



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**KONSTRUKČNÍ OPTIMALIZACE VÝROBNÍ LINKY  
VYUŽITÍM ADITIVNÍ TECHNOLOGIE SLS**

PRODUCTION LINE OPTIMALIZATION BY USING SLS ADITIVE TECHNOLOGY

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Tereza Nakládalová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.**

**BRNO 2017**



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka:	<b>Bc. Tereza Nakládalová</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.</b>
Akademický rok:	2017/18

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 diplomové práce:

## **Konstrukční optimalizace výrobní linky využitím aditivní technologie SLS**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Již několik let je aditivní výroba značně používána v různých odvětvích průmyslu. V technologiích těchto výrobních metod lze navíc současně nalézt potenciál pro oblast konstrukce a vývoje dílu. Cílem práce je podrobné představení aditivní výroby, konkrétně metody SLS (selective laser sintering), a využití jejich benefitů oproti konvenčním výrobním metodám při návrhu a konstrukci manipulačních jednotek pro výrobní linku v potravinářském průmyslu. Výsledkem je řešení, které eliminuje problémové situace při manipulaci s produkty. V rámci práce je proveden návrh a realizace odpovídající nové součásti.

### **Cíle diplomové práce:**

1. Rešerše na téma aditivní technologie, především technologie Selective Laser Sintering (SLS), výhody a nevýhody technologie v porovnání s konvenčními metodami, popis limitujících prvků a praktické příklady
2. Analýza problematiky současného konstrukčního stavu použití manipulačních jednotek u výrobních linek
3. Zpracování konstrukčního řešení manipulátorů s ohledem na výrobu prostřednictvím technologie SLS
4. Realizace návrhu řešení a provedení zkoušky
5. Vyhodnocení dosažených výsledků a doporučení pro praxi

### **Seznam doporučené literatury:**

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně – nakladatelství VUTUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

ZELENKA, Antonín, Luděk VOLF a Antonie POSKOČILOVÁ. Projektování výrobních systémů: návody na cvičení. Vyd. 1. v Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 9788001043943.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá aditivní výrobou, konkrétně výrobní technologií Selective Laser Sintering (SLS), a implementací aditivní výroby do existujících odvětví průmyslu, při níž dochází k doplnění nebo přímo nahrazení stávajících prvků výrobní soustavy. Práce je zaměřená na konkrétní případ manipulační jednotky výrobní linky. Hlavními úkoly pro toto téma jsou analýza současného konstrukčního provedení včetně jeho nedostatků, návrh konstrukční optimalizace této jednotky s cílem využití prostředků technologie SLS, realizace návrhu řešení a závěrečné zhodnocení dosažených výsledků. Součástí je i výkresová dokumentace konstrukčního provedení.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis is focused on additive manufacturing, especially on technology Selective Laser Sintering (SLS) and the implementation of additive manufacturing into existing departments of industry, where current elements of systems are supplemented or directly replaced by new parts produced by these technologies. This thesis solves specific project of manipulation unit for manufacturing line. The main goals of the issue are analysis of current construction design and its deficiency, designing and optimalization of this unit in relation to SLS manufacturing technology, product realization and final evaluating of reached results. Part of the thesis is also design documentation.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Aditivní výroba, aditivní technologie, Selective Laser Sintering (SLS), funkční díl, gripper.

## **KEYWORDS**

Additive manufacturing (AM), additive technologies, Selective Laser Sintering (SLS), function part, gripper.



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Nakládalová, T. *Konstrukční optimalizace výrobní linky využitím aditivní technologie SLS*. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2016, 53 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych ráda poděkovala panu Pavlu Blahovi za poskytnuté materiály a cenné informace z praxe výroby linek pro potravinářský průmysl, které mi posloužily pro vytvoření této závěrečné diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat společnosti One3D s.r.o., jenž mi umožnila tento projekt realizovat a v neposlední řadě také svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Radku Knoflíčkovi, Dr., za podporu během zpracovávání diplomového tématu.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Radka Knoflíčka, Dr. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21. 5. 2018

.....  
Tereza Nakládlová



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>MOTIVACE.....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>ADITIVNÍ VÝROBA.....</b>	<b>19</b>
3.1	Rozdělení .....	19
3.1.1	Technologie Selective Laser Sintering .....	21
3.2	Trendy průmyslu.....	22
3.2.1	Omezení pro AM .....	22
3.2.2	Oblasti s výhodami aplikace AM .....	23
3.3	Příklady současné aplikace AM.....	24
3.3.1	Zdravotnický průmysl.....	24
3.3.2	Automobilní průmysl.....	25
3.3.3	Letecko-kosmický průmysl .....	25
<b>4</b>	<b>MANIPULAČNÍ JEDNOTKA VÝROBNÍ LINKY .....</b>	<b>27</b>
4.1	Analýza současného provedení a s ní spojená problematika.....	27
4.1.1	Problematika konstrukčního provedení .....	29
4.2	Příklady provedení za použití AM.....	30
<b>5</b>	<b>KONSTRUKCE VLASTNÍHO NÁVRHU .....</b>	<b>32</b>
5.1	Požadavky technologie SLS pro navrhování dílů.....	32
5.2	Koncepční návrhy .....	34
5.3	Konstrukční návrh manipulační jednotky.....	35
5.3.1	Výpočet.....	35
<b>6</b>	<b>REALIZACE NÁVRHU.....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>ZHODNOCENÍ A DISKUZE .....</b>	<b>42</b>
7.1	Analýza možných rizik .....	44
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>45</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>47</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>49</b>
10.1	Seznam zkratk .....	49
10.2	Seznam symbolů .....	50
10.3	Seznam tabulek .....	51
10.4	Seznam obrázků.....	51
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>53</b>



# 1 ÚVOD

Pojem aditivní výroba (zkratka AM – additive manufacturing) roste v oblasti průmyslu každým dnem na zvučnosti. Dříve se použití aditivních technologií ubíralo jedním směrem a hlavní zastoupení mělo převážně u rapid prototypingu. Postupně se však přišlo na to, že AM má své výhody i u jiných aplikací, než je pouhá výroba prototypů, a proto se s ní lze čím dál častěji setkat i při výrobě funkčních dílů nebo u malosériové produkce. Toto rozšíření možností nasazení aditivních technologií je důsledkem faktu, že při zachování funkčnosti dílu, či dokonce jejího navýšení, lze touto výrobou v některých případech dosáhnout nižších nákladů na zhotovení takové součásti.

Proto je důležité znát možnosti aditivní výroby již v první fázi vývoje dílu, a to při konstrukci a vývoji, kde lze využitím všech benefitů při návrhu dílu mnohé získat a ušetřit. Současná strategie firem zabývajících se AM je právě prezentování aplikací v různých oblastech průmyslu s cílem poukázat na možnosti, které aditivní technologie nabízí, a rozšiřovat tak pole jejich uplatnění.

Nejedná se však jen o nové součásti. Mnohem častěji aditivní technologie nahrazují předešlou výrobu, během níž bývá již zaběhlý díl pozměněn a optimalizován tak, aby se snížila jeho cena nebo se eliminovala jeho poruchovost. Průmysl tak díky aditivní výrobě prochází v současnosti jakousi revolucí, kdy spousta součástí mění svůj vzhled a způsob výroby, aby se ještě zvýšila efektivita výroby.

Tímto směrem lze i postupovat při návrhu optimalizace výrobní linky. Není nutné soustředit se na celý koncept, ale vybrat si pouze danou část, jejíž úpravou lze získat výhody pro celou soustavu výrobní linky, a tak postupně zvyšovat její efektivitu. V této práci je řešena konstrukční optimalizace manipulační jednotky výrobní linky pro potravinářský průmysl, která slouží k přenášení zmrzlinových kornoutů. Na jednotce je uveden příklad vhodné aplikace aditivní výroby s využitím jejích atributů. U stávajícího provedení neustále vznikal problém praskání svařených komponent během dynamického zatížení, což mělo za následek častou poruchovost a zvýšené náklady na výrobní linku. V novém konstrukčním návrhu bude jednotka řešena z polymerového materiálu a vhodnou optimalizací dílu pro použití výrobní technologie selective laser sintering (zkratka SLS) by měl být tento problém odstraněn.





## 2 MOTIVACE

Cílem této vysokoškolské závěrečné práce bylo samostatně zvolené téma, které se dotýká současné praxe v oblasti aditivních technologií v průmyslu. Práce je zaměřená na řešení praktického konstrukčního problému pomocí nově naskytnutých možností spojených s těmito technologiemi dle jejich současného stavu poznání. Velkou motivací bylo tedy seznámit se s aktuální situací aditivní výroby v praxi a rozšířit si znalosti o těchto neustále se vyvíjejících technologiích. Důležitým bodem pro tuto práci byla spolupráce se společností One3D s.r.o., díky níž bylo získáno mnoho cenných informací a která umožnila práci hmotně realizovat. Tato mladá společnost působí na českém trhu již přes 2 roky a jejím hlavním zaměřením je právě výroba dílů prostřednictvím aditivních technologií.

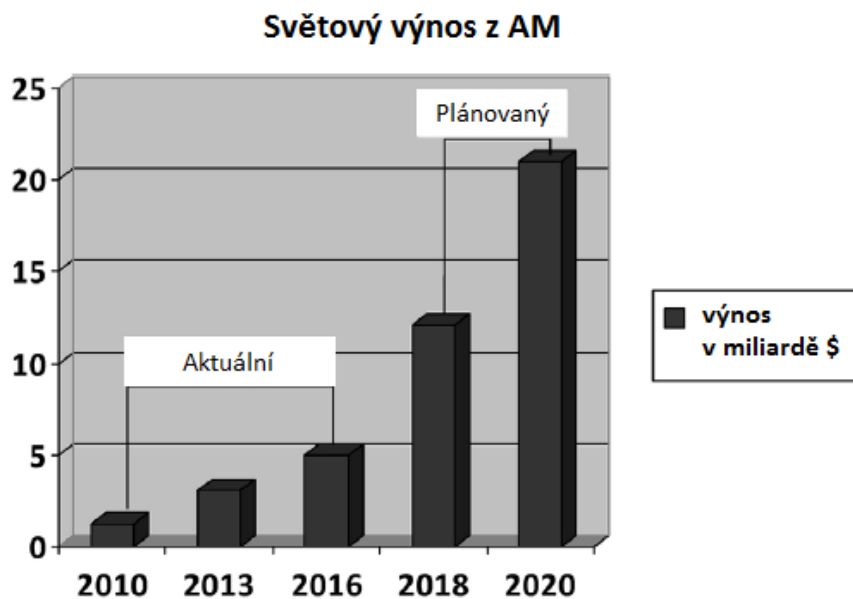
Vypracování této práce a získání nových znalostí by mohlo být dále využitelné právě pro tuto zmíněnou firmu v jejím rozvoji, a vyplynout tak i další spolupráce po absolvování studia.



### 3 ADITIVNÍ VÝROBA

Aditivní výroba, tak jak je známá v současné době, existuje již déle jak přes 30 let. Její prvopočátky lze datovat do poloviny 80. let 20. století, kdy na trh přišel první aditivní stroj, pracující na bázi stereolitografie [1]. Podle normy ISO/ASTM 52900:2015 je aditivní výroba definovaná jako proces postupného nanášení a spojování materiálu, obvykle po jemných vrstvách, s cílem vytvořit hmotný předmět z 3D modelových dat [2]. Tento princip přidávání materiálu je tak protikladem ke tradičním technologiím, u nichž je materiál při výrobním procesu zpravidla odebírán.

Často bývá aditivní výroba nahrazována výrazem 3D tisk, kdy smysl těchto slov nebývá zcela stejný a i zmíněná norma ISO/ASTM 52900:2015 tyto pojmy různě definuje. Obecně však lze říct, že aditivní výroba je masivnější aplikace 3D tisku v průmyslu [3]. Její využití zasahuje do širokého pole průmyslových odvětví. Hlavní uplatnění má v automotive, letectví, vojenství, obecném strojírenství, kosmickém průmyslu, biomedicině, architektuře, fluidní technice atd. Tento nárůst aplikací AM společně se snížením ceny za její pořízení zajistil ohromný vzrůst těchto technologií na trhu a jejich expanze je dle organizace Wohlers Associates, která každoročně vydává analytickou zprávu o aditivní výrobě a průmyslu 3D tisku, očekávána i nadále (Obr. 3.1) [3], [4].



Obr. 3.1 Světový výnos z AM pro dané roky [3]

#### 3.1 Rozdělení

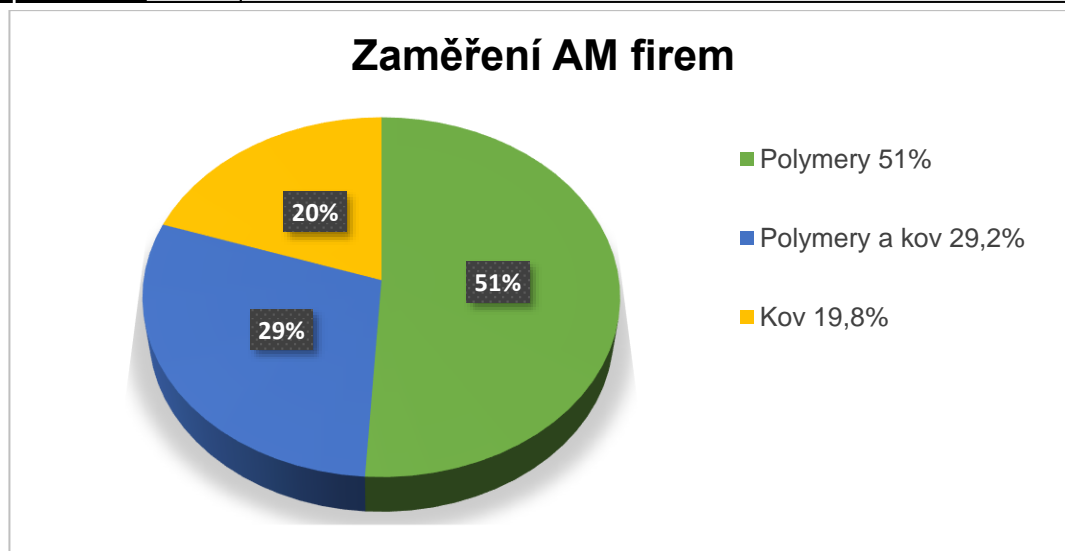
Většina průmyslových 3D tiskáren má podobný princip fungování, kdy z původního CAD modelu vytváří trojrozměrný objekt. Hlavním krokem je rozložení 3D modelu do několika 2D průřezů, které jsou souborem informací pro stroj z hlediska nanášení materiálu a působení zdrojů energie. Následný výrobní proces se ale může lišit. Norma ISO/ASTM 52900:2015 kategorizuje aditivní výrobu do 7 sekcí na základě morfologie nebo

dodávky výchozího materiálu a způsobu jeho vázání. Jednotlivé procesy i s jejich krátkým popisem jsou uvedeny v tabulce (Tab. 3.1) [5], [6].

Tab. 3.1 Kategorie aditivní výroby dle normy ISO/ASTM 52900:2015 [7], [8]

Název procesu	Charakteristika procesu	Technologie
<b>Binder Jetting</b>	Při tomto procesu dochází tryskami k nanášení tekutého pojiva ve formě kapiček na základní materiál v podobě prášku. Pojivo působí jako adhezivum mezi jednotlivými vrstvami prášku.	BJ
<b>Directed Energy Deposition</b>	Pod tímto pojmem se ukrývá soubor procesů, které využívají soustředěnou tepelnou energii pro roztavení a spojení materiálu, který je ve formě prášku nebo drátu cíleně přiváděn do místa působení tepelného zdroje. Obvyklým tepelným zdrojem bývá laser nebo elektronový paprsek.	LENS, EBAM
<b>Material Extrusion</b>	Materiál je veden přes trysku, která jej nanáší na platformu. Při průchodu tryskou dochází k ohřátí a roztavení materiálu ještě před nanesením.	FDM
<b>Material Jetting</b>	Proces spočívá v selektivním nanášení malých kapek na stavební platformu. Běžně se používají fotosenzitivní termosetové polymery, jež jsou po každé nanesené vrstvě vytvrzovány.	MJ, NPJ, DOD
<b>Powder Bed Fusion</b>	Při tomto procesu dochází k vystavení celé plochy naneseného materiálu tepelnému zdroji, jenž umožní spojení výchozího práškového produktu. Klasický tepelný zdroj představuje laserový nebo elektronový paprsek.	MJF, SLS, DMLS/SLM, EBM
<b>Sheet Lamination</b>	U těchto procesů je každá vrstva tvořena tenkým plátem či listem materiálu. Při každém nanesení dojde ke slepení vrstvy, resp. listu s předchozím a k vyřezání tvarových kontur.	LOM
<b>Vat Polymerization</b>	Pomocí ultrafialového laseru se v nádrži s tekutou fotosenzitivní pryskyřicí mění struktura materiálu na pevnou látku. K tomuto vytvrzování dochází vždy po vrstvách v konkrétních místech působení ultrafialového světla.	SLA, DLP, CDLP

Toto rozdělení procesů na základě jejich charakteristiky může posloužit i pro následné rozlišení samotných aditivních technologií (Tab. 3.1). Významný vliv má také výchozí materiál a pro každou technologii existují konkrétní typy materiálů. Nejčastěji používané jsou plasty a kovy, ale lze se setkat také s různými kompozity, gumami, pryskyřicemi, keramikou, sklem nebo betonem [3]. Na diagramu níže (Obr. 3.2) lze vidět z průzkumu společnosti Wohlers Associates rozdělení zaměření produkce AM firem, a to pro nejsilnější zástupce materiálu – kov a plast. Více než polovina dodavatelů součástí vyráběných aditivními technologiemi orientovalo v roce 2017 svoji výrobu výhradně na plast a pouhých 20 % vyrábělo pouze z kovových materiálů. Zbytek mapovaných aplikovalo kombinovanou produkci.

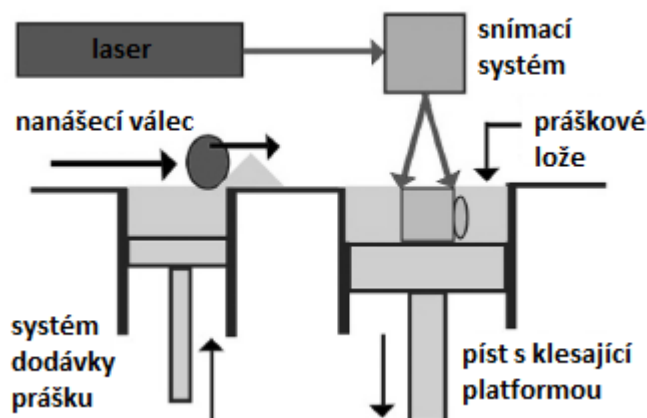


Obr. 3.2 Materiálové zaměření firem pro rok 2017 [9]

Dvěmi nejrozšířenějšími AM technologiemi produkující plastové díly jsou SLS (Selective Laser Sintering) a FDM (Fused Deposition Modeling), přičemž metoda SLS má větší předpoklady pro průmysl ve výrobě geometricky komplexních a rozměrově přesných dílů s dobrou mechanickou pevností [3], [10].

### 3.1.1 Technologie Selective Laser Sintering

S polymery spojená technologie SLS spočívá ve spékání tenkých vrstev naneseného plastového prášku pomocí CO<sub>2</sub> laseru, který je řízený počítačem stroje. Celá pracovní komora je vyhřívána na teplotu blízkou bodu tavení materiálu, aby se minimalizovala potřebná energie laseru a nedocházelo k deformacím vlivem vysokých teplotních rozdílů. Stejně tak je vstupní materiál předehříván v zásobnících, ze kterých je prášek odebírán. Podle předepsané geometrie pro každou vrstvu spéká laser místa práškového lože. Jakmile je proces v jedné vrstvě dokončen, sníží se pracovní platforma a válec nebo čepelový utvářeč nanese další vrstvu materiálu. Tento postup se opakuje v průběhu celé výšky stavby (Obr. 3.3). Celý děj probíhá v dusíkové atmosféře, aby nedošlo ke vznícení vlivem vysokých teplot nebo k reakci materiálu s kyslíkem. To platí i během fáze chlazení ve stroji po dokončení stavby [10].



Obr. 3.3 Ilustrace stavěcího procesu technologie SLS [3]

Protože jsou vyráběné díly v celém pracovním objemu obklopeny nespečeným práškem, má tato technologie výhodu oproti ostatním, že nemusí stavět žádné podpory. Jelikož hustota polymerů není tak velká jak u kovů, nemají díly tendenci kvůli své hmotnosti klesat na dno stavebního prostoru. Okolní prášek je schopen udržet pozici dílů sám. Díky tomuto faktu odpadá časová náročnost postprocessingových operací, při nichž by musely být tyto podpory odstraňovány. Po ukončení a ochlazení stavby jsou díly z práškového lože vytaženy, ofoukány od ulpěného prášku a otryskány pro lepší vyhlazení povrchu. Podle typu materiálu, např. u polymeru PA12, se zbytek nespečeného materiálu ze stavby může použít pro další výrobu v kombinaci s přimíchaným novým práškem. Tím lze ušetřit na nákladech za vstupní materiál a snížit objem výrobního odpadu [5].

Pro technologii SLS je vstupní materiál vždy v podobě prášku. Jedná se převážně o semikrystalické látky, lišící se ve svých vlastnostech. Hlavním a nejčastěji používaným zástupcem je polyamid 12 (PA12), dále pak polyamid 11 (PA11) a příměsi obou těchto materiálů se sklem, karbonem nebo kovem (konkrétně hliníkem). Lze se setkat i s polystyreny (PS), polypropyleny, polyestery, polyetherketony (PEK) a termoplastické polyuretany [1].

## 3.2 Trendy průmyslu

Následkem poklesu nákladů za 3D tisk a vzrůstající účelností těchto technologií má aditivní výroba velký potenciál pro využití i v následujících letech. Tato vlna masivní implementace aditivní výroby do všech různých odvětví věd a techniky je faktem toho, že tento poměrně mladý směr je schopen výborně se přizpůsobovat trendům průmyslu. Současný vývoj průmyslu se ubírá k inovování zaběhlých procesů a technologií, k maximální automatizaci výrobní sféry a k hledání úspornějších řešení z hlediska nákladů i času. Proto začali výrobci aditivních strojů rozšiřovat výrobní kapacity jednotlivých zařízení, aniž by výrazně zvýšili kupní cenu, čímž se tato investice za pořízení stala pro uživatele zajímavější. Neustále se zkracuje pracovní doba stroje, ať už nepřímo ve fázi nanášení materiálu nebo jeho vytvrzování během procesu, tak přímo na vyráběné součásti vhodnou konstrukční úpravou urychlující AM. Stejně tak se vyvíjí snaha eliminovat co nejméně lidských zásahů do procesu a výrobu co nejvíce automatizovat, aby mohla být dostupná pro kohokoliv [3].

Těmito úpravami se snaží dosáhnout producenti aditivních strojů konkurenceschopnosti aditivní výroby vůči tradičním technologiím a zvýšit tak odbyt jejich produktů.

### 3.2.1 Omezení pro AM

S vzestupem aditivní výroby došlo k mírnému utlumení konvenčních metod, neboť AM s sebou přinesla nové možnosti pro zlepšení efektivity výroby a její inovaci. Očekává se, že se objeví v mnoha specializovaných oblastech, avšak jejím cílem není tradiční technologie odstranit a nahradit. Naopak vyhledává skuliny na trhu, kde konvenční postupy zadržávají a které by mohla využít ve svůj prospěch.

Implementace aditivní výroby v průmyslu se setkává ale i s několika překážkami. Jedná se například o rozměrové limity. Velikost vyráběného dílu je vždycky omezena rozměry stavebního prostoru stroje, takže větší součásti nemohou být vyráběny vůbec nebo musí být rozděleny na menší kusy, což pro změnu s sebou přináší čas navíc pro montáž dílu dohromady. V případě jednoho nebo pár kusů jsou tyto technologie časově výhodné. Avšak v případě masové produkce je použití AM velmi pomalé a naprosto nevhodné. Využití je spíše u výroby tzv. masové customizace, kdy je každý produkt přizpůsobován požadavkům zákazníka

a vyráběn v omezených počtech do zásob. Další položkou, která rozhoduje u aditivních technologií, je pořizovací cena. Díky technickému vývoji a narůstající konkurenci začíná cena strojů pomalu klesat. Na evropský trh začínají pronikat levnější čínské stroje, které doposud nebyly kvalitativně srovnatelné, avšak nyní se ukazují nebezpečnými konkurenty pro evropské a americké výrobce. Tato skutečnost sráží cenu dolů, takže jejich pořízení je dostupnější. Podobnou situaci prochází i náklady za vstupní materiál, u něž je možné očekávat zlevnění důsledkem vznikajících firem, které se zabývají výrobou materiálu pro účely aditivních technologií recyklováním odpadu [3].

Rychlý vzrůst a adaptace těchto 3D technologií může mít však největší problém ze strany právních předpisů a regulí, které nestíhají tento vývoj podchytit. Se zvyšující se dostupností výrobních strojů lze říci, že kdokoli si v současnosti může vyrobit cokoli, což v nesprávných rukou může být pro lidstvo nebezpečné. Tato hrozba může přinést legislativní omezení a mít za následek pokles expanze aditivní výroby [3].

### 3.2.2 Oblasti s výhodami aplikace AM

Jak již bylo zmíněno, začlenění aditivní výroby přineslo pro mnohé firmy příležitost, jak zefektivnit svoji produkci a snížit náklady na ní. Do jisté míry s sebou přináší výhody ve věcech konkurenceschopnosti, jako jsou cena, kvalita, rychlost, flexibilita a spolehlivost [11]. Čerpání benefitů z AM platí především v těchto bodech [3], [12]:

**Průmyslová užítkovost** – existencí celosvětově přístupné databáze 3D modelových dat jednoduchých náhradních dílů na internetu si může firma vlastníci 3D tiskárnu vyrobit součásti pro opravu svých zakoupených zařízení sama. Tato představa je součástí průmyslové revoluce spojené s aditivní výrobou, kdy každý spotřebitel by se stal zároveň i mikro-producentem.

**Masová customizace** – ve sféře masové produkce individualizovaných dílů je ideální použití AM pro snížení nákladů. Navíc díky její flexibilitě může být součástí kdykoliv před vlastní produkcí pozměněna, aniž by to nijak výrazně ovlivnilo dobu dodání.

**Cloud manufacturing** – aditivní technologie umožňují snadnou výrobu náhradních součástí a harmonizují tak s novým modelem tzv. cloudové výroby, jejíž hlavní myšlenkou je s pomocí cloudového computingu virtuálně sdílet výrobní informace, zdroje a kapacity v průběhu celého životního cyklu produktu. Tím by se stala výroba takového produktu nezávislá na konkrétním místě a mohla být situována do okolí zákazníka prostřednictvím místních distributorů a poskytovatelů služeb. Tomuto modelu napomáhá současné klesání cen a levnější pořízení aditivních technologií nárůstem konkurujících prodejců aditivních strojů a zařízení.

**Decentralizovaná výroba** – rozmístěním výrobních destinací blíže ke koncovému zákazníkovi vzniká příležitost pro snížení nákladů na logistiku, negativního dopadu na životní prostředí z transportu a zkrácení termínu dodávky. Jelikož přenos výrobních dat se děje digitálně, není potřeba výrobu centralizovat.

**Zakázková výroba** – jedna z hlavních výhodných aplikací AM je zakázková výroba malého počtu dílů, při níž musí být dodrženy specifikované tolerance. V této oblasti dochází k hlavnímu nárůstu AM, především výsledkem zvyšující se kvality produkovaných dílů.

**Tisk kompletních a komplexních soustav** – schopnost vyrobit tvarově složitý, strukturovaný díl jako jeden celek je obrovský benefit, který povyšuje AM oproti konvenčním metodám. Některé aditivní technologie jsou dokonce přizpůsobené vyrábět jednu součást z více

druhů materiálu a kombinovat tak vlastnosti dílu bez spojů, jenž mohou být kritickým místem pro životnost součásti. Navíc odpadá nutnost montáže.

**Zvýšení kvality** – současným trendem pro zlepšení kvality AM dílů je docílit lepší estetiky (např. hladší povrch) a funkčnosti (např. mechanické vlastnosti) dílů. Během přípravy dat jde tyto aspekty mírně ovlivnit např. orientací dílu při výrobě nebo procesními parametry. Případně je možné zahrnout další postprocesové úpravy.

**Úprava a redesign modelu** – pro zákazníky je důležitým faktorem flexibilita. Často dochází mezi dobou poptávky a objednávkou k úpravě dat. Jelikož pro výrobu samotného dílu není potřeba žádných okolních nástrojů, nijak zvlášť tato změna neovlivní výrobní proces ani termín dodání.

**Profitování v oblasti Supply Chain Managementu** – přítomností AM lze umožnit urychlení celého dodavatelského řetězce. Díky digitalizaci celé přípravy procesu odpadá přeprava dílů v této fázi a během výrobního procesu, čímž je opět ušetřen čas a s ním spojené náklady. Termíny dodání mohou tak být kratší.

**Nízký ekologický dopad** – aditivní technologie zanechávají minimum odpadu. Z jejich podstaty využívají pouze potřebné množství materiálu pro výrobu, čímž ušetří na nákladech za vstupní materiály.

**Rapid Prototyping** – absence větší přípravy procesu výroby nahrává rychle proměnným dílům, které potřebují okamžitou výrobu a hmotný výsledek v řádu i několika hodin. Většinou se jedná o vývojové prototypy a designové prvky.

### 3.3 Příklady současné aplikace AM

Aplikování aditivní výroby lze v současné době zahlédnout již v mnoha odvětvích. Největší význam pro ně mají automobilní, letecko-kosmický průmysl a zdravotnictví. Na těchto oborech stojí hlavní využití 3D technologií [3].



*Obr. 3.4 Kotníková / chodidlová ortéza společnosti plus medica OT [13]*

#### 3.3.1 Zdravotnický průmysl

V oblasti zdravotní péče se AM rozšířila u výroby protetik, ortéz a implantátů (Obr. 3.4). Podíl na tom má stále probíhající vývoj nových, pro člověka kompatibilních



materiálů, tzv. bio-materiálů. Do budoucna se dokonce počítá s produkcí náhradních lidských orgánů a v tomto směru jsou již podnikány pozitivní kroky [3]. Výhodou těchto technologií je možnost customizovat každý vyrobený kus a uzpůsobit ho potřebám pacienta, tj. například zahrnout do přípravku struktury a udělat tak materiál flexibilnější, lehčí a vzdušnější. Nebo naopak některá místa zesílit a zpevnit, omezit spoje a díl vyrábět v celku. Produkt může vyhovět také individuálním designovým požadavkům zákazníka [13].

### 3.3.2 Automobilní průmysl

První aplikace 3D technologií byly zavedeny v automobilním průmyslu pro výrobu prototypů, aby zkrátily vývojovou dobu produktu, a tím ušetřily i náklady na vývoj. Dnes je však využití AM rozšířeno i na funkční díly. Také v automobilním průmyslu roste v určitých případech nutnost řešit specifické požadavky zákazníka, které vybízejí k inovacím a dávají prostor pro malosériovou výrobu. Aditivní výroba dovoluje realizaci dílů již jako funkčních dílů, aniž by bylo nutné jejich následné obrobení. Příkladem může být konstrukční úprava vodícího kloubu čepu nápravy pro závodní formuli pomocí topologické optimalizace. Pomocí vhodného softwaru je součástka upravena tak, aby zachovala svoji funkčnost a mechanické vlastnosti, a přitom došlo k redukci nepotřebného materiálu v místech, které nepodléhají zatížení (Obr. 3.5). Kloub si tak zachovává co nejvyšší možnou pevnost a tuhost, ačkoliv dojde k redukci materiálu a hmotnosti součástky, což má pozitivní vliv na ovládání formule [14].



Obr. 3.5 Topologicky optimalizovaný vodící kloub čepu nápravy [14]

### 3.3.3 Letecko-kosmický průmysl

Výhodou aditivní výroby je příležitost decentralizované produkce, kterou je možné zahájit kdekoli. Toho využívá kosmický průmysl a umísťuje aditivní stroje na mezinárodní vesmírné stanice, kde slouží k výrobě komponentů pro soběstačnou údržbu a opravu objektu, aby se zamezilo vysokým nákladům spojených s dodávkou a zbytečně dlouhé době realizace oprav.

Díky nabízeným vlastnostem produktů pocházejících z aditivní výroby jsou tyto technologie často využívány pro komponenty letadel, jako jsou součásti turbín a motorů (Obr 3.6), případně komponentů do interiéru kabin. Hlavní výhodou je nízká váha, kterou lze topologickou optimalizací dílu získat, a přitom zachovat původní pevnostní vlastnosti. Každý kilogram navíc znamená zvýšené výdaje za palivo [3].



*Obr. 3.6 Krielova sonda pro měření tlaku v motoru vyrobená technologií DMLS [15]*

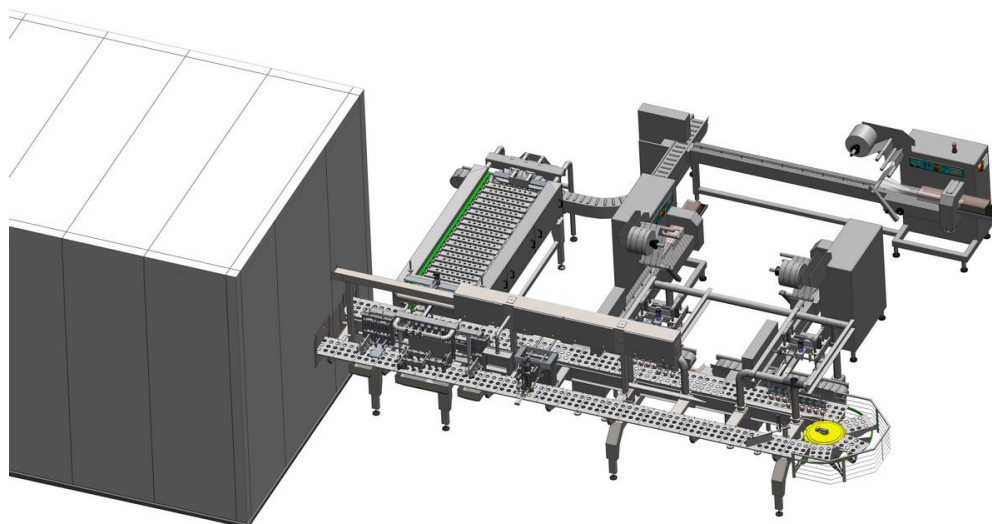
## 4 MANIPULAČNÍ JEDNOTKA VÝROBNÍ LINKY

Hlavním zaměřením této práce jsou výrobní linky v potravinářském průmyslu. Tyto linky musí kromě samotné funkčnosti splňovat také hygienické podmínky, na které je v potravinářském průmyslu kladen značný důraz. Aby nedošlo k nežádoucí kontaminaci produktů, používají se zdravotně nezávadné a sterilizované materiály. V tomto směru je žádoucí maximální automatizace linky, kdy lidská obsluha bývá nahrazena manipulátory nebo roboty, jež jsou navrženy tak, aby odpovídaly svým designem hygienickým předpisům, jednoduše se čistily, byly nízkonákladovým řešením, které šetří lidskou práci a svou rychlostí při uchopování a manipulaci uspoří čas.

Pro roboty a manipulátory bývá u potravinářských linek nejběžněji používaným energetickým médiem vzduch. Pneumatické pohony se obzvláště využívají pro řízení jednotlivých manipulačních jednotek, jako jsou koncové efekторы nebo výstupní hlavice. Použití pneumatických akčních členů umožní vytvořit jednoduchý, flexibilní konstrukční systém pro uchopování a přenášení pevných objektů. U těchto manipulačních jednotek je cílem jednoduchost, pevnost, rychlost a nízká váha, avšak v jistých směrech jsou jejich vlastnosti, vzhled i pohyb limitovány [16].

### 4.1 Analýza současného provedení a s ní spojená problematika<sup>1</sup>

Na obr. 4.1 je model výrobní linky na zmrzlinu, která byla vybrána pro optimalizaci. Celou výrobní soustavu tvoří různá pracoviště a spousta prvků. Je-li cílem u takovéto linky provést optimalizaci prostřednictvím použití aditivních technologií, nelze postupovat komplexně, ale naopak se vyhledávají jednotlivé části linky, kde by tyto technologie mohly být přínosné a mít pozitivní význam ve zpětném pohledu na linku jako celek. Proto se tato práce zaměřuje pouze na jednu oblast, a to koncový efektor manipulátoru (*Obr. 4.2*), jehož funkcí je uchopení kornoutu a přenesení z dopravníku na pás.



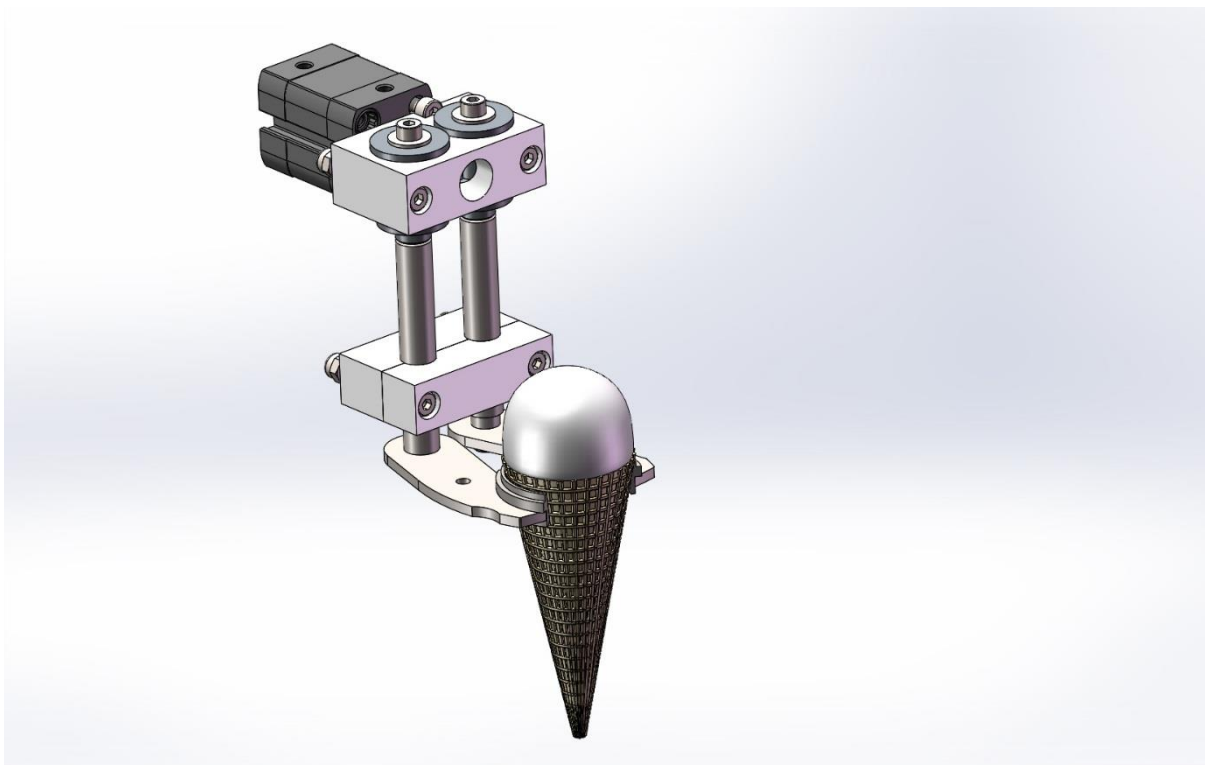
*Obr. 4.1 Automatická výrobní linka ARCTIC EX [17]*

<sup>1</sup> Informace pro tuto kapitolu byly získány od pana Pavla Blahy, vedoucího konstrukce ve společnosti Vojta Ice Cream Equipment, s jehož svolením jsou v této závěrečné práci použity.

Pohybový mechanismus je zde realizován převodem přímočarého pohybu na rotační. Hřeben poháněný pneumatickým motorem koná lineární pohyb, přičemž jeho zuby zapadají mezi kolíky na unášecím čepu, a tím se čep v omezeném rozpětí otáčí. Hřídelka nesoucí uchopovací prst je s tímto čepem pevně spojena, čímž dochází k výslednému natáčení uchopovacího prstu. Celý rotační aparát je symetricky řešen pro oba prsty zařízení zvlášť, takže dochází k současnému sevření nebo rozevření čelisti. Specifické údaje pro tento typ manipulační jednotky jsou následující (Tab. 4.1):

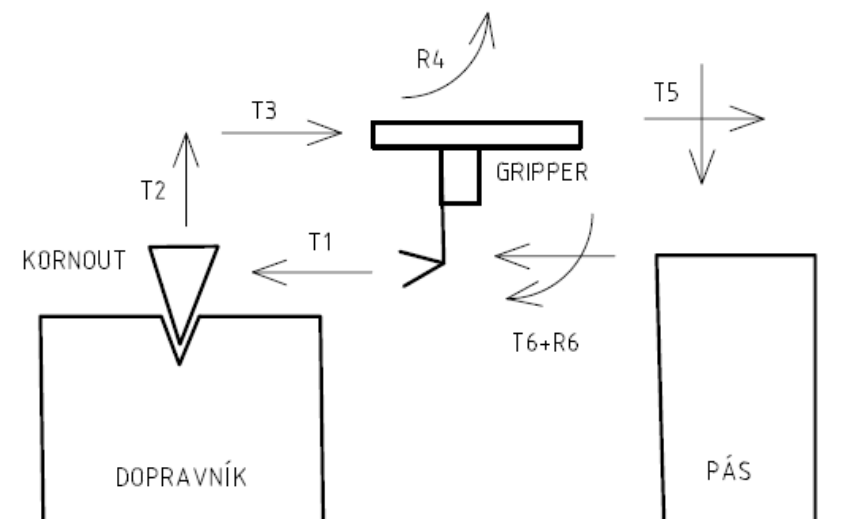
Tab. 4.1 Údaje manipulační jednotky výrobní linky a kornoutů

<b>cena</b>	2000,- Kč
<b>rozměr</b>	58,6 x 119,8 x 104,4 mm
<b>počet součástí</b>	28 dílů
<b>hmotnost</b>	365 g
<b>rychlost otevření, sevření</b>	0,2 s
<b>doba 1 cyklu</b>	3,6 s
<b>životnost</b>	10 <sup>7</sup> cyklů
<b>průměr uchycení kornoutu</b>	37 mm
<b>úhel kuželovitosti kornoutu</b>	21°



Obr. 4.2 Uchopovací blok pro kornouty (Zdroj: Vojta Ice Cream Equipment)

Celý blok je upevněn čtyřmi šrouby na rameno manipulátoru. Vykonaovaný pohyb jednotky začíná přímočarým částečným najetím uchopovacími prsty mezi řazené kornouty, které jsou zasunuty v kuželových otvorech desky na stole. Po sevření je zmrzlina vytažena nad úroveň stolu a jednotka se vrací do původní polohy v ose X. V tomto bodě dojde k otočení ramene manipulátoru o 90° a pak současnému posunutí bloku v ose X nad úroveň pásu a poklesu výšky v ose Z. Zde se čelisti otevřou a upustí kornout na pás. Následně se jednotka vrátí v ose X na původní startovací bod a během tohoto pohybu dojde i k otočení ramene o 90° zpět. Tento cyklus pohybu je schematicky znázorněn na obr. 4.3. Popisované zařízení pracuje pouze v jednořadém uspořádání.



Obr. 4.3 Schéma pohybu manipulační jednotky v 1 cyklu

#### 4.1.1 Problematika konstrukčního provedení

Analyzováním výše popsaného konstrukčního řešení uchopovacího bloku při použití v praxi u linky na výrobu zmrzliny, vyvstalo několik aspektů, u nichž lze nalézt prostor pro zlepšení dosavadní efektivity linky v souvislosti s touto manipulační jednotkou. Jedná se především o příčiny poruchovosti, které je cílem eliminovat.

Kvůli práci s vysoce zmraženými produkty, jejichž teplota se pohybuje okolo  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dochází k ovlivnění materiálových vlastností nejen produktů, ale i manipulační jednotky. V obou případech se zvyšuje křehkost dílů. Při nesymetrickém uchopení produktu mimo osu vznikají rázy, které vedou k rozlomení kornoutu se zmrzlinou a navyšování výrobní zmetkovitosti, ale můžou vést i k tvorbě trhlin na manipulační jednotce. Nejvíce náchylná jsou svařovaná a úzká místa. Navíc používáním nezbytných dezinfekčních a čistících prostředků v potravinářském průmyslu musí součásti často odolávat extrémním látkám, jako jsou kyselina fosforečná, kyselina dusičná, hydroxid sodný, hydroxid draselný a jiné. Ty pak při zatečení do spár nebo trhlin urychlují proces rozpadu součástí. Aby se předešlo vysoké četnosti poruch a přitom řešení bylo cenově přijatelné, musí se kombinovat běžné součásti s odolnými materiály jako je nerez, z něhož jsou například otáčecí kolíky, anebo plast. Ten bývá využit pro čepy nasazené na hřídelkách, avšak jeho nevýhodou je, že se plastový čep po čase velmi opotřebí. Vzniklé vůle jsou pak důvodem nesymetrického chodu úchopů čelisti a vzniků zmíněných rázů. Nejvíce opotřebovanou součástí bývá však hřeben, na který přímo přechází rázy od motoru.

## 4.2 Příklady provedení za použití AM

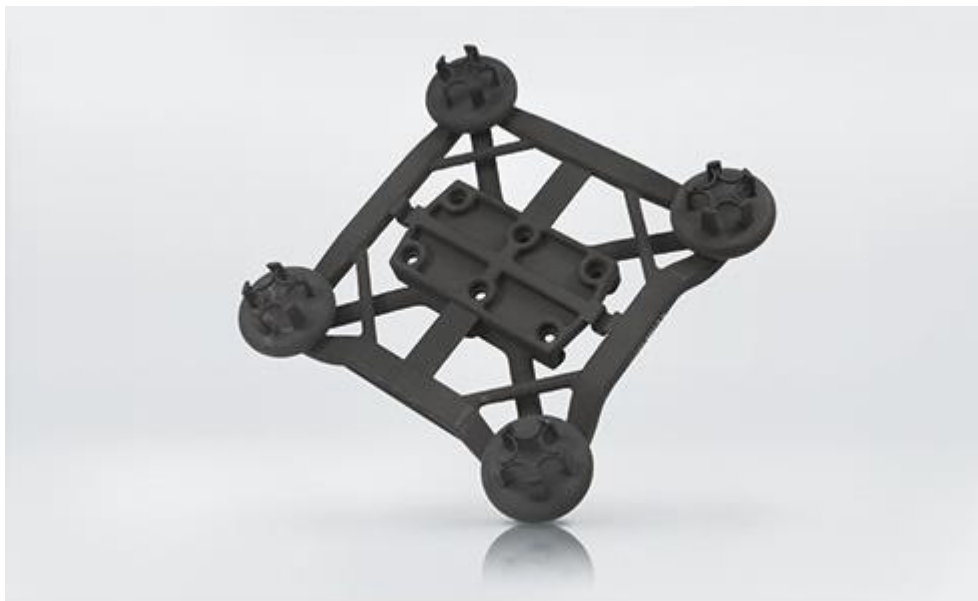
Aditivní výroba byla již použita i pro některé příklady realizace uchopovacích zařízení. Namísto komplexního řešení jednotky pro dosažení vysoké pohyblivosti, pracuje AM s menším počtem pohonů, než ve výsledku dosahuje stupňů volnosti. To přináší výhody, jako jsou nízká cena, hmotnost, velikost, rychlost a přizpůsobivost se konkrétnímu produktu. Pro potravinářský průmysl se využívá polymer PA12, který je ověřen jako nezávadný materiál pro použití při kontaktu s potravinami. Tento plast má vlastnosti, které jsou vhodné na konstrukci pneumatických pohonů a deformačních členů uchopovacích zařízení. Součásti však musí být navrženy tak, aby vzdorovaly stálé deformaci, která je u AM prvků častá [16].

Příkladem takového provedení je jedinečný adaptivní manipulátor společnosti FESTO (*Obr. 4.4*). Čapadla manipulátoru jsou složena z jednotlivých sekcí vzduchových komor, vyvozující konečný pohyb koncového efektoru. Struktura tohoto koncového členu, resp. jeho prstů, je tvořena ze dvou pružných pásů, jež jsou na konci spojeny do špičky. Mezi těmito pásy jsou umístěná žebra, která tyto 2 stěny v pravidelných vzdálenostech přes kloubové vazby spojují. Při roztažení centrální vzduchové komory efektoru dojde k prohnutí vnitřních stran prstů a článek se sevře. Právě díky této struktuře prstů je efektor schopný adaptivního sevření, spočívající také v citlivém obehnutí objektů [18].



*Obr. 4.4 Adaptivní čelist manipulátoru FESTO [19]*

Velké využití mají AM při konstrukci výstupních hlavic. Díky své schopnosti vyrobit tvarově složité, strukturované díly mohou tyto hlavice plnit funkci manipulátoru bez potřeby dalších součástí. Tím lze snížit počet potřebných komponentů a zredukovat jejich váhu. Společnost Kuhn-Stoff přišla s uchopovacím systémem, využívající pružnou membránu s konstruovanou čelistí (*Obr. 4.5*). Jakmile na membránu zapůsobí proud stlačeného vzduchu, konvexně se deformuje, čímž roztáhne čelisti od sebe, a tak může uvolnit svírající předmět [20].



*Obr. 4.5 Výstupní uchopovací hlavice s membránami a pohyblivými čelistmi [20]*

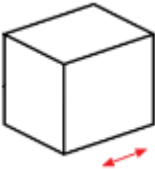
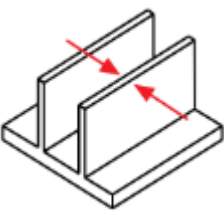
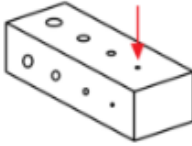
## 5 KONSTRUKCE VLASTNÍHO NÁVRHU

Hlavním cílem při vlastním návrhu řešení manipulační jednotky bylo využití výrobní technologie SLS. U každé technologie však existují omezení, která specifikují jistá pravidla, jenž je nutné dodržet. Také u metody Selective Laser Sintering se vyskytují požadavky při konstrukci součástí vyráběných touto metodou.

### 5.1 Požadavky technologie SLS pro navrhování dílů<sup>2</sup>

Konstrukce pro SLS výrobu musí být nejdříve seznámena s omezeními, které tato technologie má, aby mohly být splněny všechny podmínky vyrobitelnosti a dosáhlo se co nejlepšího výsledného dílu. Rozsah těchto omezení se samozřejmě liší podle použitého výrobního stroje, materiálu a tloušťky nanášené vrstvy. Pro tuto závěrečnou práci bude využit stroj pro polymerovou výrobu **EOS P 396** od společnosti EOS GmbH. Vybraným materiálem je polyamid PA12, s označením **PA2200**, dodávaný též firmou [21]. Velikost výrobní vrstvy je **120 μm**. Pro tuto kombinaci je důležité splnit tyto požadavky (Tab. 5.1) [22]:

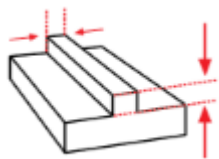
Tab. 5.1 Požadavky technologie SLS na vyrobitelnost dílu

Vlastnost	Popis
	<p><b>Velikost dílu</b> = velikost dílu je limitovaná velikostí stavebního prostoru stroje. Díly přesahující rozměry přibližně poloviny stavebního prostoru bývají děleny na kusy a vyráběny zvlášť. Díl je pak kompletován, tzn. lepen během postprocessingu.</p> <p>Stavební prostor pro EOS P 396 je 340 x 340 x 620 mm, avšak jeho využitelný prostor je zmenšen o faktor navýšení<sup>3</sup>.</p>
	<p><b>Tloušťka stěny</b> = minimální tloušťka stěny je během výroby při orientaci v ose X a Y obecně 0,7 mm. Pro osu Z je možné dosáhnout menší tloušťky, jelikož není ovlivněna průměrem laseru ale šířkou vrstvy.</p> <p>Pro zachování reprodukovatelnosti měření mechanických vlastností dílu se doporučuje tloušťka stěny minimálně 1,5 mm.</p>
	<p><b>Velikost díry</b> = minimální velikost díry velice souvisí s tloušťkou stěny, od které se odvíjí. Pro minimální tloušťku stěny, tj. 0,7 mm musí mít díra průměr alespoň 0,6 mm. S narůstající tloušťkou stěny musí být větší i průměr díry.</p>

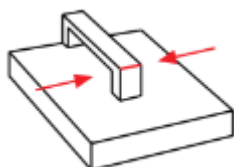
<sup>2</sup> Veškeré informace pro tuto kapitolu byly získány z interních dokumentů společnosti One3D s.r.o. a EOS GmbH, s jejímž svolením jsou v této závěrečné práci použity.

<sup>3</sup> Faktor navýšení automaticky kompenzuje smršťování dílů a je definován pro každý materiál zvlášť.



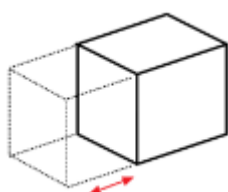


**Velikost detailů** = pro viditelnost detailů nebo textu se doporučuje vystouplost a šíře minimálně 0,5 mm, a naorientování během výroby v ose Z. To samé platí i pro zahhloubené detaily.



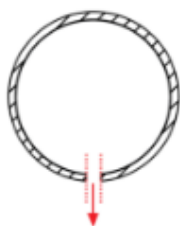
**Velikost pinů** = pro vyrobiteľnosť výstupků jako jsou např. piny se doporučuje tloušťka alespoň 0,8 mm.

Pro zachování reprodukovatelnosti měření mechanických vlastností dílu se doporučuje tloušťka minimálně 1,8 mm.



**Tolerance a vůle dílů** = u procesů AM je možné pracovat pouze se symetrickými tolerancemi. Udávaná tolerance pro SLS díly je  $\pm 0,3\%$  z rozměru, s minimální hranicí  $\pm 0,3$  mm [23].

Pro těsný spoj 2 dílů vyráběných odděleně se doporučuje vůle mezi nimi 0,1 mm a orientace při výrobě v ose X a Y. U dílů vyráběných v sobě se udává mezera alespoň 0,3 - 0,5 mm v osách X a Y, pro osu Z je to 0,5 – 0,6 mm<sup>4</sup>.



**Odstranění prášku** = design dílu musí umožnit odstranění nespečeného prášku z vnitřních dutin. Díl musí být navržen tak, aby v případě potřeby obsahoval dostatečné otvory pro vyfoukání prášku během postprocessingu.

Značný vliv během výroby hraje i orientace dílu při růstu a ovlivňuje tak výsledné mechanické vlastnosti a vzhledovou kvalitu. Nejhorší pevnostní vlastnosti má díl ve směru vrstvení, v ose Z. S touto skutečností se lze setkat u všech typů aditivních technologií, a proto je nutné s touto nevýhodou počítat a při pozicování dílu do stavby zvážit jeho funkčnost a nejvíce namáhané směry orientovat do polohy X a Y. Také lze podpořit pevnost dílu při konstrukci a ve směru plánované výrobní osy Z jej zesílit.

Co se týče vzhledové kvality, tj. povrchu dílu, je žádoucí pomocí orientace získat co nejlepší povrch bez viditelného vrstvení, který neprojevuje efekt schodů. Toho lze dosáhnout při prostorové orientaci dílu pod úhly 0° a 45°, anebo v rozmezí 45° až 90° k základní platformě. V případě kruhových součástí a nerovných ploch je však nulový úhel nemožný a pro pěkný povrch se musí stavět na výšku. Tím se ale sníží kvalita mechanických vlastností dílu. Kompromisem často bývá orientace pod úhlem 45°, ale s tím je spojená zvýšená cena odvíjející se od volumetrické obálky součásti. Proto se orientace každého dílu zvažuje individuálně na základě charakteru a potřeb zakázky.

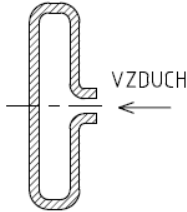
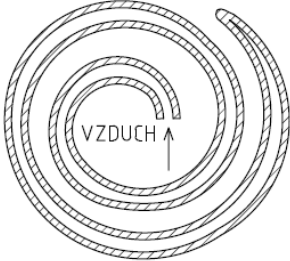
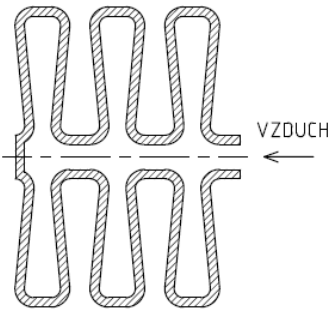
<sup>4</sup> Platí pro případ, že se nejedná o tlustostěnný díl.

## 5.2 Konceptní návrhy

Využitím technologie SLS a měkkého materiálu pro navrhovanou součást lze uplatnit při konstrukci prvky, jež přeměňují tento přípravek na funkční součást. Takovými prvky může být tvarová složitost přípravku, vznik dutých komor, do níž může být přiváděno tlakové médium, které při vhodné tloušťce stěn součást deformuje a koná pohyb. Element pak může působit jako akční člen a jeho deformaci lze využít pro korigovaný pohyb pneumatických mechanismů [16].

Pro tuto práci byly zvoleny 3 možné konceptní návrhy akčního členu: membrána, spirála a vlnovec. Na základě subjektivního posouzení a znalostí problematiky došlo k vzájemnému porovnání (Tab. 5.2) a výběru nejvhodnějšího typu.

Tab. 5.2 Posouzení konceptních návrhů akčního členu

Typ	Výhody	Nevýhody
<b>Membrána</b> 	Lineární pohyb Minimální rozměry	Krátká trajektorie pohybu Přeměna lineárního pohybu na rotační přes rotační vazby
<b>Spirála</b> 	Translační a rotační pohyb	Obtížnější určení přesné polohy koncového bodu Větší rozměrovost
<b>Vlnovec</b> 	Lineární pohyb Delší trajektorie pohybu	Přeměna lineárního pohybu na rotační přes rotační vazby Větší rozměrovost

Jako nejvýhodnější řešení pro realizaci konstrukčního návrhu byla zvolena pneumatická komora s geometrií **vlnovce**.

### 5.3 Konstrukční návrh manipulační jednotky

Hlavními konkrétními požadavky pro nově navrženou jednotku jsou tyto vstupní údaje<sup>5</sup>:

- Zakládání kornoutů zepředu
- Svírání čelistí v průměru 37 mm, úhel kužele 21°
- Manipulační prostor nad a pod čelistí – musí být bez zástavby
- Nosnost jednotky 150 g
- Rychlost sevření a otevření 0,2 s

Pro realizaci manipulační jednotky byla zvolena technologie Selective Laser Sintering a jako výrobní materiál PA2200, jehož materiálové listy jsou součástí přílohy (*Příloha 1*). Hlavním pohonem mechanismu byla vybrána symetrická vlnovcová komora, kterou lze vzduchem elasticky roztahovat, čímž prvek vykonává přímočarý pohyb. Na obou koncích komory jsou přes rotační klouby připojeny prsty tvořící čelist úchopného zařízení (též gripperu). Při roztažení dojde k rozevření horních konců úchopových prstů, které fungují jako dvojzvrtné páky, jejichž body otáčení jsou navzájem přes rotační klouby propojeny tuhým příčným trámek, takže současně dojde k sevření produktu ve spodní části čelisti. Celé zařízení je pak pomocí šroubů M4 připevněno k ramenu manipulátoru.

Toto uspořádání bylo zvoleno proto, aby aktivní člen byl v záběru při sevření, a díky regulaci vstupního tlaku se mohl nastavovat rozdílný úhel sevření a uchopovací síla pro jiné rozměry kornoutů. Dalším aspektem pro toto uspořádání je kompenzace nepřesností před prvním seřizením. Regulací vstupního tlaku lze prsty nastavit do správného sevření.

Pro dosažení požadované pozice prstů čelistí během sevření produktu při daném vstupním tlaku vzduchu je nutné provést základní konstrukční výpočty.

#### 5.3.1 Výpočet

Z výše popsaného principu gripperu bude mít značný vliv na funkčnost celého dílu vlnovcová komora, která jako akční člen vykonává pohyb. úchopové prsty fungují jako dvojzvrtné páky přes pevný rotační kloub. Na základě potřebné délky trajektorie pohybu a uchopovací síly na koncích prstů se bude odvíjet její tvar a velikost. Její konstrukce musí umožnit vyvolat dostatečně velkou tlakovou sílu  $F_v$ , která z části své složky  $F_p$  zajistí pohyb na sevření kornoutu a současně bude působit jako uchopovací síla  $F_u$  kornoutu. Vycházet se tedy bude ze vztahu:

$$F_v = F_p + F_u \quad (1)$$

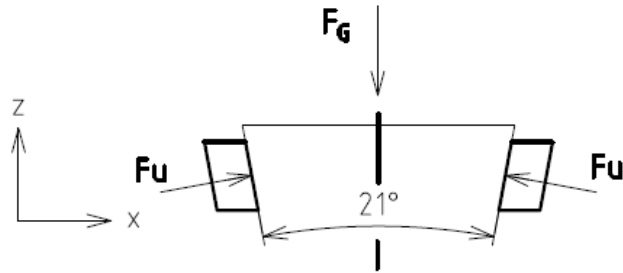
Nejprve se zaměříme na výpočet minimální uchopovací síly, při níž by nemělo dojít k prokluzu kornoutu během sevření. Pro toto určení budeme vycházet z požadované nosnosti 150 g a ze statického součinitele tření pro zvolený polyamid  $f = 0,25$ <sup>6</sup>. Z náčrtu (*Obr. 5.1*) lze sestavit rovnici silové rovnováhy v ose Z a po úpravách získat hodnotu uchopovací síly:

$$\sum F_z = 0: F_t - F_G + F_t = 0 \quad (2)$$

$$2fF_u \sin 10,5^\circ - mg = 0 \quad (3)$$

<sup>5</sup> Vstupní požadavky byly vytvořeny na základě konzultace s panem Pavlem Blahou, vedoucím konstrukce společnosti Vojta Ice Cream Equipment.

<sup>6</sup> Hodnota je zvolená orientačně za základě udávaných hodnot pro nylon na internetu. Pro bezpečnost bude soustava na výsledku naddimenzovaná.



Obr. 5.1 Rovnováha sil na čelistích při sevření

Po dosazení všech veličin získáme požadavek minimální uchopovací síly  $F_u = 16,1 \text{ N}$ .

Druhou položkou výsledné síly je síla  $F_p$ , pohybující pákovým systémem. Z důvodu nedostatků výpočetních znalostí chování této formy prvku, byla pro odvození prodloužení vlnovce vyrobena prototypová vlnovcová komora, na níž došlo k ozkoušení jejich mechanických vlastností, a ty byly použity pro následující výpočet. Cílem bylo především specifikovat tuhost takového členu, aby bylo možné využít vztahu:

$$F_p = kx \quad (4)$$

Prototyp vlnovce byl vyroben s ohledem na požadavky navrhování pro technologii SLS (viz kapitola 5.1) a funkční potřeby gripperu. V případě absence uchopovacích členů je  $F_u = 0$ , a tudíž výsledná tlaková síla vyvolaná vstupním tlakem uvnitř komory je rovna pohyblivé síle  $F_p = F_v$ . Pro ni je pak nutné formulovat obsah plochy, na kterou tlak ve směru pohybu působí:

$$F_v = pS \quad (5)$$

Výsledkem obsahu plochy je rozdíl obsahu kruhů o průměrech vrcholu vlny  $D$  a jejího dna  $d$ , vynásobený o celkový počet ploch vln komory  $n$ , na které působí tlaková síla ve směru pohybu:

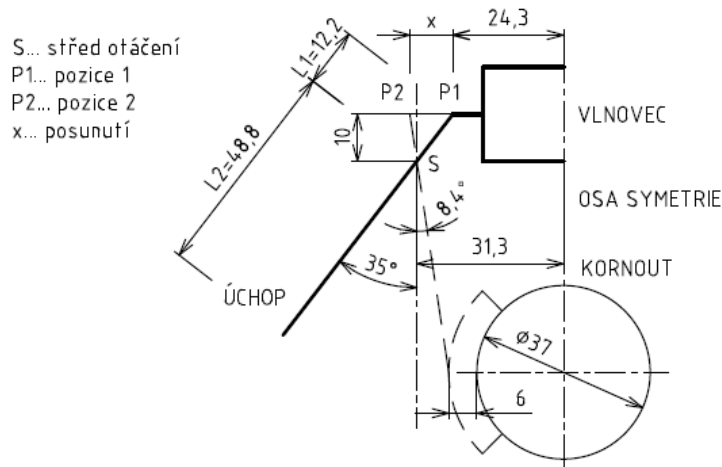
$$S = n \left( \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right) + \frac{\pi d^2}{4} \quad (6)$$

Vstupní hodnoty pro tento výpočet byly následující:  $p = 5 \text{ bar}$ ,  $D = 30 \text{ mm}$ ,  $d = 10 \text{ mm}$ ,  $n = 3$ . Praktickým příkladem bylo s těmito parametry určeno prodloužení jedné symetrické poloviny aktivního členu  $x = 55 \text{ mm}$ , a tomu odpovídá koeficient tuhosti jedné poloviny vlnovce  $k = 17,85 \text{ Nmm}^{-1}$ .

Čelisti gripperu svírají kornout v průměru 37 mm. Tloušťka objímky je 6 mm. Délka úchopových prstů musí být navržena tak, aby byl zajištěn dostatečný prostor pro manipulaci v oblasti před tělem jednotky, tj. vzdálenost od středu rotace po osu uchopení a vzdálenost středu rotace od rotačního kloubu konající přímočarý pohyb co nejmenší. Ze zadání je vyžadováno, aby otevření čelistí bylo dostatečné pro nepřesnosti najetí kornoutu mezi úchopy. Vzdálenost středu rotace od hlavní symetrické osy celého gripperu je 31,3 mm. Přes goniometrické funkce pravoúhlých trojúhelníků lze pak spočítat trajektorii přímočarého pohybu kloubu pro jednu symetrickou stranu jednotky (Obr. 5.2).

Celkové prodloužení pro funkční vlnovec vychází  $x = 8,5 \text{ mm}$ . Využitím hodnoty tuhosti  $k$  v opačném postupu výpočtu získáme pohyblivou sílu  $F_p = 151,7 \text{ N}$ . Přičtením složky uchopovací síly je výsledná síla  $F_v = 167,8 \text{ N}$ . Tuto sílu lze zpětně získat změnou vstupního tlaku, rozměrů vlnovce nebo počtem jeho vln. Pro získání malých rozměrů byly rozměry vlnovce optimalizovány na  $D = 38 \text{ mm}$  a  $n = 2$ , pro něž by měl být postačující vstupní tlak  $p = 0,08 \text{ MPa}$ . Avšak pro eliminaci nepřesností, silových ztrát, utužení soustavy a zajištění

spolehlivosti provozu je doporučeno pracovat se vstupním tlakem  $p = 0,2 \text{ MPa}$ . Další regulace bude doporučena na základě testování produktu.



Obr. 5.2 Rozměry pro výpočet trajektorie  $x$  jedné poloviny aktivního členu

### Kontrola bezpečnosti úchopových prstů při zatížení na ohyb

Při sevření kornoutu působí jeho váha na úchopové prsty, které musí být dostatečně tuhé, aby nedocházelo k jejich deformaci. Jejich průřez tvoří obdélník o stranách  $7 \times 6 \text{ mm}$ . Délka ramene je brána v nejdelším rozsahu, tedy v bodě nulového vychýlení. Tyto malé změny délky zajišťuje elipsovitá díra pro otočný čep ve středu rotace. Požadavek na nosnost je  $150 \text{ g}$ . Dále je stanoveno:

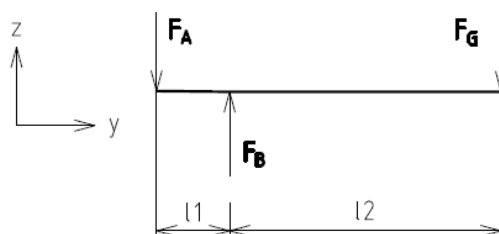
$$\sigma_k = 52 \text{ MPa}$$

$$l_1 = 12,2 \text{ mm}$$

$$l_2 = 48,8 \text{ mm}$$

$$F_G = 1,47 \text{ N}$$

Pro výpočet je uchopovací prst nahrazen prutem. V bodě  $A = P1$  a v bodě  $B = S$  jsou umístěné rotační vazby. Uvolněním získáme v těchto bodech síly  $F_A$  a  $F_B$  (Obr. 5. 3). Síla  $F_G$  působí na konec prutu s požadovanou nosností  $150 \text{ g}$ . Největší ohybové momentové zatížení se bude nacházet v bodě B.



Obr. 5.3 Uvolnění prutu a jeho silové působení

Pro tuto soustavu platí, že

$$\sum F = 0 \quad (7)$$

$$\sum M_{oA} = 0 \quad (8)$$

Vytvořením silových rovnic získáme výsledky pro  $F_A = 5,88 \text{ N}$  a  $F_B = 7,35 \text{ N}$ . Síla  $F_B$  je maximální působící silou T. Pro určení maximálního napětí je potřeba nejdříve určit modul ohybu v průřezu  $W_o$ :

$$W_o = \frac{J_y}{z_{max}} = \frac{bh^2}{6} \quad (9)$$

Neznámá  $b = 6 \text{ mm}$  a  $h = 7 \text{ mm}$  jsou strany průřezu. Výpočtem maximálního ohybového momentu  $M_{oB}$  pak je stanoveno maximální napětí  $\sigma_{max}$ .

$$M_{oB} = F_G l_2 \quad (10)$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{oB}}{W_o} \quad (11)$$

Při ohybovém momentu  $M_{oB} = 71,74 \text{ Nmm}$  vznikne napětí  $\sigma_{max} = 1,46 \text{ MPa}$ . To je poměrově srovnáno s modulem pružnosti ve vztahu:

$$k_k = \frac{\sigma_k}{\sigma_{max}} \quad (12)$$

Koeficient bezpečnost pak vychází vysoký  $k_k = 37$ . Při ohybovém zatížení se také kontroluje smykové napětí v průřezu prutu a které se taktéž porovnává s modulem pružnosti ve vztazích:

$$T_{max} = \frac{3}{2} \frac{T}{S} \quad (13)$$

$$k_t = \frac{\sigma_k}{2T_{max}} \quad (14)$$

Také pro smyk je bezpečnost hodně vysoká  $k_t = 99$ . Pro polymery musí být bezpečnost dimenzovaná větším násobkem, aby se zajistila větší tuhost soustavy. Roli však bude hrát uchopovací síla  $F_u = 16,1 \text{ N}$  při sevření kornoutu, která je na rameni přenášena v rovině XY. Maximální moment od této uchopovací síly bude působit také v místě S a bude roven:

$$M_{oB} = F_u l_2 \quad (15)$$

Při dosazení pak získáme  $M_{oB} = 785,68 \text{ Nmm}$ . Průřezový modul se v tomto otočení rovná  $W_o = 42 \text{ mm}^3$ . Po dosazení do rovnice (11), (12) získáme koeficient bezpečnosti  $k_k = 2,8$  a pro dosazení  $F_u$  za T pro rovnice (13) a (14) koeficient bezpečnosti pro smyk  $k_t = 45,2$ . I pro tuto sílu vychází bezpečnost obstojně.

## 6 REALIZACE NÁVRHU

Realizace návrhu byla provedena u společnosti One3D s.r.o., která ochotně poskytla svoje výrobní prostory a prostředky. Zvolena byla technologie **Selective Laser Sintering**, výrobní materiál **PA 2200** (známý jako PA12) a velikost vrstvy **120 μm**. V následující tabulce (Tab. 6.1) jsou zaznamenány také informace k použitému výrobnímu stroji (Obr. 6.1). Katalogový list k tomuto zařízení je součástí přílohy (Příloha 2).

Tab. 6.1 Informace k výrobnímu stroji

Označení stroje	<b>EOS P 396</b>
Výrobce	<b>EOS GmbH</b>
Sériové číslo	<b>SI 2198</b>
Rok výroby	<b>2015</b>



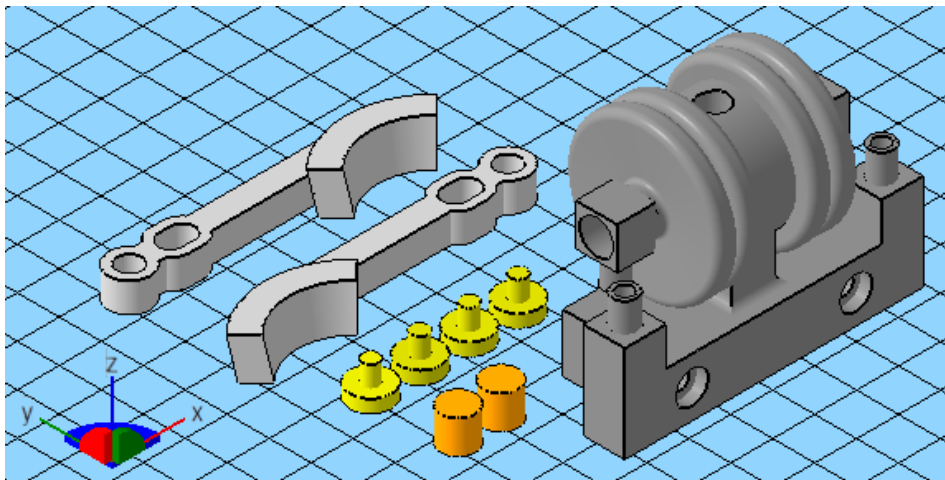
Obr. 6.1 Použitý výrobní stroj EOS P 396

Během této fáze byly na prototypu rozhodnuty konečná provedení jednotlivých konstrukčních prvků s ohledem na výrobní technologii SLS a následnou funkčnost dílu. Zde jsou dílčí body, které bylo nutné na díle rozhodnout:

**Doba aktivace členu** – jak bylo zmíněno dříve, aktivní doba působení tlaku v komoře byla zvolena při sevření čelisti, u níž je důležitá správná poloha. Regulací vstupního tlaku během aktivní doby umožňuje do jisté míry nastavovat uchopovací sílu společně s úhlem sevření pro rozdílné velikosti břemene (nutné však vyřešit tvarovou adaptací objímky – viz kapitola 7). Dále pak lze také tímto uspořádáním vykompenzovat nepřesnosti konstrukce během seřízení před provozním režimem, což je pro tuto práci velkou výhodou.

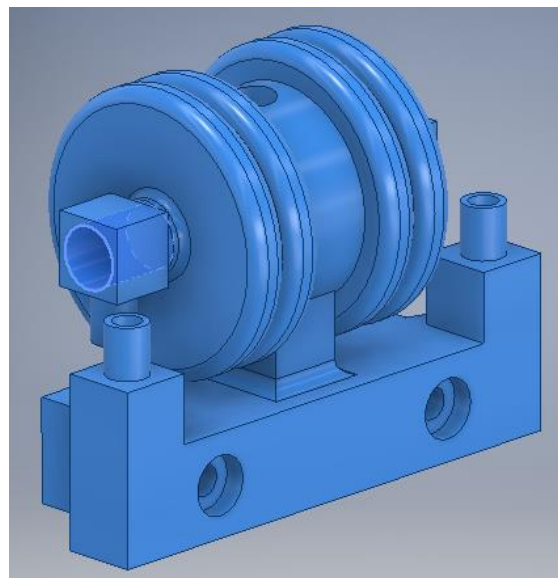
**Počet dílů v sestavě** – technologie SLS umožňuje při správné konstrukci dílu vyrobit tuto manipulační jednotku jako jednokus. Avšak v případě volby tohoto řešení je nutné zajistit dostatečné vůle v navrhovaných rotačních kloubech, aby nedošlo k jejich spečení. Nevýhodou jsou pak nadměrné vůle v těchto vazbách, které musí být rovněž kompenzovány. Z tohoto důvodu byl návrh rozložen na akční člen, 2 úchopové prsty, 4 zajišťující čepy pro 4 rotační vazby a 2 špunty. Jednotlivé položky byly vyrobeny separátně.

**Orientace** – hlavní namáhání akčního členu se děje ve směru osy X. Pro dosažení nejlepších mechanických vlastností byla součást vyráběna v ustavení k rovině XY, aby toto namáhání nepůsobilo ve směru vrstvení. Stejně tak u orientace úchopových prstů se vyvarovalo, aby jejich délka, resp. nejmenší obsah průřezu ležel v ose Z (Obr. 6.2).



Obr. 6.2 Orientace jednotlivých dílů během výroby

**Odstranění prášku z dutin** – kvůli špatné dostupnosti do dutiny vlnovcové komory musí být model opatřen bočními otvory, které slouží pro odstranění prášku (Obr. 6.3). Po vyčištění vnitřní komory od prášku se díry zašpuntují a zalepí.



Obr. 6.3 Boční otvor pro odstranění prášku

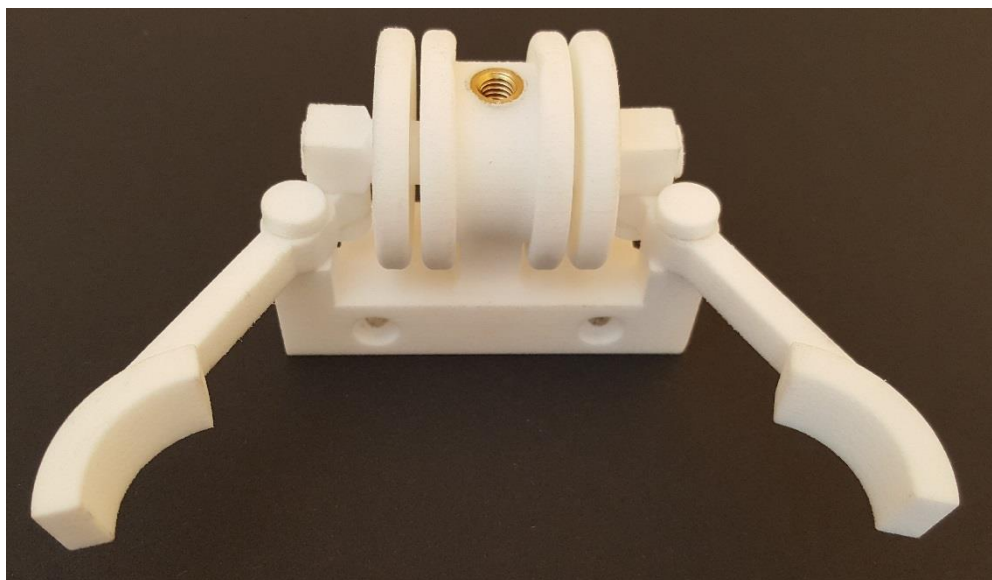


**Připojení vzduchu** – pro lepší těsnění a snadnou montáž byl akční člen opatřen otvorem se závitovou vložkou M6, na kterou lze snadno našroubovat vzduchovou spojku.

**Změna délky ramene  $l_1$**  – při pohybu rotační vazby z bodu P1 do bodu P2 dochází k proměnlivosti délky ramene  $l_1$  (Obr. 5.2). Aby nedocházelo touto změnou k vybočování trajektorie této vazby mimo přímočarý směr osy X, je řešen středový rotační kloub elipsovitou drážkou pro čep, v níž se může dle potřeby pohybovat a tuto změnu rozměru  $l_1$  vyrovnávat.

**Drsnost funkčních ploch rotačních vazeb** – drsnost sintrovaného polymeru bez postprocessingových úprav je přibližně  $R_a = 16 \mu\text{m}$  [24]. To může být kritickým činitelem pro rotační vazby, kde mohou vznikat velké třecí síly, a tím pádem i nežádoucí teplo. Při vyvinutí značného tepla se materiál roztéká a ztrácí svou pevnost, což vede ke zničení součásti. Aby se dosáhlo nižších drsností, byly funkční plochy rotačních spojů zbroušeny.

Na základě všech těchto úprav byla realizována výroba dílu (Obr. 6.4). 3D model a výkresová dokumentace je součástí přílohy (Příloha 3, Příloha 4). V další fázi proběhlo testování, jehož zhodnocení je popsáno v následující kapitole.



*Obr. 6.4 Vyrobený a složený prototyp*

## 7 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

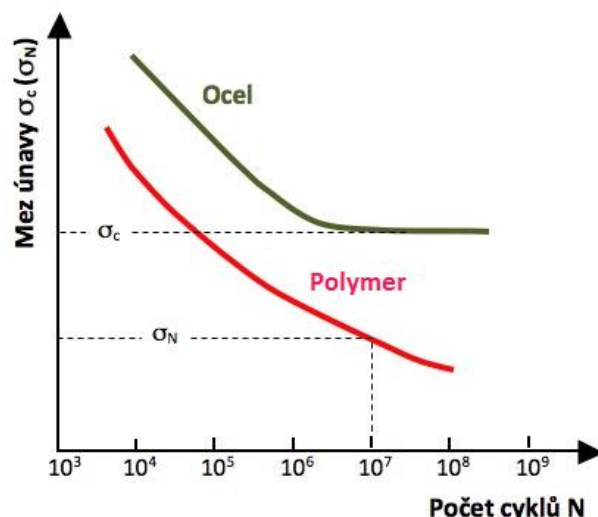
Během testování produktu byly sledovány tyto aspekty:

**Funkčnost dílu** – hlavní úlohou jakékoliv součásti je plnění stanovené funkce, pro kterou byla navržena. V případě této práce se jednalo o uchopovací zařízení, jehož hlavní funkcí je uchopení zmrzlinových kornoutů a to tak, aby během sevření bylo možné s celou manipulační jednotkou pohybovat, otáčet, a přitom produkt nikterak neponičit. V tomto smyslu byl spočítán a určen optimální vstupní tlak, který by zajistil dostatečnou uchopovací sílu, aby soustava byla pevná a tuhá, ale zároveň nepřesáhla hodnotu, při níž by došlo k rozdrčení kornoutu důsledkem působení velké síly. Při testování bylo zjištěno, že při vstupním tlaku 0,2 MPa a méně, projevuje soustava při maximální požadované nosnosti ne zcela tuhé chování, a proto byla hodnota zvětšena na **0,3 MPa**. Při tomto tlaku byl kornout pevně sevřen, aniž by došlo k jeho poničení (viz Příloha 5). Z výsledku testování lze říct, že jednotka je schopná plnit funkci manipulátoru a funkčnost dílu je tedy splněna.

**Tvarová a pevnostní stálost** – po vyrobení součásti je nutné, aby si zachovala svůj tvar a pevnostní vlastnosti při zavedení do provozu a vystavení pracovním silám. Pevnostní stálost bývá značně ovlivněna pracovním prostředím, ve kterém je zařízení uvedeno do chodu. Pro tento případ bylo definováno extrémní prostředí, během něhož se pracuje v mrazivých teplotách okolo  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  a používají se agresivní čisticí prostředky. I za těchto podmínek je důležité, aby si produkt zachoval svoje mechanické vlastnosti.

Pevnostní stálost manipulačního zařízení nebylo možné otestovat v požadovaných extrémních podmínkách, avšak použitím materiálu PA 2200 je teoreticky předpokládáno, že tento požadavek bude splněn<sup>7</sup>.

Při namáhání dílu opakovanými deformacemi, které jsou v čase proměnné, dochází k mechanické únavě materiálu. Při srovnání polymerů s kovy jsou polymery vůči únavě méně odolné a dosahují mnohem nižší životnosti (Obr. 7.1).



Obr. 7.1 Obecná Wöhlerova křivka pro ocel a polymer [25]

<sup>7</sup> Tento předpoklad vychází z interních dokumentů společnosti One3D s.r.o. a poznatků technického ředitele této firmy Ing. Filipa Dokoupila.

Navržená manipulační jednotka v této práci je vystavena opakovatelnému tlakovému namáhání akčního členu. Amplituda má charakter míjivého zatěžovacího cyklu, kdy maximální napětí  $\sigma_{\max}$  se rovná vstupnímu tlaku  $p$  a minimální napětí  $\sigma_{\min}$  je 0. U tohoto průběhu zatížení se projevuje cyklické tečení materiálu, které mění původní tvar součásti a vlnovcová komora se postupně roztahuje, čímž ztrácí původní úhel rozevření uchopovacích prstů. Při navrhování bylo s touto skutečností počítáno, a proto se realizovalo provedení, kdy je akční člen namáhán v době sevření čelisti, takže úhel otevření není tak podstatný, pokud umožňuje bezproblémové zakládání kornoutů a manipulaci s nimi. Tím pádem lze toto deformování do jistého počtu pracovních cyklů tolerovat a uchopovací sílu vyrovnávat regulací vstupního tlaku, a tak cíleně zvýšit životnost produktu. S jistotou lze však předpokládat, že životnost jednotky bude mnohem menší než u původního provedení z kovových součástí a bude se odvíjet od počtu cyklů, pro které bude součást ještě plnit svou funkci. K jejímu stanovení nebyly při testování zajištěny vhodné podmínky a není tudíž v této práci definovaná.

**Konkurenceschopnost** – délka životnosti bude mít podstatný význam ve využitelnosti součásti pro praxi. Pokud existuje předpoklad, že její hodnota počtu cyklů bude řádově nižší, než je tomu u původní součástky, musí nabízet jiné výhody, které tento nedostatek převýší, aby manipulační jednotka byla konkurenceschopná. V následující tabulce (Tab. 7.1) jsou porovnány obecné parametry<sup>8</sup>.

Tab. 7.1 Porovnání obecných parametrů původní a nově navržené součásti

	<b>Původní součást (včetně pneumatického pohonu)</b>	<b>Navržená součást</b>
<b>cena</b>	2000,- Kč	1600,- Kč <sup>9</sup>
<b>rozměr</b>	58,6 x 119,8 x 104,4 mm	118,6 x 69 x 54,3 mm
<b>počet součástí</b>	28 dílů	9 dílů
<b>hmotnost</b>	365 g	52 g
<b>rychlost sevření</b>	0,2 s	≤ 0,2 s

Z tabulky (Tab. 7.1) vychází, že u nového provedení se dosáhlo menší ceny o 20 %. Tato položka závisí od velikosti obálky součásti a množství spotřebovaného materiálu. V tomto směru by se daly podniknout ještě další kroky, které by vedly k redukci ceny např. v oblasti upínacího bloku využitím pevných vnitřních struktur namísto plné výplně. Tím by došlo i k dalšímu odlehčení, kterého se již teď dosáhlo značně méně, pouhých 14,2 % z původní hmotnosti. To má pozitivní vliv na snížení namáhání celého manipulátoru a na velikost potřebného výkonu pro ovládání ramene s tímto zatížením. Rychlost sevření se pohybuje do 0,2 sekund a svoje účely splňuje.

Celý manipulační blok tvoří několik dílů, takže na jeho montáž se spotřebuje kratší čas než u původní součásti. I s touto hodnotou se dá dále pracovat a součást upravit tak, aby se mohla vyrábět jako jeden celek. V případě zajištění dostatečných vůlí mezi rotačními klouby, lze vyrábět akční člen s úchopovými prsty již ve vazbách. Díky jednoduchému sestavení není

<sup>8</sup> Hodnoty pro tuto tabulku byly odměřeny na modelech součástí nebo obdrženy jako informace od společnosti Vojta Ice Cream Equipment, a One3D s.r.o.

<sup>9</sup> Cena odpovídající jedné sadě při poptání 10 sad a uplatnění množstevní slevy. Při výrobě pouze jedné sady je cena 1817,- Kč.

montáž nijak náročná zdatně ani časově. Zástavbový prostor součásti byl také zmenšen, ačkoliv délka manipulačního zařízení vzrostla a pro umístění více jednotek vedle sebe by byla tato změna nepřínosná. Tento bod však nebyl součástí vstupních požadavků od firmy Vojta Ice Cream Equipment, a proto nebyl na rozměry délky brán větší ohled.

Kde lze nalézt ještě jednu výhodu použití manipulačních zařízení zhotovených technologiemi aditivní výroby, je v jejich adaptabilnosti se uchopovanému předmětu. Regulací tlaku lze u navrženého typu jednotky korigovat uchopovací sílu, což předtím nebylo možné a lépe se tak přizpůsobit přenášenému předmětu. K zamyšlení se naskýtá i možnost vyvinutí strukturovaného povrchu na kontaktní ploše objímky, který by byl dostatečně pevný, aby byl schopen udržet předmět, a přitom se dokázal tvarově přizpůsobovat jeho geometrii. Tím by bylo možné pomocí regulace tlaku uchopovat předměty různých průměrů a uhlů zkosení, aniž by bylo nutné jednotku vyměňovat. Pro výrobní linku by se stala univerzálním řešením.

## 7.1 Analýza možných rizik

Jako součást zhodnocení manipulační jednotky a její doporučení pro praxi je přínosné provést analýzu možných rizik při zavedení součástí do výrobní linky v průmyslovém prostředí. Z hlediska instalace a připojení vzduchu k jednotce by neměl vzniknout žádný problém. Jistá rizika by mohla nastat během pracovního procesu, a proto je dobré předvídat tyto krizové situace a navrhnout možná řešení, jak jim zabránit.

Jako možné riziko lze považovat kratší životnost součásti a s ní spojené plastické deformace. Kromě mechanické únavy akčního členu může dojít i k opotřebení rotačních čepů ve vazbách, ať už cyklickým zatížením nebo vznikem tepla mezi třecími plochami. Řešením by mohlo být nahrazení rotačních čepů, na nichž jsou nasazeny úchopové prsty, jiným materiálem, který by vytvářel nízký koeficient tření a byl odolnější vůči opotřebení. Další možností je tyto vazby z modelu odstranit a jednotku transformovat na pevné spojení akčního členu s čelistí, kde by tento problém u jednodukusového dílu nevznikal.

Nebezpečí zničení manipulačního zařízení a plastická deformace materiálu také hrozí od vysokého vstupního tlaku. Proto je nutné do pneumatického obvodu implementovat regulační ventil, kterým lze nastavovat výsledný tlak. Při testování bylo v obvodu dosaženo maximálně 0,7 MPa. Při této velikosti nebyly zřetelné známky poškození manipulační jednotky. Lze tedy soudit, že kritická hodnota pro vstupní tlak bude vyšší.

S regulací tlaku je spojená i kompenzace vůlí. Je-li předpokládáno, že během zatěžování materiálu bude docházet k jeho cyklickému tečení, je možné tuto deformaci do jisté míry také kompenzovat. Otázkou ovšem je, jak často bude nutné kontrolovat a nastavovat tlak, aby jednotka správně fungovala a bude-li tento zákrok zasahovat do chodu výrobní linky.

## 8 ZÁVĚR

Tato diplomová práce představuje návrh konstrukční optimalizace výrobní linky prostřednictvím technologie SLS. Její součástí bylo také splnění dílčích bodů pojící se s tímto tématem. V první části práce byla provedena rešerše na téma aditivní výroba a její technologie, popsání výhod a nevýhod aplikací těchto metod a uvedení oblastí, ve kterých může být aditivní výroba prospěšná a revoluční. Praktickými příklady bylo jejich využití prezentováno v různých odvětvích průmyslu. K bližšímu seznámení došlo také s technologií Selective Laser Sintering, která je v této práci využita pro realizaci návrhu.

V další části práce je specifikován rozsah konstrukční optimalizace na výrobní lince. U takové soustavy jednotlivých prvků a pracovišť, jako je výrobní linka, nelze z principu aplikovat aditivní technologie všude, a tudíž se jejich nasazení děje po částech v různých místech linky. Optimalizace v této práci proběhla na úrovni manipulační jednotky, sloužící pro přenos zmrzlinových kornoutů z dopravníku na pás druhého pracoviště linky. U tohoto zařízení byla provedena analýza současného konstrukčního stavu a s ní spojené problematiky, na základě čehož byly specifikované vstupní požadavky pro nové řešení této manipulační jednotky.

Hlavní myšlenkou práce bylo vytvořit konstrukční návrh, který by byl realizován metodou Selective Laser Sintering, a na němž by bylo možné využít benefity vyplývající z použití zmiňované technologie. Jako použitý materiál byl vybrán polyamid PA 2200, jenž je certifikován jako nezávadný materiál pro použití při kontaktu s potravinami, a tudíž vhodný do potravinářského průmyslu. Kombinací mechanických vlastností polymerového materiálu a relativní svobody v designu dílu, kterou tato technologie přináší, bylo možné navrhnout součást, jež se chová jako funkční díl a v tomto případě funguje jako akční člen, poháněný vzduchem a vykonávající pohyb, který vede k uchopování produktů linky.

V tomto duchu byly vytvořeny tři různé koncepční návrhy akčních členů, z nichž byla zvolena varianta nejlépe splňující technické požadavky. Navržená manipulační jednotka využívá jako pohon mechanismu symetrickou vlnovcovou komoru, do jejíž dutiny je připojen ve středu komory přívod tlakového média. Vyvoláním tlaku uvnitř dutiny lze jednotlivé vlny komory roztahovat, čímž konce prvku vykonávají přímočarý pohyb. Na těchto koncích jsou připojeny přes rotační klouby úchopné prsty, které pracují jako dvojjzratné páky. Jejich středy otáčení jsou pevně spojeny s upínací tuhou částí jednotky a podpírají prsty zespodu. Na volném konci prstů je vytvarovaná objímka fungující jako čelist úchopného zařízení. Při přivedení vzduchu do vlnovcové komory dojde k posunutí rotačních vazeb komory a úchopných prstů ve směru pohybu pohonu, čímž je čelist na druhém konci prstů sevřena. Regulace tlaku umožňuje nastavovat uchopovací sílu čelistí. Pro zvolené manipulační zařízení byla zhotovena konstrukční dokumentace včetně návrhových výpočtů. Jednotlivé soubory 3D modelu součásti a veškerá výkresová dokumentace jsou uloženy v přílohách této práce.

Ve fázi realizace byla dořešena finální provedení jednotlivých detailů a nově navržená manipulační jednotka vyrobena. Zvolenou výrobní technologií byla metoda SLS. Po zkompletování zařízení následovalo testování a zhodnocení, kdy hodnotícími kritérii pro realizovaný model byly především funkčnost, tvarová a pevnostní stálost a konkurenceschopnost. Součástí práce je i analýza možných rizik při zavedení jednotky do praxe.

Z hlediska funkčnosti bylo uskutečněno testování modelu, při němž manipulační jednotka uspěla a toto kritérium v požadovaném rozsahu splnila. Na základě vlastností použitého materiálu lze předpokládat, že součást splní i podmínku pevnostní stálosti při zavedení jednotky do požadovaných pracovních podmínek. Tyto podmínky nebylo možné vytvořit a proto tato hypotéza není doposud ověřena.

Co lze také předpokládat je nežádoucí tvarová nestálost díky mechanické únavě a cyklickému tečení materiálu vlivem působení sil. Tento jev bude mít důsledek na celkovou životnost dílu, a nepravděpodobněji nebude dosahovat hodnot původního zařízení, které se pohybovalo v počtu 10 mil. cyklů. U tohoto kritéria se očekává, že nebude splněno. Přesto zde zůstává potenciál konkurenceschopnosti, kterou manipulační jednotka má díky redukci ceny, váhy, rychlosti, jednoduchosti montáže a možnosti adaptabilnosti se uchopovanému předmětu. Proto doporučuji otestovat zařízení na životnost, aby se dalo určit, jak nedostatečná a výrazná tato vlastnost je, aby se mohla zhodnotit společně s kladnými výsledky práce a stanovit efektivita tohoto řešení.

Navrženou manipulační jednotku lze doporučit do praxe jako plně funkční díl. Přesto doporučuji otestovat součást na její pevnostní stálost v provozních podmínkách a na celkovou životnost, a na základě toho navázat v jejím dalším rozvoji, který by směřoval k odstranění zjištěných nedostatků a k většímu čerpání benefitů z technologie SLS, jako je například tvorba struktur a konstrukce adaptivní čelisti. Ráda bych, aby tato práce sloužila také jako ukazatel jednoho z možných směrů konstrukce a inspirovala svou tematikou k dalšímu rozvoji aplikací produktů aditivních technologií v praxi.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BOURELL, David, Jean Pierre KRUTH, Ming LEU, Gideon LEVY, David ROSEN, Allison M. BEESE a Adam CLARE. Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2017, č. 66, s. 659-681. ISSN 17260604.
- [2] ASTM F2792-10. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. 2010. West Conshohocken, PA.
- [3] ATTARAN, Mohsen. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*. 2017, č. 60, s. 677-688. ISSN 00076813.
- [4] KLOCKE, Fritz, Kristian ARNTZ, Mahesh TELI, Kai WINANDS, Maximilian WEGENER a Stella OLIARI. State-of-the-art Laser Additive Manufacturing for Hot-work Tool Steels. *Procedia CIRP*. 2017, č. 63, s. 58-63. ISSN 22128271.
- [5] AKANDE, S. O., K. W. DALGARNO, J. MUNGUIA a J. PALLARI. Assessment of tests for use in process and quality control systems for selective laser sintering of polyamide powders. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016, č. 229, s. 549-561. ISSN 09240136.
- [6] ISO 17296-2:2015. *Additive Manufacturing - General Principles - Part 2: Overview of Process Categories and Feedstock*. 2015.
- [7] *3D Hubs* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com>
- [8] LAUNHARDT, M., A. WÖRZ, A. LODERER, T. LAUMER, D. DRUMMER, T. HAUSOTTE a M. SCHMIDT. Detecting surface roughness on SLS parts with various measuring techniques. *Polymer Testing*. 2016, č. 53, s. 217-226. ISSN 01429418.
- [9] GOEHRKE, Sarah Anderson. Wohlers Report 2017: The Real Authority on 3D Printing. *3DPrint.com* [online]. 2017. Dostupné z: <https://3dprint.com>
- [10] BOURELL, David L., Trevor J. WATT, David K. LEIGH a Ben FULCHER. Performance limitations in polymer laser sintering. *Physics Procedia*. 2014, č. 56, s. 147-156. ISSN 18753892.
- [11] SAUER, A. *Optimierung der Bauteileigenschaften beim selektiven Lasersintern von Thermoplasten*. 2005.
- [12] EYERS, Daniel R. a Andrew T. POTTER. Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective. *Computers in Industry*. 2017, č. 92-93, s. 208-218. ISSN 0166-3615.
- [13] HÜLK, Alexander. 3D-printing of ankle / foot orthosis. *EOS GmbH* [online]. Dostupné z: <https://www.eos.info>
- [14] RENNTEAM UNI STUTTGART. Formula Student Germany - EOS supports racing team by producing a topology- optimized steering stub axle. *EOS GmbH* [online]. Dostupné z: <https://www.eos.info>
- [15] KREITZ, Katharina. Vectoflow - additive manufacturing of probes for measuring speed and temperature in turbo engines. *EOS GmbH* [online]. Dostupné z: <https://www.eos.info>
- [16] BLANES, Carlos, Martín MELLADO a Pablo BELTRAN. Novel Additive Manufacturing Pneumatic Actuators and Mechanisms for Food Handling Grippers. *Actuators*. 2014, č. 3, s. 205-225. ISSN 2076-0825.

- 
- [17] *ARCTIC EX* [online]. 2018. Dostupné z: <http://www.vojta-equipment.com>
- [18] *EOS Technology Enables Automation Specialist Festo to Design its Bionic Assistance System* [online]. Dostupné z: <https://www.eos.info>
- [19] Bionic Handling Assistant. *Festo Corporate* [online]. Dostupné z: <https://www.festo.com>
- [20] Lightweight Grip System with EOS Additive Manufacturing Technology. *EOS GmbH* [online]. Dostupné z: <https://www.eos.info>
- [21] Electro Optical Systems. *EOS GmbH* [online]. Dostupné z: <https://www.eos.info>
- [22] How to design parts for SLS 3D Printing. *3D Hubs* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com>
- [23] 3D HUBS. *Dimensional accuracy of 3D printed parts* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com>
- [24] GUO, Jiang, Jiaming BAI, Kui LIU a Jun WEI. Surface quality improvement of selective laser sintered polyamide 12 by precision grinding and magnetic field-assisted finishing. *Materials and Design*. 2018, č. 138, s. 39-45. ISSN 18734197.
- [25] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 2016. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: [www.publi.cz](http://www.publi.cz)



# 10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

## 10.1 Seznam zkratek

Zkratka	Jednotka	Popis
AM	[-]	Additive manufacturing (aditivní výroba)
ISO	[-]	International Organization for Standardization
ASTM	[-]	American Society for Testing and Materials
CAD	[-]	Computer Aided Design
BJ	[-]	Binder Jetting
LENS	[-]	Laser Engineering Net Shape
EBAM	[-]	Electron Beam Additive Manufacturing
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
MJ	[-]	Material Jetting
NPJ	[-]	NanoParticle Jetting
DOD	[-]	Drop on Demand
MJF	[-]	Multi Jet Fusion
SLS	[-]	Selective Laser Sintering
DMLS	[-]	Direct Metal Laser Sintering
SLM	[-]	Selective Laser Melting
EBM	[-]	Electron Beam Melting
LOM	[-]	Laminated Object Manufacturing
SLA	[-]	Stereolitografie
DLP	[-]	Digital Light Processing
CDLP	[-]	Continuous Digital Light Processing
PEK	[-]	Polyetherketon
PS	[-]	Polystyren
gripper	[-]	Uchopovací jednotka

## 10.2 Seznam symbolů

Symbol	Veličina	Jednotka
F	Síla	[N]
F <sub>v</sub>	Výsledná tlaková síla	[N]
F <sub>p</sub>	Pohybová síla	[N]
F <sub>u</sub>	Uchopovací síla	[N]
f	Statický součinitel tření	[-]
F <sub>G</sub>	Tíhová síla	[N]
m	hmotnost	[kg]
g	Tíhové zrychlení	[ms <sup>-2</sup> ]
F <sub>t</sub>	Třecí síla	[N]
k	Koeficient tuhosti	[Nmm <sup>-1</sup> ]
x	Prodloužení	[mm]
p	Vstupní tlak	[Pa]
S	Obsah plochy	[mm <sup>2</sup> ]
D	Průměr vrcholu vlny	[mm <sup>2</sup> ]
d	Průměr dna vlny	[mm <sup>2</sup> ]
n	Počet ploch vln, na které působí tlaková síla ve směru pohybu	[-]
σ <sub>k</sub>	Modul pružnosti	[MPa]
l <sub>1</sub>	Délka ramene mezi rotačními klouby	[mm]
l <sub>2</sub>	Délka ramene mezi středem otáčení a bodem uchopení	[mm]
M <sub>o</sub>	Ohybový moment	[Nmm]
W <sub>o</sub>	Modul ohybu v průřezu	[mm <sup>3</sup> ]
J <sub>y</sub>	Kvadratický moment k ose Y	[mm <sup>4</sup> ]
z <sub>max</sub>	Vzdálenost krajního vlákna od osy těžiště	[mm]
k <sub>k</sub>	Součinitel bezpečnosti	[-]
T	Smykové napětí	[N]
k <sub>t</sub>	Součinitel bezpečnosti pro smyk	[-]
N	Počet cyklů	[-]
σ <sub>c</sub>	Mez únavy	[-]
σ <sub>N</sub>	Časová mez únavy	[-]

### 10.3 Seznam tabulek

Tab. 3.1 Kategorie aditivní výroby dle normy ISO/ASTM 52900:2015 .....	20
Tab. 4.1 Údaje manipulační jednotky výrobní linky a kornoutů .....	28
Tab. 5.1 Požadavky technologie SLS na vyrobitelnost dílu .....	32
Tab. 5.2 Posouzení koncepčních návrhů akčního členu .....	34
Tab. 6.1 Informace k výrobnímu stroji .....	39
Tab. 7.1 Porovnání obecných parametrů původní a nově navržené součásti.....	43

### 10.4 Seznam obrázků

Obr. 3.1 Světový výnos z AM pro dané roky .....	19
Obr. 3.2 Materiálové zaměření firem pro rok 2017 .....	21
Obr. 3.3 Ilustrace stavěcího procesu technologie SLS.....	21
Obr. 3.4 Kotníková / chodidlová ortéza společnosti plus medica OT .....	24
Obr. 3.5 Topologicky optimalizovaný vodící kloub čepu nápravy.....	25
Obr. 3.6 Krielova sonda pro měření tlaku v motoru vyrobená technologií DMLS .....	26
Obr. 4.1 Automatická výrobní linka ARCTIC EX .....	27
Obr. 4.2 Uchopovací blok pro kornouty .....	28
Obr. 4.3 Schéma pohybu manipulační jednotky v 1 cyklu .....	29
Obr. 4.4 Adaptivní čelist manipulátoru FESTO.....	30
Obr. 4.5 Výstupní uchopovací hlavice s membránami a pohyblivými čelistmi .....	31
Obr. 5.1 Rovnováha sil na čelistích při sevření .....	36
Obr. 5.2 Rozměry pro výpočet trajektorie x jedné poloviny aktivního členu.....	37
Obr. 5.3 Uvolnění prutu a jeho silové působení.....	37
Obr. 6.1 Použitý výrobní stroj EOS P 396.....	39
Obr. 6.2 Orientace jednotlivých dílů během výroby.....	40
Obr. 6.3 Boční otvor pro odstranění prášku.....	40
Obr. 6.4 Vyrobený a složený prototyp .....	41
Obr. 7.1 Obecná Wöhlerova křivka pro ocel a polymer .....	42



## 11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Materiálový list polymeru PA2200

Příloha 2: Katalogový list stroje EOS P 396

Příloha 3: 3D model

Příloha 4: Výkresová dokumentace

Příloha 5: Video – Testování funkčnosti uchopovací jednotky