveň byly obě drážky vytvořeny ze čtyř segmentů. Jednalo se tak o křivky sestávající z navazujících poloměrů. Myšlenkou tohoto provedení bylo simulování obsluhy, která podložku v prvních dvou segmentech ohýbá a ve zbývajících dvou krotí. Protože byly křivky drážek delší, byly jejich poloměry zvýšeny na 220 mm. Šířka i hloubka drážek byla ponechána na 6 mm a 40 mm.

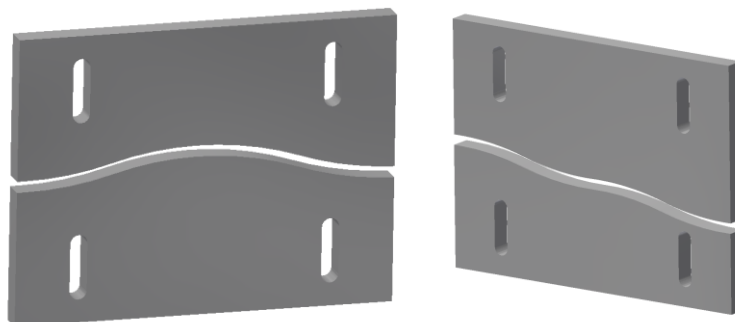


Tento návrh se již jevil zajímavějším, protože napětí v podložce řádově dosahovala desítek MPa. Nebyla však přenášena celou tiskovou částí plátu, ale jen určitými oblastmi, jak je znázorněno na následujícím obrázku. Deformace podložky byly zároveň minimální.



Obrázek 32: Průchod podložky delšími drážkami se 4 segmenty

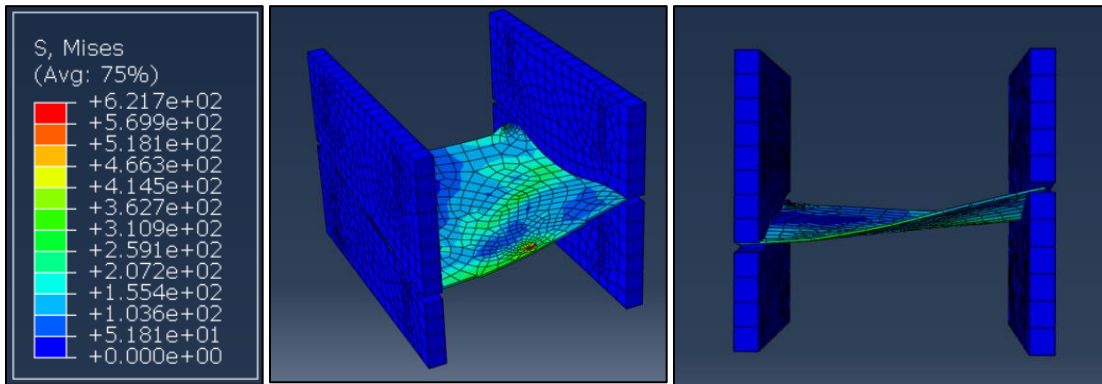
Bylo tak pokračováno v úpravě geometrie drážek. Nápad čtyř segmentů byl rozšířen o pátý segment – rovný nájezd do drážek. Ten byl u obou kvádrů konstruován ve stejné výšce 90 mm. Drážky byly svým vyústěním v ose Y od sebe posunuty o 37 mm, aby došlo k větší deformaci plátu. Poloměry křivek drážek byly sníženy na 200 mm. Protože však došlo v rámci praktické části bakalářské práce k úmyslu kvádry s drážkami vyrábět, hledalo se řešení úspornější na materiál. Nakonec byly z kvádrů udělány plechy s tloušťkou 15 mm, které ve čtyřech kusech tvořily obě drážky. Zároveň byly do těchto plechů navrženy díry pro šrouby M10 (střední řada, 11 mm) tak, aby se velikost šířky drážky mezi plechy dala libovolně měnit.



Obrázek 33: Finální verze plechů s drážkami

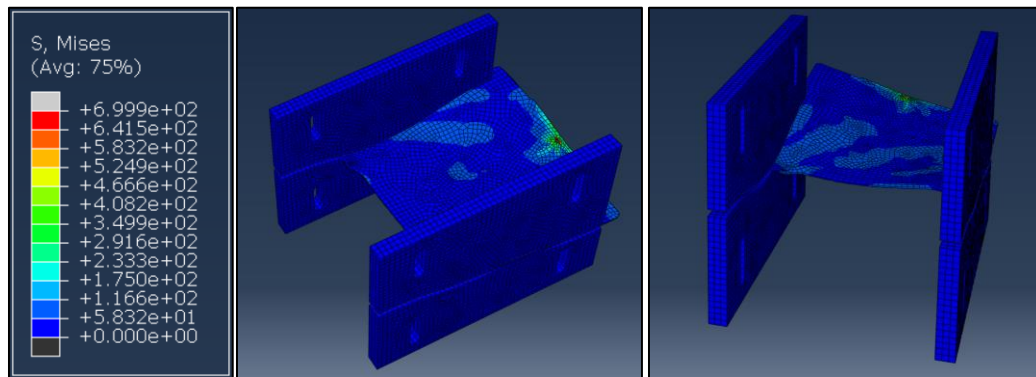
Tato podoba plechů byla nahrána do Abaqusu. Plechy byly od sebe oddáleny na vzdálenost 6 mm, aby tisková podložka drážkou prošla a nezlomila se.

Z výsledků simulace je patrné, že se napětí vyvolaná deformací podložky šířila celou touto podložkou. Jejich velikost se v průměru pohybovala okolo 360 MPa. Největší napětí vznikala okolo díry, ve které byla podložka tažená (okolo 570 MPa). To však mohlo být způsobeno nepřesným síťováním okolo tohoto otvoru. Vhodné by tak bylo zmenšit velikost elementů této sítě. Navíc je možné snadno konstrukčně upravit spojení mezi tažným mechanismem a podložkou tak, aby byla napětí příznivější.



Obrázek 34: Finální návrh geometrie drážky s elementy o hraně 15 mm

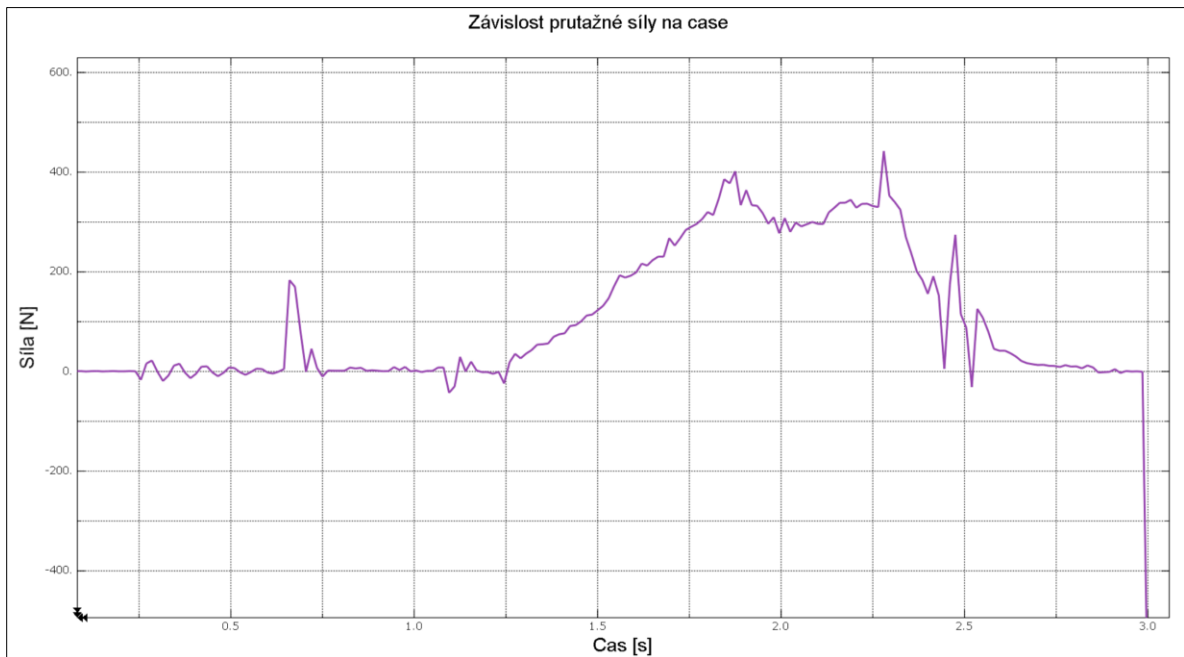
Po zmenšení elementů sítě došlo ke zmenšení napětí v podložce. V průměru na 120 MPa. Největší napětí se pořád pohybovala okolo otvoru pro tažení. Nepřesáhla však mez kluzu a deformace podložky byly znatelné.



Obrázek 35: Finální návrh geometrie drážky s elementy o velikosti hrany 5 mm

Podle výsledků simulace byla tato geometrie drážek konečným řešením. Když byly totiž plechy přiblíženy více k sobě, tak aby se velikost drážek zmenšila, měla tisková podložka tendence se vlivem působení tření zpomalit a zapříčít v drážkách. Když došlo k pokusu zmenšit navazující poloměry křivek drážek, dostala se vyústění drážek na velkou vzdálenost od sebe a došlo tak ke vzniku plastických deformací v podložce.

Protože toto řešení bylo pokládáno za konečné, byla pro něj spočítána reakční síla v ose X v místě tažení jako průtažná síla. Její největší hodnota se pohybovala okolo 400 N, jak je znázorněno na následujícím grafu.

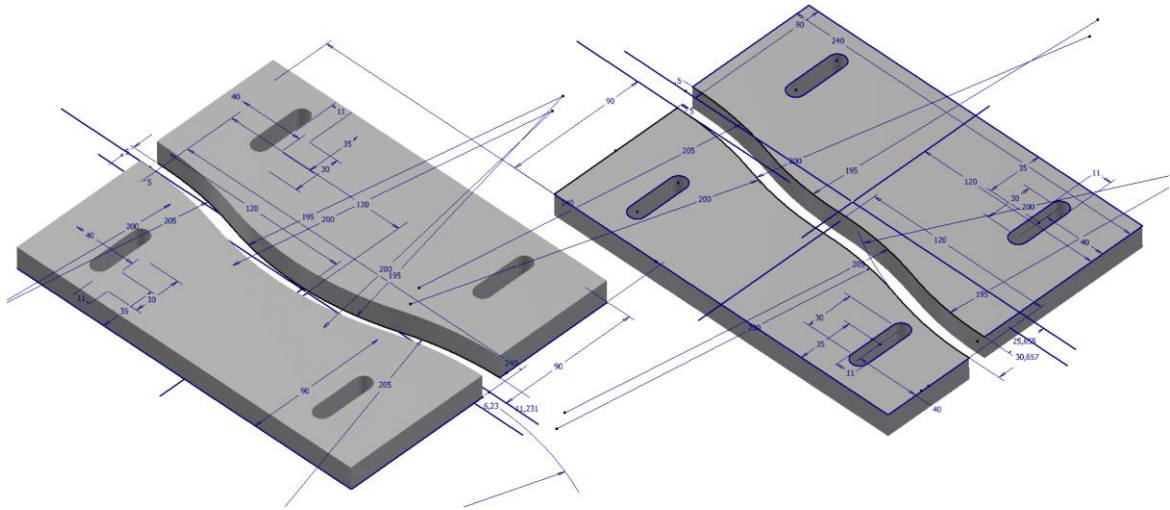


Graf 1: Graf velikosti průtažné síly v čase

4 Kontrukce, výroba a ověření funkčnosti přípravku

4.1 Konstrukce a výroba

Konečné řešení geometrie drážek, které je výše popsáno, bylo exportováno z Autodesk Inventoru 2022 ve formátu step (zkratka pro “standard for the exchange of product data”) a odesláno na výrobu.



Obrázek 36: Plechy zkonstruované v Autodesk Inventoru 2022

4.2 Ověření funkčnosti přípravku

4.2.1 Sestavení zkušebního standu

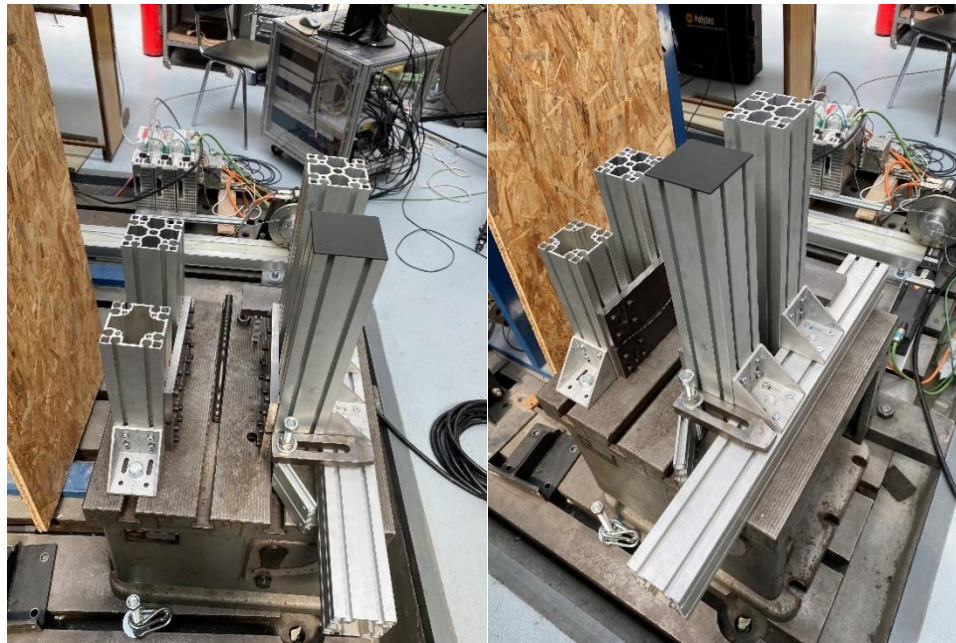
Funkčnost vyrobených plechů s drážkami byla posléze zkoušena ve školních laboratořích. K tomu byl použit upínací stůl se čtyřmi T drážkami. Do jedné z těchto drážek byly nasunuty dvě matice pro T drážky a do nich poté našroubovány šrouby se šestihrannou hlavou, kterými byly k upínacímu stolu připevněny dva úhelníky s rozměry svých dvou čtvercových na sebe kolmých ploch 87 x 87 mm. Poté byly na upínací stůl postaveny dva Alutech profily svými čtvercovými stranami o rozměru 90 mm. Do jejich drážek byly nasunuty čtyři matice M8, které byly pomocí šroubů s válcovou hlavou spojeny s úhelníky.

Protože rozteč drážek upínacího stolu nevycházela přesně na délku tiskové podložky, bylo využito dalšího Alutech profilu, který byl položen svou dlouhou stranou na podložku, ke které byl přichycen pomocí dvou upínek. Tento profil byl nakonec ještě dalšími dvěma úhelníky připevněn

k posledním dvěma Alutech profilům. Stojící profily byly od sebe vzdáleny na velikost šířky tiskové podložky.

Následně došlo k přichycení čtyř kusů plechů tvořících dvě drážky šrouby ke stojícím Alutech profilům. Jelikož došlo k navržení větších děr do plechů (pro šrouby M10, střední řadu), ale do Alutech profilů patřily šrouby M8, došlo k úpravě těchto děr. Do každého plechu bylo navrtáno 8 děr pro šrouby M8. Těmi byly všechny čtyři kusy plechů přichyceny ke stojícím profilům.

Nakonec byly mezi plechy nasunuty dvě planžety. Velikost této mezery byla odměřena sražením plechů na kulatou tyčku o průměru 6 mm. Popsaná sestava je znázorněna na následujících obrázcích.

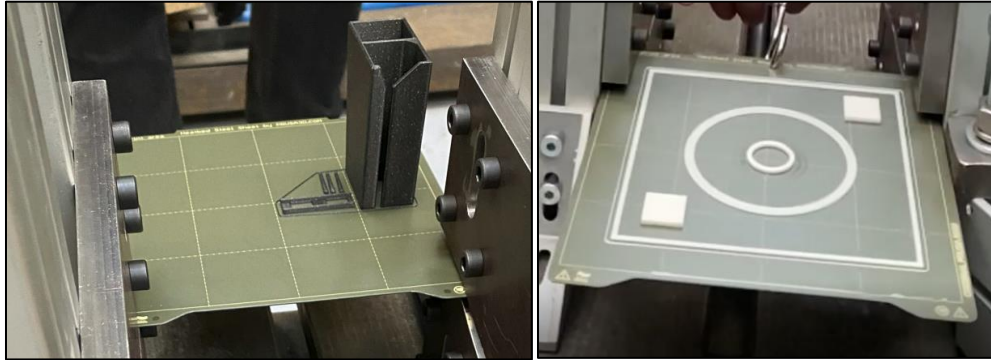


Obrázek 37: Sestavený zkušební stand

Vhodné by bylo tuto sestavu upravit zapuštěním hlav šroubů držících plechy, aby netvořily překážku protahované podložce.

4.2.2 Protahování tiskové podložky drážkami

K upínacímu stolu s T drážkami byl přistaven stativ, do kterého byl uchycen mobilní telefon. Záznamy pořízené na něj jsou dále okomentovány. Pro protahování tiskové podložky drážkami byly k dispozici dva výtisky. Ty jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



Obrázek 38: Hotové výtisky z Original Prusa MINI+ FDM 3D tiskárny

V prvním případě se jednalo o vysoký výtisk s malou podstavou umístěný schválně mimo střed tiskové podložky. Takové výtisky jsou jedny z nejjednodušších na snímání. Při tažení tiskové podložky drážkami totiž stačí narušit adhezní síly na okraji výrobku, ten se svou setrvačností vychýlí z rovnovážné polohy a zbytek snímacího procesu zastane síla gravitace.

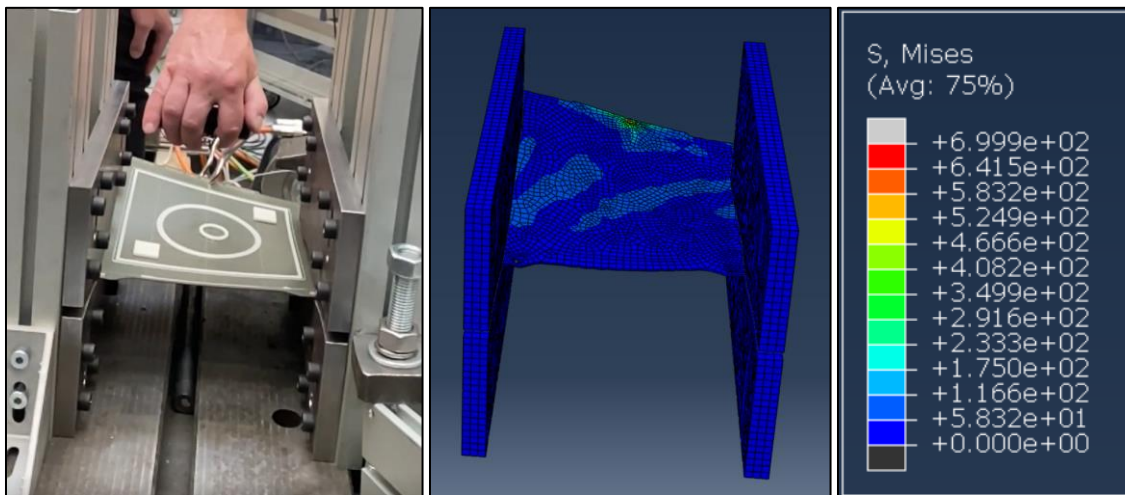
Poté, co došlo k protahování tiskové podložky drážkami, projevil se problém nezapuštěných šroubů, do kterých výtisk narazil, čímž byl sejmut dřív než bylo zamýšleno. Ze záznamu ale bylo zřejmé, že by deformace v podložce k jeho sejmutí stačily. Protahováním drážkami byly sejmuty i zbytky filamentu natisknutého vedle výrobku.



Obrázek 39: Snímání prvního výtisku

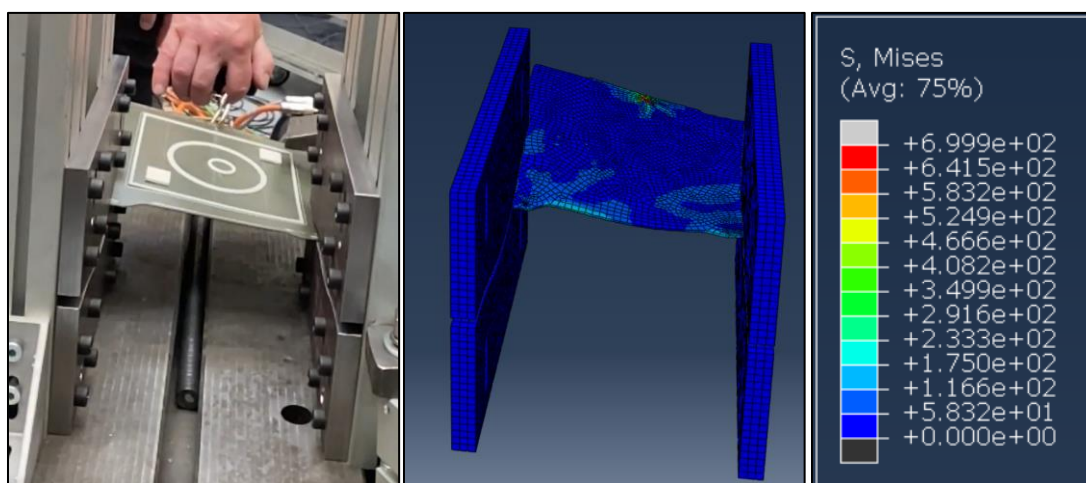
V druhém případě šlo o výtisk, který byl rozprostřen po celé tiskové ploše. Jednalo se naopak o nízký výtisk náročný na sejmutí. K sejmutí takového výrobku je zapotřebí deformací, které prostupují celou tiskovou podložkou.

Po prvním protažení došlo k sejmutí malého mezikruží ve středu tiskové podložky. Okamžik, kde se mezikruží oddělilo od podložky dobře předpověděly výsledky velikosti napětí vyvolaných deformací podložky z Abaqusu. Na následujícím obrázku je srovnání.



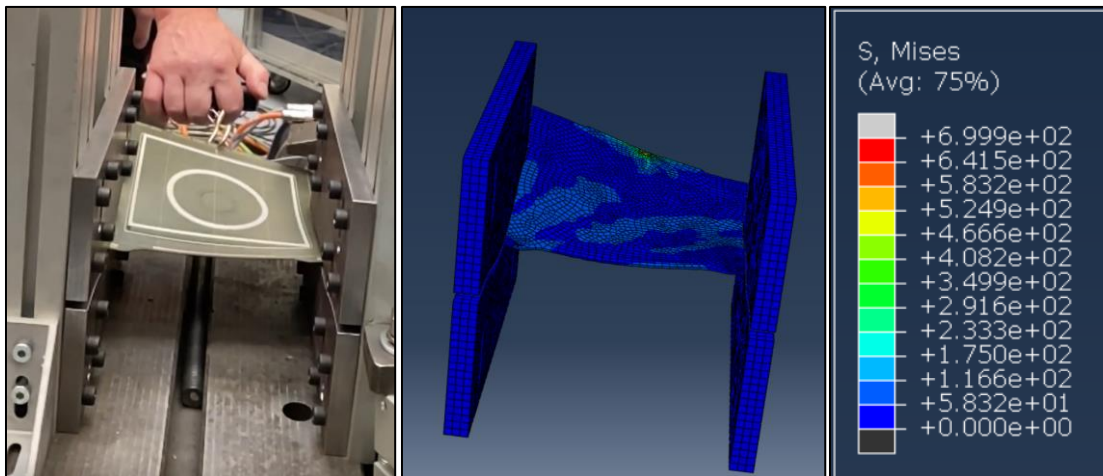
Obrázek 40: Srovnání okamžiku sejmutí malého mezikruží s výpočetním modelem z Abaqusu

Těsně za mezikružím se uvolnil i malý čtverec v levé dolní části tiskové podložky. Srovnání s výsledky z Abaqusu je na následujícím obrázku.



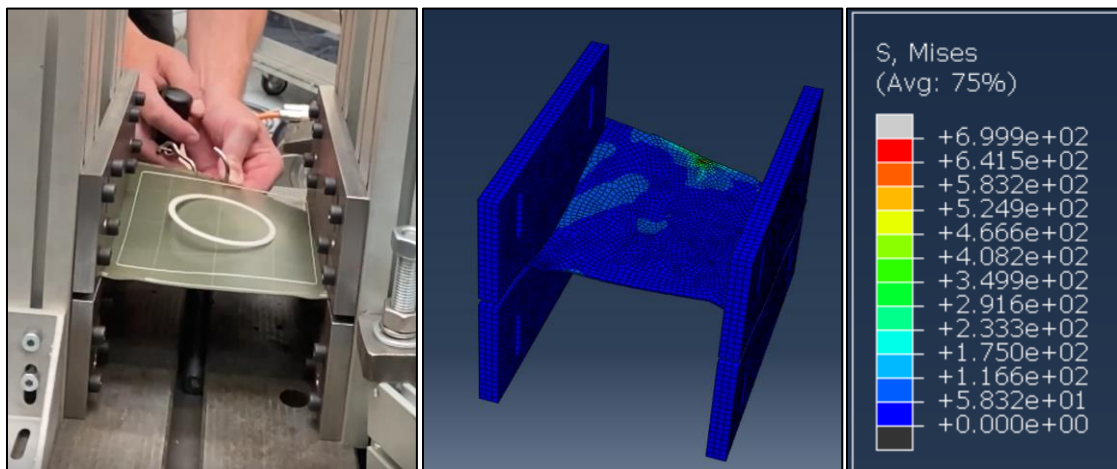
Obrázek 41: Srovnání okamžiku sejmutí malého čtverce s výpočetním modelem z Abaqusu

Při druhém protažení se uvolnil velký obrys čtverce. Z přenosu napětí v tiskovém plátu je zřejmé, že pokud bychom chtěli snímat takové výtisky, bylo by třeba podložku drážkou protahovat na několikrát nebo jednou cestou tam a druhou zpátky.



Obrázek 42: Snímání obrysu čtverce v porovnání s výpočtem v Abaqusu

Jako poslední došlo k snímání většího mezikruží. Z výpočtu v Abaqusu se dalo usuzovat, že napětí, která byla potřebná k sejmutí výtisků se objevila až v druhé polovině jejího tažení. Navíc vypuklá deformace podložky se zdála být lepší než vydutá, protože při vypuklé nedokázal výtisk dobře kopírovat průchod podložky. Proto došlo ke snaze podložku tlačit z druhé strany, jak je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obrázek 43: Snímání většího mezikruží v porovnání s výpočtem z Abaqusu

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout přípravek pro automatizaci snímacího procesu hotových výrobků z FDM 3D tiskárny Original prusa MINI+. Toho mělo být dosaženo na základě představení nevýhod použití již existujících způsobů automatického snímání výrobků z FDM 3D tiskáren.

Cíl byl splněn provedením dílčích úkolů praktické a teoretické části práce uvedených na straně 8. Tím byly zároveň splněny i všechny body zadání této práce, a to následovně:

V teoretické části nejdříve došlo k seznámení čtenáře s technologií FDM 3D tisku a způsoby manuálního snímání výrobků z FDM 3D tiskáren. Následně byla vytvořena rešerše již existujících způsobů automatického snímání výrobků z FDM 3D tiskáren. Byly představeny jejich nedostatky, na základě kterých byl vymyšlen nový způsob automatizace snímacího procesu pro konkrétní FDM 3D tiskárnu Original prusa MINI+. Ten spočíval v myšlence návrhu geometrie dvou protilehlých drážek, kterými by byla tisková podložka této tiskárny protahována za účelem sejmutí hotového výrobku.

V praktické části došlo k návrhu geometrie těchto drážek. Toho bylo docíleno pomocí dvou softwarů. Prvním byl CAD modelář Autodesk Inventor Professional 2022, druhým konečněprvkový řešič Abaqus 6.14. S jejich pomocí došlo iterační cestou k nalezení vhodné geometrie těchto drážek. Tu tvořily čtyři plechy o šířce 15 mm. Průchod podložky těmito plechy byl následně odzkoušen ve školních laboratořích.

Na základě tohoto zkoušení a výsledků simulací v Abaqusu 6.14 lze usuzovat, že je finální řešení geometrie drážek plechů vhodné. Napětí v podložce vzniklá její deformací totiž nepřesáhla dovolenou mez kluzu, zároveň prostupovala celou šířkou podložky. Průtažná síla podle simulace dosahovala v maximu 400 N, což je poměrně vysoké číslo, které mohlo být způsobeno velikostí hrany elementů tvořící síť podložky nebo třeba nepřesným síťováním okolo otvoru, kterým bylo taženo. Při zkoušení přípravku došlo k oddělování výtisků od podložky, takže napětí vzniklá v podložce nebylo třeba dramaticky zvyšovat.

Ze simulace, grafu průtažné síly a zkoušení přípravku však vyplynulo, že napětí potřebná k sejmutí výrobku vznikala až v druhé polovině fáze průchodu podložky. Bylo by tak vhodné učinit

další optimalizaci tvaru drážek za účelem vzniku potřebných deformací pro sejmutí výtisků i v první polovině průchodu podložky. Toho by se dalo docílit například vhodnou parametrizací drážek a nasazením genetických algoritmů.

Bakalářská práce by do budoucna mohla být rozšířena o návrh celého mechanismu tažení podložky drážkami, aby byl celý proces snímání výrobků plně automatický. Přínos bakalářské práce se nachází v provedení nového nápadu způsobu snímání výrobků z FDM 3D tiskáren, jehož výhodou by v celkovém provedení mohla být jeho pořizovací cena, neničení komponentů tiskárny a plná automatizace snímacího procesu výrobků.

Seznam literatury

- [1] COWARD, Cameron. *3D Printing*. London: Penguin Books, 2015. ISBN 1615647457.
- [2] OWAIS, Swaleh. *Automatic Infinite 3D Printer* [online]. Hamilton, 2018 [cit. 21. 12. 2021]. Dostupné z: <https://hackaday.io/project/114738-automatic-infinite-3d-printer>.
- [3] CHOUDHARY, Fayaz. *First 3D Print*. Morrisville: Lulu, 2020. ISBN 1794815074.
- [4] ZUKAS, Victoria, ZUKAS, Jonas A. *An Introduction to 3D Printing*. Sarasota: First Edition Design Publishing, 2015. ISBN 1622878973.
- [5] DK METAL. *Přehled technologií 3D tisku* [online]. Nový Jičín, 2016 [cit. 21. 12. 2021]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>.
- [6] SOLOMAN, Sabrie. *3D printing and design*. Nové Dillí: Khanna Publishing House, 2020. ISBN 9789386173768.
- [7] WALLACH KLOSKI, Liza, KLOSKI, Nick. *Getting Started with 3D Printing: A Hands-on Guide to the Hardware, Software, and Services Behind the New Manufacturing Revolution*. San Francisco: Maker Media, 2016. ISBN: 1680450166.
- [8] FRANCE, Anna Kaziunas. *Make: 3D Printing: The Essential Guide to 3D Printers*. Sebastopol: Maker Media, 2013. ISBN 1457183544.
- [9] O'CONNELL, Jackson. *3D Printer Bed: How to Choose Your Build Plate/Surface* [online]. Mnichov, 2022 [cit. 17. 06. 2022]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-bed-how-to-choose-the-right-build-plate/>.
- [10] HARSHIT, Dave K., DAVIM, Paulo. *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing : Materials forming, machining and tribology*. Basingstoke: Springer Nature, 2021. ISBN 9783030680244.
- [11] Replicator+ Desktop 3D Printer | MakerBot. 3D Printers for Educators & Professionals | MakerBot [online]. [cit. 17. 06. 2022]. Dostupné z: <https://www.makerbot.com/3d-printers/replicator/>.

[12] Částečně sestavená 3D tiskárna Original Prusa MINI+. PRUSA RESEARCH by JOSEF PRUSA [online]. [cit. 18. 06. 2022]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-mini-2/>.

[13] BigRep ONE. 3D wiser member of Admasys International [online]. [cit. 18. 06. 2022]. Dostupné z: <https://3dwiser.com/produkty/3d-tiskarny/termoplasty/bigrep/bigrep-one/>

[14] O'CONNELL, Jackson. *How to Remove 3D Prints from the Bed: 9 Safe Ways* [online]. Mnichov, 2022 [cit. 18. 06. 2022]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/how-to-remove-3d-print-from-bed-3d-print-stuck-to-bed/>.

[15] Make Anything, 2019, *Automatic 3D Print Removal using G-Code*, YouTube video. [cit. 20. 06. 2022]. Dostupné z: Automatic 3D Print Removal using G-Code - YouTube.

[16] MOLITCH-HOU, Michael. *NVBOTS ANNOUNCES AVAILABILITY OF AUTOMATED NVPRO 3D PRINTER*. 2016 [cit. 20. 06. 2022]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/nvbots-announces-availability-of-automated-nvpro-3d-printer-76101/>.

[17] The factory of the future is here. Stratasys [online]. [cit. 20. 06. 2022]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/en/demonstrators/>.

[18] KOSLOW, Tyler. *Updated: Blackbelt 3D Printer “Changing Paradigms” of FDM Technology* [online]. Mnichov, 2017 [cit. 21. 06. 2022]. Dostupné z: <https://all3dp.com/blackbelt-3d/>.

[19] The printer. Blackbelt 3D: The benchmark in 3D belt printing. BLACKBELT [online]. [cit. 21. 06. 2022]. Dostupné z: <https://blackbelt-3d.com/the-blackbelt-3d-printer/>.

[20] O'CONNELL, Jackson. *Belt 3D Printer: All You Need to Know* [online]. Mnichov, 2022 [cit. 21. 06. 2022]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/3d-printer-belt-all-you-need-to-know/>.

[21] FFF Příslušenství (MK3/S/+, MK2.5/S, MINI/+). PRUSA RESEARCH by JOSEF PRUSA [online]. [cit. 21. 06. 2022]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/kategorie/fff-prislusenstvi-mk3-s-mk2-5-s-mini/>.

[22] Abaqus. Simulia [online]. [cit. 21. 06. 2022]. Dostupné z:
<https://www.simulia.cz/software/abaqus>.

[23] Spring Steel. FUSHUN SPECIAL STEEL [online]. [cit. 23. 06. 2022]. Dostupné z:
https://www.fushunspecialsteel.com/sae-9254-sup12-54s1cr6-1-7102-spring-steel/?gclid=Cj0KCQjwlK-WBhDjARIsAO2sErSUHJACTwJOx8s8ULMafSHDP-0ghRyg9uMUEAVY1eARCLMWyQ5fU3EaAIT9EALw_wcB.

[24] Vlastnosti plechů z pružinové oceli. Gutekunst info [online]. [cit. 23. 06. 2022].
Dostupné z: <https://info.formfedern.com/cs/vlastnosti-plechu-z-pruzinove-oceli/>.

[25] Units in Abaqus. SIMULEON BY TECHNIA [online]. [cit. 23. 06. 2022]. Dostupné
z: <https://info.simuleon.com/blog/units-in-abaqus>.

[26] Friction - Friction Coefficients and Calculator. The Engineering ToolBox [online].
[cit. 26. 06. 2022]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html.

[27] ZIENKIEWICZ, Olek C., TAYLOR, R. L., ZHU, J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Amsterdam: Elsevier, 2005. ISBN 9780080472775.

Seznam obrázků, grafů a tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 1: 135 FDM 3D tiskáren připravených k sériové výrobě.....	7
Obrázek 2: Základní princip 3D tisku.....	9
Obrázek 3: Technologie SLA	10
Obrázek 4: Technologie DLP	11
Obrázek 5: Technologie SLM.....	12
Obrázek 6: Technologie EBM	12
Obrázek 7: Proces FDM 3D tisku.....	13
Obrázek 8: Podložka z pružinové oceli s hladkým PEI povrchem (vlevo) a skleněná podložka (vpravo).....	14
Obrázek 9: Extruder umístěný samostatně	14
Obrázek 10: Hot-end FDM 3D tiskárny zvané Printrbot.....	15
Obrázek 11: Sestava FDM 3D tiskárny	15
Obrázek 12: Typy FDM 3D tiskáren, a) kartézská, b) delta, c) polární, d) robotické rameno, a jejich tiskový prostor.....	16
Obrázek 13: Zleva MakerBot Replicator+, Original prusa MINI+, BigRep ONE.....	16
Obrázek 14: Snímání hotových výtisků škrabkou	17
Obrázek 15: Snímání výtisku pomocí ohýbání pružné odnímatelné tiskové podložky	18
Obrázek 16: Automatické snímání výtisku kolizí.....	19
Obrázek 17: Princip funkce FDM 3D tiskáren NVPro.....	19
Obrázek 18: Tiskárna NVPro.....	20
Obrázek 19: Tiskárny Stratasys Continuous Build™ 3D a množství výtisků na tenké plastové fólii.....	21
Obrázek 20: BLACKBELT 3D printer.....	21
Obrázek 21: Princip snímání výrobků pohybem dopravníkového pásu	22
Obrázek 22: BLACKBELT 3D printer s válečkovým dopravníkem a ukázka tisku výrobku s velkým rozměrem v ose Z.....	22
Obrázek 23: FDM 3D tiskárna Original Prusa MINI+	25

Obrázek 24: Podložka s hladkým PEI povrchem na obou stranách, zrnitým práškovým povrchem a saténovým práškovým povrchem.....	25
Obrázek 25: Tisková podložka s hladkým oboustranným PEI povrchem sestavená v CAD softwaru.....	26
Obrázek 26: Prvotní modely drážek ze dvou pohledů	26
Obrázek 27: Nastavení referenčního bodu a výstupu historie	29
Obrázek 28: Kontakt mezi drážkou a podložkou.....	30
Obrázek 29: Kostky jako tuhá tělesa a usměrnění tiskové podložky.....	30
Obrázek 30: Síťování sestavy	31
Obrázek 31: Prvotní výpočet průchodu tiskové podložky drážkami	32
Obrázek 32: Průchod podložky delšími drážkami se 4 segmenty	33
Obrázek 33: Finální verze plechů s drážkami.....	33
Obrázek 34: Finální návrh geometrie drážky s elementy o hraně 15 mm	34
Obrázek 35: Finální návrh geometrie drážky s elementy o velikosti hrany 5 mm	34
Obrázek 36: Plechy zkonstruované v Autodesk Inventoru 2022.....	36
Obrázek 37: Sestavený zkušební stand	37
Obrázek 38: Hotové výtisky z Original Prusa MINI+ FDM 3D tiskárny.....	38
Obrázek 39: Snímání prvního výtisku	38
Obrázek 40: Srovnání okamžiku sejmutí malého mezikruží s výpočetním modelem z Abaqusu	39
Obrázek 41: Srovnání okamžiku sejmutí malého čtverce s výpočetním modelem z Abaqusu	39
Obrázek 42: Snímání obrysu čtverce v porovnání s výpočtem v Abaqusu	40
Obrázek 43: Snímání většího mezikruží v porovnání s výpočtem z Abaqusu	40

Seznam grafů

Graf 1: Graf velikosti průtažné síly v čase.....	35
--	----

Seznam tabulek

Tabulka 1: Konzistentnost zadávaných jednotek v softwaru Abaqus	29
---	----

Seznam elektronických příloh

Příloha na CD: videa_protahovani_podlozky.rarvideo
protahování podložky drážkami kostek, kvádrů a plechů v Abaqusu 6.14 a v laboratoři