

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



**NÁVRH A VÝROBA PŘÍPRAVKU PRO  
DOKONČOVÁNÍ LOPATKOVÉHO KOLA**

DESIGN AND MANUFACTURING OF CLAMPING FIXTURE FOR BLADED  
DISK

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**AUTOR:**

Bc. Filip Prečan

**VEDOUČÍ PRÁCE:**

Ing. Zdeněk Pitrmuc

**STUDIJNÍ PROGRAM:**

STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

**STUDIJNÍ OBOR:**

VÝROBNÍ A MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

PRAHA, 2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení:	Prečan	Jméno: Filip	Osobní číslo: 456782
Fakulta/ústav:	Fakulta strojní		
Zadávatel katedra/ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie		
Studijní program:	Strojní inženýrství		
Studijní obor:	Výrobní a materiálové inženýrství		

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh a výroba přípravku pro dokončování kola lopatkového kola**

Název diplomové práce anglicky:

**Design and manufacturing of clamping fixture for bladed disk**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Literární rešerše a identifikace vhodných výrobních technologií pro výrobu prototypových přípravků.
- 2) Technologie SPM leštění a identifikace klíčových parametrů procesu.
- 3) Rozbor geometrie dílu.
- 4) CAD návrh přípravku.
- 5) Prototypová výroba přípravku.
- 6) Ověření funkce.

Seznam doporučené literatury:

- 1) RONG, Yiming a Yaoxiang ZHU. Computer-aided fixture design. New York: Marcel Dekker, 1999. ISBN 9780824799618.
- 2) S PACHBHAI, Shailesh a Raut LAUKIK. A Review on Design of Fixtures. International Journal of Engineering Research and General Science [online]. 2014. (2)
- 3) CHVÁLA, Břetislav a Josef VOTAVA. Přípravky. Praha: SNTL, 1988.
- 4) ZEMČÍK, Oskar. Nástroje a přípravky pro obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2336-6.
- 5) OVERBY, Alan. CNC machining handbook: building, programming, and implementation. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-162301-8.
- 6) Výrobní dokumentace stroje SPM LPG1/LPG EVO

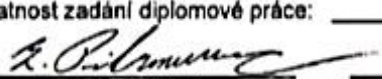
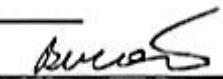
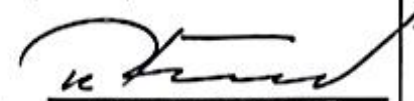
Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Zdeněk Pítrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

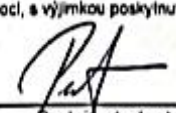
Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

 Ing. Zdeněk Pítrmuc podpis vedoucí(ho) práce	 Ing. Libor Beránek, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	 prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)
--	---	---

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

23.6.2020 Datum převzetí zadání

 Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci **NÁVRH A VÝROBA PŘÍPRAVKU PRO DOKONČOVÁNÍ LOPATKOVÉHO KOLA** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne: .....

.....  
Bc. Filip Prečan

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Zdeňku Pitrmucovi za jeho věnovaný čas, věcné poznámky a rady, komplexní vedení při vypracovávání této práce a příjemnou spolupráci.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se věnuje návrhu, výrobě i testování upínacího a krycího přípravku pro dokončování lopatkového kola z kompresorové části leteckého motoru. První část práce se zabývá prototypovou výrobou, používanými technologiemi v prototypové výrobě a základními pravidly pro návrh součástí pro tyto technologie. Druhá část práce obsahuje samotný průběh navrhování přípravku, jeho následnou výrobu a testování.

### **Klíčová slova**

Přípravek, leštění, dokončování, lopatkové kolo, návrh, výroba, blisk, prototyping, aditivní technologie

## **Annotation**

This diploma thesis deals with the design, manufacturing and testing of a clamping and covering fixture for finishing a blisk from the compressor part of an aircraft engine. The first part of the work deals with prototype manufacturing, technologies used in prototype manufacturing and basic rules for the design of components for these technologies. The second part of the work contains the process of design, manufacturing and testing of fixture.

### **Key words**

Fixture, polishing, finishing, bladed disk, design, manufacturing, blisk, prototyping, additive technologies



## Obsah

Úvod .....	8
1. Výrobní technologie pro výrobu prototypových přípravků .....	9
1.1. Rapid prototyping .....	9
1.2. Aditivní výroba .....	9
1.2.1. Proces aditivní výroby .....	11
1.2.2. Technologie v aditivní výrobě .....	14
1.3. Rozdíly mezi aditivní výrobou a CNC obráběním .....	16
1.4. Základní pravidla pro tvorbu modelů.....	18
1.5. Běžné chyby u technologie FDM.....	21
2. Navrhování přípravků s využitím PC.....	23
2.1. CAD systémy.....	23
3. Technologie pro leštění lopatkových kol .....	25
3.1. Leštění lopatkových kol.....	25
3.1.1. Leštění lopatek pomocí brusných pásů.....	26
3.1.2. Vibrační leštění lopatek.....	27
3.2. Leštící stroj SPM LGP 1 .....	28
4. Zadaná součást pro výrobu přípravku.....	29
4.1. Analýza součásti pro výrobu přípravku .....	29
4.2. Návrh materiálu pro výrobu přípravku .....	30
4.2.1. Krycí část lopatek .....	30
4.2.2. Válcové kryty .....	31
5. CAD návrh přípravku .....	33
5.1. Návrh první.....	33



5.2.	Návrh druhý .....	35
5.3.	Návrh třetí .....	36
5.4.	Návrh čtvrtý.....	38
5.5.	Pátý návrh – finální .....	41
6.	Výroba přípravku.....	43
6.1.	Výroba válcových krytů .....	45
6.1.1.	Výroba spodního válcového krytu.....	46
6.1.2.	Výroba horního válcového krytu.....	49
6.2.	Výroba upínací desky .....	52
6.3.	Výroba krycích segmentů.....	54
6.4.	Montáž přípravku.....	56
7.	Ověření funkce .....	59
7.1.	Proces leštění .....	59
7.2.	Měření drsnosti.....	61
8.	Závěr.....	65
9.	Použité zdroje.....	67
10.	Seznam obrázků .....	71
11.	Seznam tabulek .....	74
12.	Seznam příloh.....	75



## Úvod

Letecké motory se skládají z turbínové a kompresorové části. Tyto části jsou tvořeny jednotlivými stupni, které představují buďto stacionární lopatky nebo rotory s lopatkami – lopatková kola. Účinnost těchto kol je dána nejen jejich geometrií, ale i dodržáním rozměrů a povrchových parametrů při jejich výrobě a zpracování. Lopatky u těchto kol jsou tvořeny kořenem a špičkou. Mezi těmito částmi lopatky se nachází profil lopatky. Účinnost profilu lopatky se pak zvyšuje se sníženou drsností povrchu díky snížení energetické ztráty při tření vzduchu s povrchem lopatky. Proto se tyto lopatky leští. Díky tvarové složitosti dílů ale bývá velmi těžké se dostat k těmto profilům lopatek. Proto se využívá například vibračního leštění, kdy kovové částice spolu s leštícím médiem pomocí vibrační proudí přes lopatky a leští je tak.

Pro snížení nákladů na dokončování prototypových a testovacích dílů mohou sloužit upínací a krycí přípravky, které mají funkci upnutí součásti ve stroji a zároveň chrání určité části kola před leštícím procesem. Slouží tak i pro vývoj nastavení leštících parametrů, kdy se leští pouze požadovaná část lopatkového kola.

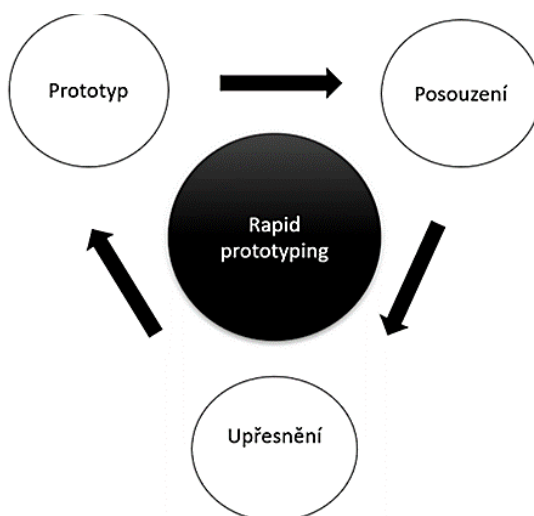
Hlavními cíli této práce je navrhnout takovýto upínací a krycí přípravek pro zadanou součást. Následně pak navrhnout přípravek vyrobit a ověřit správnost návrhu a výrobu dílů zkompletováním přípravku spolu se zadanou součástí do jednoho celku. Posledním cílem je otestování funkčnosti přípravku ve stroji SPM LGP 1. Návrh musí brát v potaz možnosti leštícího stroje, výrobní profil Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie a pokud je možné, i dostupné polotovary.



# 1. Výrobní technologie pro výrobu prototypových přípravků

## 1.1. Rapid prototyping

Pod pojmem rapid prototyping si lze představit technologii 3D tisku, ale také i pojem aditivní technologie. Termín rapid prototyping se používá v průmyslu jako popis vytvoření a reprezentace součásti nebo dílu před konečným vydáním nebo komercializací. Je zde kladen důraz na rychlé vytvoření součásti (prototypu), ze které budou odvozeny další modely a případně konečný produkt. Inženýři používají termín rapid prototyping k popisu procesu vývoje a řešení po částech, který umožňuje případným klientům a dalším zúčastněným stranám testovat vzniklé nápady a poskytovat zpětnou vazbu během celého vývojového procesu. Základní princip rapid prototypingu je na obrázku 1. V kontextu vývoje produktu byl termín rapid prototyping široce používán k popisu technologií, které vytvářely fyzickou podobu prototypu přímo z digitálních dat. [1]



Obrázek 1 - Základní schéma rapid prototypingu

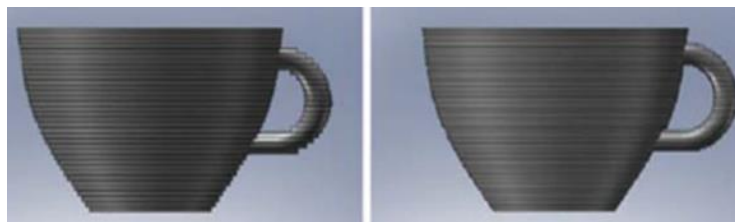
## 1.2. Aditivní výroba

Aditivní výroba je termín pro to, co se dříve nazývalo rapid prototyping a co se dnes obecně nazývá 3D tisk. Z prvopočátku byly tyto technologie vyvinuty právě pro výrobu prototypů. Dnes se ale používají pro mnoho dalších účelů a mají uplatnění v celém průmyslu. Zejména zlepšení kvality výstupů z těchto zařízení znamenalo, že často existovala mnohem užší vazba mezi prototypem a finálním produktem. Mnoho finálních dílů je dnes proto ve skutečnosti přímo vyráběno v těchto zařízeních. Není možné je tedy označit jako prototypy. Termín rapid

prototyping také přehlíží základní princip těchto technologií v tom, že všechny vyráběné součásti jsou vyrobené pomocí aditivního přístupu. Nedávno vytvořená technická komise v rámci ASTM souhlasila, že by měla být přijata nová terminologie – aditivní technologie. [1]

Základním principem technologií aditivní výroby je, že se model, původně vytvořený pomocí trojrozměrného počítačově podporovaného návrhu – 3D CAD model, může vyrobit přímo bez většího plánování výrobního procesu. Ačkoli to ve skutečnosti není tak jednoduché, jak by se na první pohled mohlo zdát, rozhodně aditivní technologie výrazně zjednodušují proces výroby složitých 3D objektů přímo z CAD dat. Ostatní výrobní technologie, jako například obrábění, slévání nebo tváření, vyžadují pečlivou a podrobnou analýzu geometrie součásti. Tato analýza slouží k určení věcí, jako je například pořadí výrobních operací. Výrobní operace u těchto technologií musí mít takové pořadí, aby šly vyrobit různé funkční části součásti. Dále se musí určit použité nástroje, doprovodné procesy a mohou být vyžadovány i dodatečné přípravky, bez kterých by dokončení součásti nebylo proveditelné. Oproti tomu aditivní technologie potřebují pouze některé základní detaily součásti, pochopení fungování zařízení a materiály, které jsou potřeba pro sestavení součásti. [1]

Aditivní technologie fungují tak, že součásti jsou vyráběné přidáváním materiálu do jednotlivých vrstev. To umožňuje trojrozměrnou výrobu a minimální odpad během této výroby. Každá vrstva je tenký průřez součásti, který je odvozený od původních CAD dat. Každá vrstva má svoji konečnou tloušťku. Výsledná část bude tedy aproximací původních CAD dat. Na obrázku 2 je znázorněná tato aproximace dat. Čím tenčí je každá vrstva, tím přesnější bude konečný výrobek k originálnímu CAD modelu. [1]



Obrázek 2 - Závislost tloušťky vrstvy na konečném produktu – CAD model [1]

Všechny komerčně využívané zařízení pro aditivní výrobu používají přístup založený na vrstvách. Hlavní odlišnosti mezi nimi jsou v použitých materiálech, které jsou schopny zpracovávat, jak jsou jednotlivé vrstvy výrobku tvořeny a jak jsou tyto vrstvy mezi sebou navzájem spojeny. Všechny tyto rozdíly určují faktory, jako je přesnost finální součásti, její mechanické vlastnosti a materiálové vlastnosti. Určují také čas výroby součásti, potřebu následného zpracování, velikost celého zařízení a celkové náklady, jak na zařízení, tak celý výrobní proces. [1]

### 1.2.1. Proces aditivní výroby

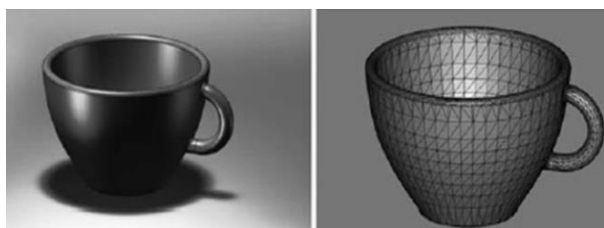
Celý proces zahrnuje několik kroků, které vytvoří z digitálního CAD modelu součásti výsledný fyzický výrobek. Různé výrobky budou zahrnovat aditivní výrobu různým způsobem a v různé míře. Součásti malých rozměrů a relativně jednoduchých tvarů mohou využívat aditivní technologie pouze pro vizualizační modely. Zatímco větší a složitější součásti s větším inženýrským obsahem mohou zahrnovat aditivní technologii během četných fází a iterací v průběhu vývojového procesu. Aditivní výroba zahrnuje do určité míry alespoň tyto následující kroky, které jsou zobrazeny i na obrázku 4. [1]

#### ■ CAD model

Všechny součásti začínají modelem v digitální podobě, který popisuje jejich geometrii. To může zahrnovat použití téměř jakéhokoli profesionálního softwaru CAD pro modelování těles. Výstupem však musí být vždy 3D zobrazení tělesa nebo povrchu. K vytvoření této reprezentace lze také použít zařízení umožňující reverzní inženýrství, např. laserové nebo optické skenování. [1]

#### ■ Převod na STL nebo STEP

Téměř každý stroj pro aditivní výrobu akceptuje soubory ve formátu STL nebo STEP. Jedná se o univerzální formáty souborů 3D objektů. V dnešní době CAD softwary dokážou modely v těchto formátech exportovat. Tyto formáty souborů popisují uzavřené vnější plochy původního modelu CAD a tvoří tak základ pro výpočet jednotlivých vrstev. Převod modelu do formátu STL je znázorněn na obrázku 3. [1]



Obrázek 3 - Převod CAD modelu do STL [1]

#### ■ Přenos dat do stroje a manipulace

Soubor ve formátu STL nebo STEP musí být přenesen do stroje. Zde může existovat potřebná úprava a manipulace se souborem tak, aby seděla správná velikost, poloha a orientace pro sestavení dílu. [1]



#### ■ **Nastavení stroje**

Před spuštěním procesu výroby musí být stroj správně nastaven. Nastavení se vztahuje k parametrům sestavení, materiálovým omezením, zdroji energie, tloušťky vrstvy, načasování atd. [1]

#### ■ **Sestavení součásti**

Sestavení součásti je automatizovaný proces a stroj může tak pracovat do značné míry bez dozoru pracovníka. Během výroby je ale třeba provést kontrolu stroje, aby se zajistilo, že nedochází k chybám, jako je nedostatek stavebního materiálu, výpadky napájení stroje, chyba softwaru atd. [1]

#### ■ **Odstranění součásti**

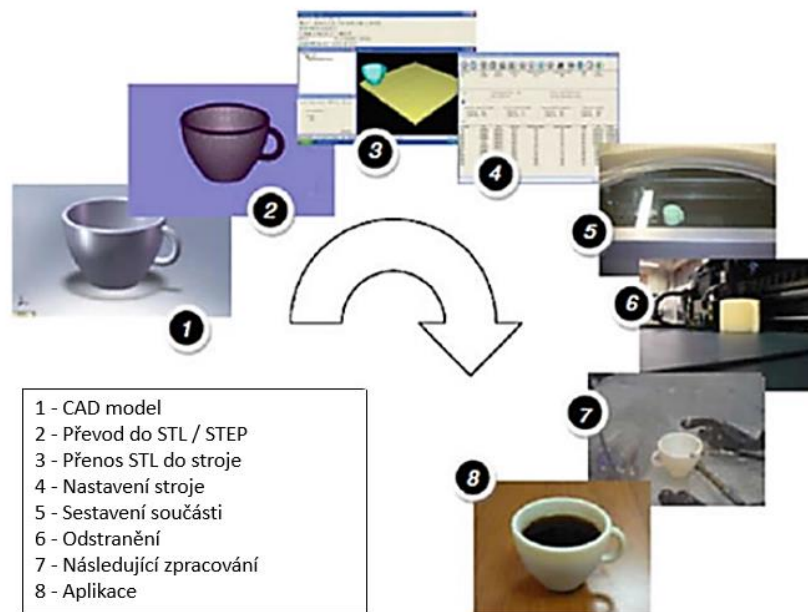
Jakmile stroj dokončí sestavení dílu, následuje odstranění dílu z pracovního prostoru stroje. [1]

#### ■ **Následující zpracování**

Díly po sestavení mohou vyžadovat další zpracování, jako například čištění povrchu od podpůrných prvků, kterou jsou nezbytné pro sestavení dílu. Tento krok často vyžaduje čas a pečlivou a zkušenou manuální práci. Podpůrný materiál lze odstranit i rozpuštěním ve vhodných rozpouštědlech. [1]

#### ■ **Aplikace**

V tomto kroku jsou díly již připraveny k použití nebo k sestavení společně s jinými součástmi pro vytvoření konečného produktu. Mohou však také vyžadovat další ošetření, než budou schopné provozu. Jedná se například o základní nátěr a lakování, aby poskytly přijatelnou povrchovou strukturu a povrchovou úpravu. [1]



Obrázek 4 - 8 základních kroků procesu aditivní výroby [1]

Je důležité poznamenat, že většina strojů pro aditivní výrobu vyžadují pečlivou údržbu. Mnoho strojů používá citlivou a křehkou laserovou technologii, která musí být pečlivě monitorována a která by se přednostně neměla používat ve špinavém prostředí. Například u laserovém spékání prášku jsou kladeny přísné požadavky na zacházení a manipulaci jak se zařízením, tak i s materiálem. Neplatí to však například u technologie FDM, kde se najdou zařízení jednoduchých konstrukcí a nejsou zde kladeny tak přísné požadavky ohledně provozu zařízení a zacházení s materiálem. Stroje jsou obecně konstruovány a navrženy pro provoz bez obsluhy. Přesto je důležité zahrnout do plánu údržby pravidelné kontroly, kdy různé technologie vyžadují různé úrovně údržby. Je také důležité si uvědomit, že procesy aditivní výroby nespádají pod všechny materiály a zatím i do žádných standardizovaných procesů. Technický výbor ASTM zatím pracuje na řešení tohoto problému. Mnoho výrobců těchto strojů však doporučuje a poskytuje zkušební vzory, které lze pravidelně použít k potvrzení, že stroje pracují v přijatelných a garantovaných mezích. [1]

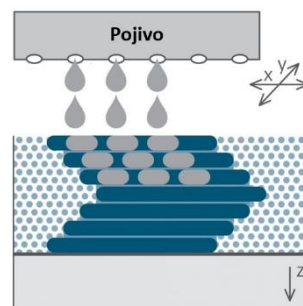
Nejen, že strojní zařízení vyžadují pečlivé zacházení, ale také i vstupní materiály. Materiály používané v některých procesech aditivní výroby mají omezenou trvanlivost. Mimo to může být u materiálů vyžadováno skladování za určitých podmínek, aby nedošlo k možným chemickým reakcím s okolím a znehodnocení tak materiálu. Většina technologií používá materiály, které lze znovu použít pro více než jedno sestavení. Může se však stát, že příliš časté opakované použití materiálu zapříčiní zhoršení vlastností materiálu. [1]

### 1.2.2. Technologie v aditivní výrobě

Existují různé technologie aditivní výroby, které byly vyvinuty pro odlišné funkce. Každá technologie má své cílené aplikace v průmyslu. Základní technologie jsou popsány na následujících řádcích. Jedná se vždy o stručný popis technologie.

#### Tryskání pojiva – binder jetting

Technologie tryskání pojiva – viz obrázek 5, je velmi rychlá a relativně přesná. To díky tekutému chemickému pojivu, které je selektivně nanášené na částice stavebního prášku, který pak vytvoří vrstvu. Touto technologií se dají tisknout různé materiály, jako kovy, písky, polymery a keramika. Po tisknutí následně většinou následují další zpracování. Výhodou této technologie je její jednoduchost, rychlost a nízká cena. Prakticky se jedná o pouhé lepení částic k sobě. Samozřejmě v případě této technologie nelze počítat s nijak výjimečnými pevnostními charakteristikami součástí. Vstřikováním pojiva se dají tisknout velmi velké součásti. [2, 3]



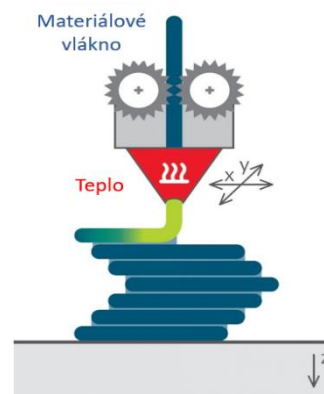
Obrázek 5 - Tryskání pojiva [3]

#### Řízená depozice energie – directed energy deposition

Jedná se o složitější proces tisku, který se běžně používá k opravě defektů na součásti nebo přidání materiálu na stávající komponenty. U této technologie je možnost kontrolovat strukturu výsledného zrna a může tak produkovat velice dobrou kvalitu produktu. Používá se koaxiálního přívodu stavebního kovového materiálu z prášku nebo drátu. Tento materiál je veden ke zdroji energie (většinou laseru), kde se vytvoří tavenina, která je pak nanášená na základní součást. Patří sem například metoda DMLS (Direct Metal Laser Sintering). [2, 3]

#### Vytlačování materiálu – material extrusion

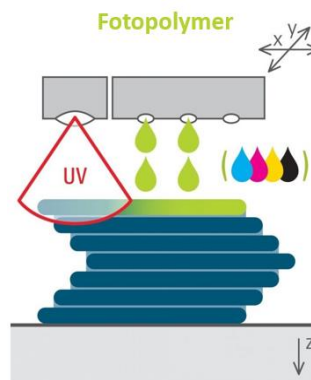
Tento proces je velice široce používán a jeho náklady jsou relativně nízké. Technologie je též známa pod zkratkou FDM (Fused Deposition Modelling). Metoda FDM byla vyvinuta na začátku roku 1990 a jako hlavní stavební materiál se zde používají polymery. Princip spočívá v postupném vytlačování tenké vrstvy nataveného materiálu na sebe a tiskne se tak postupně vrstva po vrstvě – viz obrázek 6. Tato technologie nachází využití pro malosériovou výrobu komplexních dílů pro koncové použití a prototypy pro zkoušky tvaru, sestavení a funkčnosti. [2, 3]



Obrázek 6 – Technologie FDM [3]

### Tryskání materiálu – material jetting

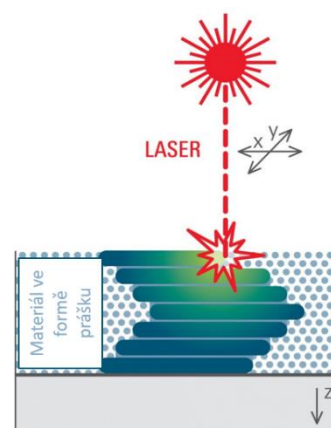
Tryskání materiálu je proces, při kterém se vypouští z tiskové hlavy kapičky kapalného fotocitlivého materiálu a selektivně se ukládají na sestavovací desku – viz obrázek 7. Následuje okamžité vytvrzení UV světlem. Touto technologií je možné vyrobit součásti s vysokou rozměrovou přesností a velmi hladkým povrchem. [2, 3]



Obrázek 7 - Tryskání materiálu [3]

### Prášková fúze – powder bed fusion

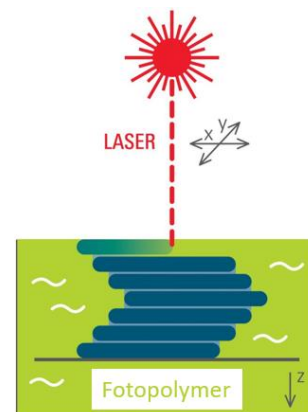
Proces práškové fúze zahrnuje tavení elektronovým paprskem (EBM) nebo selektivní laserové slinování (SLS) – viz obrázek 8. Hlavními materiály pro tuto technologii jsou kovy, keramika, polymery ale i kompozity. Vstupní materiál je ve formě prášku. K roztavení tohoto prášku se pak využívá laser nebo elektronový paprsek, který je výkonnějším zdrojem energie k zahřívání materiálu. [2, 3]



Obrázek 8 – Technologie SLS [3]

### Fotopolymerizace – vat polymerization

Další velmi častou technologií 3D tisku je fotopolymerizace. Jedná se o selektivní vytvrzování fotoreaktivních polymerů (termosetů) pomocí laseru, světla nebo ultrafialového záření (UV). Patří sem technologie využívající stereolitografii (SLA) – viz obrázek 9, a digitální zpracování světla (DLP). Hlavní rozdíl v těchto technologiích je zdroj světla na vytvrzení polymeru. DLP používá běžný světelný zdroj, například obloukovou lampu. Důležité parametry u těchto technologií je doba expozice, vlnová délka a množství energie k vytvrzení. Stavební materiály jsou ve stavu kapalném. Fotopolymerizace je vhodná na výrobu kvalitních produktů s citem na drobné detaily a vysokou kvalitou povrchu. Nevýhodou výrobků vyrobených technologií fotopolymerizací je jejich obecná křehkost a nejsou tak vhodné například pro funkční prototypy. Protože je materiál i citlivý na světlo, můžou se jeho mechanické vlastnosti a vizuální vzhled při vystavení slunečnímu světlu měnit. [2, 3, 4]



Obrázek 9 – Technologie SLA [3]

### **1.3. Rozdíly mezi aditivní výrobou a CNC obráběním**

Aditivní výroba sdílí část svého základu s technologií CNC obrábění, která je také řízena z velké podstaty počítačem a používá se k výrobě konečných produktů. Obrábění CNC se liší ale hlavní tím, že se jedná především o subtraktivní než aditivní proces. Subtraktivní proces vyžaduje blok materiálu, který musí být alespoň tak velký, jako konečný produkt a z tohoto bloku je následně materiál odebírán. Účelem vypsání hlavních rozdílů mezi těmito technologiemi není ovlivnit výběr jedné technologie před druhou, ale zjistit, jak mohou být implementovány pro různé fáze procesu vývoje produktu nebo pro různé typy produktů. Hlavními rozdíly mezi těmito technologiemi jsou: [1]

#### **■ Materiál**

Aditivní technologie byla původně vyvinuta pro polymerní materiály a vosky. Následně až s postupem času byly zavedeny kompozity, kovy a keramika. CNC obrábění lze použít pro některé měkké materiály, jako obrobitelné pěny, vosky, a i některé polymery. Použití CNC obrábění k výrobě vysoce přesných součástí s přesně definovanými vlastnostmi funguje obzvláště dobře u tvrdých a relativně křehkých materiálů, jako jsou oceli a jiné kovové slitiny. Oproti tomu některé součásti vyrobené aditivní technologií mohou být porézní nebo mohou mít určitou anizotropii, která je ovlivněna orientací součásti a celkovými parametry procesu. Výrobky CNC jsou obvykle homogennější a kvalitativně předvídatelnější. [1]

#### **■ Rychlost**

Vysokorychlostní CNC obrábění obecně dokáže odstranit materiál daleko rychleji než stroje aditivní technologie přidat podobný objem materiálu. Avšak toto je pouze jeden úhel pohledu, protože aditivní technologie dokážou vyrobit kompletní výrobek pouze v jedné fázi. CNC obrábění bude u složitých součástí pravděpodobně vícestupňovým výrobním procesem, který vyžaduje často přeupnutí součásti v jednom stroji nebo použití více než jednoho stroje. Výroba aditivní technologií je pouze v jednom zařízení a může trvat jen několik hodin. Pokud je požadavek na vysokou kvalitu, může to být několik dní. Pomocí CNC obrábění může stejný proces trvat týdny se značně větší nejistotou během doby dokončení. [1]

#### **■ Složitost dílu**

Zde platí, čím větší geometrická složitost dílu, tím větší výhoda má aditivní výroba oproti CNC obrábění. Pomocí aditivní výroby se dají vyrábět i duté výrobky. Pokud se CNC obrábění používá k vytvoření součásti přímo z jednoho kusu materiálu, mohou existovat takové



geometrické prvky, které nelze touto technologií vyrobit. Obráběcí nástroj musí být upevněn ve vřetenu stroje, a tak mohou existovat určitá omezení přístupnosti nebo nebezpeční kolize stroje s obrobkem. Některé součásti nemohou být vyrobeny pomocí CNC, pokud nejsou rozděleny na jednotlivé komponenty a znovu sestaveny v pozdější fázi. Aditivní výroba není omezena stejným způsobem, jako CNC obrábění. Stále je ale možné, že některé části nejde pomocí aditivní technologie vyrobit. Pravděpodobnost je zde ale mnohem nižší než u CNC obrábění. [1]

#### ■ Přesnost

Stroje aditivní výroby obvykle pracují s přesností několika desítek mikronů. Je ale zcela běžné, že tato přesnost může být různá podél různých os. Vertikální osa sestavení obvykle odpovídá tloušťce vrstvy a měla by být přesnější ve srovnání se dvěma osami v rovině sestavení. Přesnost CNC strojů je určována především přesností polohy podél všech tří ortogonálních os, průměrem a geometrií řezných nástrojů. Konečný detail bude záviset i na vlastnostech obráběného materiálu. [1]

#### ■ Geometrie

U strojů aditivní výroby se v podstatě rozdělí složitý 3D problém na řadu jednoduchých 2D průřezů s nominální tloušťkou. Protože tento způsob nelze aplikovat u CNC obrábění, musí být obrábění povrchu součásti generováno ve 3D prostoru. S jednoduchými geometriemi jako jsou válce, kvádry, kužely atd. je to relativně jednoduchý a snadný proces. Jedná se o spojování bodů, které jsou poměrně daleko od sebe. V případě povrchů s volným tvarem mohou být tyto body velmi blízko sebe s mnoha změnami orientace. Výroba takové geometrie může být u CNC velmi obtížný proces. Na obrázku 10 jsou vyobrazeny součásti, které jsou vyrobeny aditivními technologiemi a které by bylo velmi obtížné obrábět. [1]



Obrázek 10 - Tvarově složité součásti vyrobené aditivními technologiemi [1]




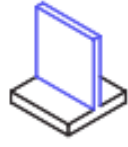

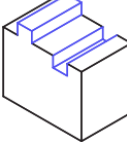
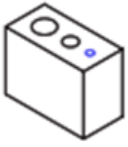
## ■ Programování

Určování posloupnosti programu pro CNC stroj může být velmi složité, včetně výběru správného nástroje, nastavení řezných podmínek, polohy a úhly nastavení atd. U strojů aditivních technologií jsou také určitá nastavení, která musí být správně vybrána, ale ve srovnání s CNC je toto nastavení minimální. U nesprávného nastavení parametrů výroby u těchto strojů může dojít v nejhorším případě ke špatnému sestavení dílu. Nesprávné programování u CNC strojů může mít za následek vážné poškození stroje a můžou zde nastat i bezpečnostní rizika pro člověka. [1]

### **1.4. Základní pravidla pro tvorbu modelů**

Stejně jako u všech výrobních technologií existují určité zásady a pravidla pro návrh výrobků, i zde u aditivních technologií existují základní pravidla a doporučení, jak správně navrhovat modely. Tyto pravidla jsou v následujících tabulkách 1 a 2.

Tabulka 1 - Základní pravidla pro navrhování součástí pro aditivní výrobu – část 1 [5]

Technologie	Opěrné zdi	Volné zdi	Podpora a převisy	Reliéfy a ryté detaily	Díry
	Stěny, které jsou připojeny se zbytkem tisknutého dílu alespoň na dvou stranách.	Stěny, které jsou ke zbytku dílu připojeny pouze na jedné straně.	Maximální úhel, na který lze prvek tisknout, aniž by vyžadoval podporu.	Prvky na modelu, které jsou vyvýšeny nebo zapašněny pod povrch.	Minimální průměr díry, který technologie dokáže vytisknout.
					
<b>Vytlačování materiálu – FDM</b>	0,8 mm	0,8 mm	45°	0,6 mm šířka 2 mm výška	Ø2 mm
<b>Stereolitografie – SLA</b>	0,5 mm	1 mm	Podpory jsou vždy vyžadovány	0,4 mm šířka 0,4 mm výška	Ø0,5 mm
<b>Selektivní laserové slinování – SLS</b>	0,7 mm	-	-	1 mm šířka 1 mm výška	Ø1,5 mm
<b>Tryskání materiálu</b>	1 mm	1 mm	Podpory jsou vždy vyžadovány	0,5 mm šířka 0,5 mm výška	Ø0,5 mm
<b>Tryskání pojiva</b>	2 mm	3 mm	-	0,5 mm šířka 0,5 mm výška	Ø1,5 mm
<b>Řízené laserové kovové slinování – DMLS</b>	0,4 mm	0,5 mm	Podpory jsou vždy vyžadovány	0,1 mm šířka 0,1 mm výška	Ø1,5 mm

Tabulka 2 - Základní pravidla pro navrhování součásti pro aditivní výrobu – část 2 [5]

	Připojené / pohyblivé části	Únikový otvor	Minimální prvky	Průměr čepu	Tolerance
<b>Technologie</b>	Doporučená vzdálenost mezi dvěma pohyblivými nebo spojovacími díly.	Minimální průměr otvorů umožňující odstranění stavebního materiálu.	Doporučená minimální velikost prvku k zajištění tisku bez chyb.	Minimální průměr čepu pro tisk.	Očekávané tolerance (rozměrová přesnost) konkrétní technologie.
<b>Vytlačování materiálu – FDM</b>	0,5 mm	-	2 mm	3 mm	±0,5 % (dolní mez ±0,5 mm)
<b>Stereolitografie – SLA</b>	0,5 mm	4 mm	0,2 mm	0,5 mm	±0,5 % (dolní mez ±0,15 mm)
<b>Selektivní laserové slinování – SLS</b>	0,3 mm pro pohyblivé části 0,1 mm pro spojování	5 mm	0,8 mm	0,8 mm	±0,3 % (dolní mez ±0,3 mm)
<b>Tryskání materiálu</b>	0,2 mm	-	0,5 mm	0,5 mm	±0,1 mm
<b>Tryskání pojiva</b>	-	5 mm	2 mm	2 mm	±0,2 mm pro kov ±0,3 mm pro písek
<b>Řízené laserové kovové slinování – DMLS</b>	-	5 mm	0,6 mm	1 mm	±0,1 mm

## **1.5. Běžné chyby u technologie FDM**

Jak už bylo zmíněno, technologie FDM je založená na skládání součástí ve vrstvách roztaveného materiálu. Metoda je široce používána pro svoji efektivitu, nízké náklady a relativně rychlou výrobu. Avšak během tohoto procesu můžou vzniknout vady tisku, které mohou způsobit znehodnocení jak tištěného dílu, tak i samotného zařízení. To sebou nese náklady na materiál, čas a celkové prostředky. Chyby, které způsobují tyto vady, mohou být: [6]

- Vychýlení tiskové platformy
- Vychýlení trysky
- Ucpání trysky
- Nedostatek stavebního materiálu nebo přerušný tok materiálu
- Nepřichycení nebo ztráta přilnavosti k platformě
- Vibrace nebo rázy (z tiskárny nebo jiného zdroje)
- Nepřesné nastavení tiskárny

### **■ Vychýlení tiskové platformy**

Vychýlení tiskové platformy může způsobit vážné problémy, jako zdeformování platformy nebo samotné trysky, pokud není 3D tiskárna správně kalibrovaná a nastavená. Platforma se pohybuje pouze v ose Z a určuje tloušťku vrstvy. Pokud není správně nastavená délka kroku platformy, následující vrstva nemusí přilnout na předchozí vrstvu nebo může být materiál vytlačen mimo. Vychýlení platformy také může způsobit jiné problémy, jako neschopnost nanést a přitisknout základní vrstvu na platformu, značné přiblížení trysky k platformě, ohýbaní okrajů tištěného modelu a neschopnost vytisknout jemné detaily. V důsledku toho by měly být zkontrolovány vodící tyče nebo vodící šrouby tiskárny. Ty by mohly vykazovat například ohyb nebo zbytky materiálu po tisku, které by bránily v pohybu platformy. [6]

### **■ Vychýlení trysky**

Tryska se může pohybovat pomocí mechanismu, který zahrnuje dva krokové motory, řemeny a kladky. Častým problémem u těchto částí tiskárny je napjatost řemenů, uvolněné šrouby nebo zbytky materiálu, které brání pohybu trysky. Uvedené problémy mohou způsobovat nesprávnou polohu jednotlivých vrstev nebo absenci podpěr v některých částech modelu. Aby se předešlo těmto chybám, je důležité zkontrolovat celý mechanismu okolo trysky. V neposlední řadě je také důležité vyčistit okolí trysky od případného zbytkového materiálu po předchozím tisku. [6]

### ■ **Nedostatek stavebního materiálu nebo přerušný tok materiálu**

Před zahájením tisku by měla být zkontrolována cívka se stavebním a podpurným materiálem, zda je na cívce dostatek materiálu. Jinak může dojít k nevytištění celého výrobku. Nedostatek stavebního materiálu však není jediným problémem týkajícím se vlákn. Běžným problémem je také ucpaná tryska, trhání vlákna, zamotané vlákno nebo vlákno s menším průměrem. Proto by se měla používat kvalitní vlákna určená pro konkrétní typ zařízení. Nejčastějším problémem je také ucpaná tryska. Tryska se musí průběžně čistit. Nejběžnějším způsobem čištění je zahřátí trysky a její následné čištění nástrojem s menším průměrem, než je průměr trysky. Kromě toho lze použít i jiné způsoby, jako zahřátí trysky na vysoké teploty v peci pro karbonizaci vlákna v trysce, nebo nechat trysku v rozpouštědle, například v acetonu. [6]

### ■ **Nepřichycení nebo ztráta přilnavosti k platformě**

V některých případech se může stát, že první vrstva tisku se nepřichytí nebo ztratí během průběhu tisku svoji přilnavost k platformě. To může vést k jisté deformaci nebo zničení celého modelu. Existuje několik příčin tohoto problému, jako nerovnoměrná plocha platformy, nedostatečná kalibrace vzdálenosti platformy od trysky, nedostatečně zahřátá platforma, nedostatečně zahřáté vlákno materiálu nebo nečistoty usazené na platformě. Řešit to lze pomocí přidání textury na platformu, správného nastavení vzdálenosti platformy, pravidelným čištěním platformy nebo přidáním podpor. [6]

### ■ **Vibrace nebo rázy**

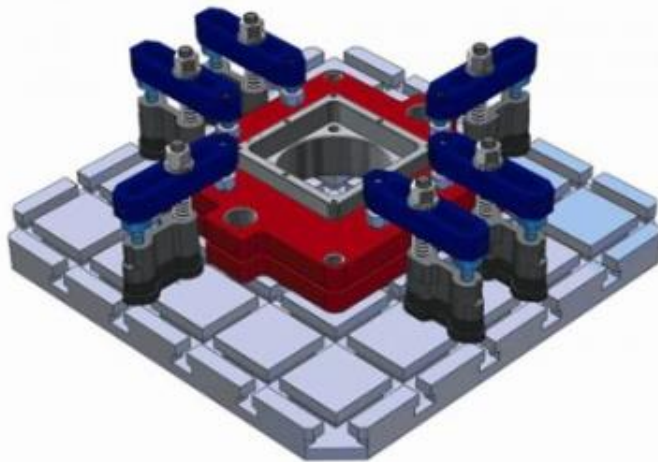
Vibrace výrazně ovlivňují kvalitu tisku a mohou způsobit vizuální chyby tisku na tištěném modelu. Aby se těmto vibracím a chybám zabránilo, tiskárna by měla být nejprve umístěna na pevné a rovné ploše. Důvod vibrací může být také ale špatná údržba stroje a opotřebení ložisek. Všechny mechanické části stroje, jako vodící šrouby a tyče by měly být správně seřizené a vyčištěné od prachu a jiných nečistot. Pokud i přes správné seřízení stroje se objevují tyto chyby tisku, může to být způsobeno rychlostí tisku. V tom případě je nutné tuto rychlost upravit. [6]

### ■ **Nepřesné nastavení tiskárny**

Nastavení tiskárny umožňuje řídit několik proměnných, jako je tloušťka vrstvy, úhel podpor, teplota vytlačovaného materiálu, teplota platformy, rychlost tisku, poměr průtoku extruderu, vzdálenost trysky, typ výplně modelu, hustota výplně, tloušťka povrchové vrstvy atd. Všechny tyto parametry jsou velmi důležité pro kvalitní tisk modelu a pro jejich správné nastavení je potřeba základních znalostí ohledně tištěného materiálu a tiskárny samotné. [6]

## **2. Navrhování přípravků s využitím PC**

Upínací přípravek je mechanismus používaný při výrobě, který slouží k upnutí výrobku a určení jeho správné polohy vůči k výrobnímu zařízení. Velké využití mají přípravky v oblasti obrábění, svařování, montáže, kontroly i zkoušení dílů. Tyto přípravky mají přímý dopad na kvalitu výrobku, produktivitu a náklady výroby. Design a návrh přípravků je velmi náročná práce. Základní postup procesu návrhu přípravku pro obrábění je na obrázku 12. Při návrhu se spoléhá na zkušenosti a znalosti inženýrů. Funkční přípravek vyhovující všem požadovaným parametrům však často bývá založen na metodě pokus omyl. Se stále intenzivnější globální konkurencí, která nutí každého výrobce v průmyslu vyvinout co nejlepší úsilí a prohloubení jeho konkurenceschopnosti zvýšením kvality produktu, snížení výrobních nákladů a zkrácení dodací lhůty výrobků, existuje silná touha po zdokonalení metodiky návrhu přípravků s efektivnější a méně nákladnou tvorbou designu přípravků. K naplnění tohoto cíle lze přičíst vývoj počítačových systémů. Přípravky mohou být flexibilní, co se týče adaptace na různé tvary dílů. Do těchto adaptivních přípravků spadají například stavebnicové přípravky – viz obrázek 11. Také se ale zhotovují především přípravky pro jednorúčelové použití. Cena jednorúčelových přípravků šplhá do vysokých částek, a proto se takovéto přípravky používají zejména v sériové a hromadné výrobě. [7, 8]

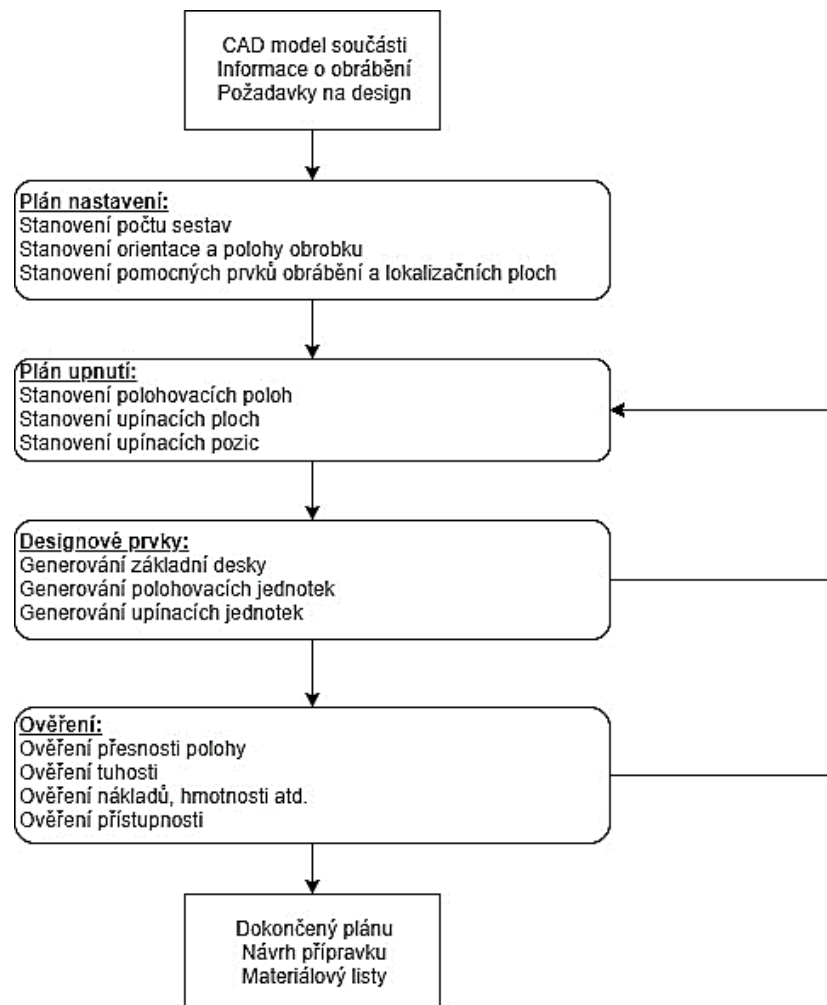


Obrázek 11 - 3D model stavebnicového přípravku [7]

### **2.1. CAD systémy**

Pro návrh a vývoj přípravků se dají využít dnešní CAD systémy. Tyto systémy dokážou modelovat 3D komplexní tvary a nabízejí možnost provést jak vizualizaci přípravku, tak i simulace provozu. Mezi tyto simulace se řadí například jak geometrické simulace, kam patří simulace montáže přípravku a kinematická dráha vkládání jednotlivých dílů, tak i číselné simulace, které

se týkají pevnostních, tepelných a deformačních výpočtů. Díky těmto simulacím se dá předejít zbytečným chybám při návrhu přípravku ještě před samotnou výrobou. Případné změny v návrhu při detekci chyby se dají jednoduše opravit. V CAD systémech se také dají využívat elektronické databáze, které mohou obsahovat již vymodelované díly, například upínací prvky nebo ustavující prvky, jako čepy, kolíky, středící pouzdra atd. Díky těmto databázím tak lze jednoduše, rychle a úsporně sestavovat přesné a reprodukovatelné přípravky. Velkou výhodou těchto systémů je i jejich relativní jednoduchost a rychlost při navrhování a tvorby výrobní dokumentace. Pomocí CAD systémů se takto projektují prototypy, řeší se konstrukční a technologické řešení a samotná technická příprava výroby. Využití CAD systémů při navrhování přípravků je, a i stále bude velmi nepostradatelnou součástí práce konstruktéra. Při řešení přípravků je nutnost mít komplexní znalosti nejen o funkčnosti a účelu přípravku, ale například i o velikosti upínacích sil jednotlivých částí přípravku, samotné provedení výrobního zařízení a jeho možnosti, vhodné použití materiálů a výběr vhodné výrobní technologie. V neposlední řadě i oblast již existujících upínacích prvků. [7]



Obrázek 12 - Základní prvky procesu navrhování přípravku [8]

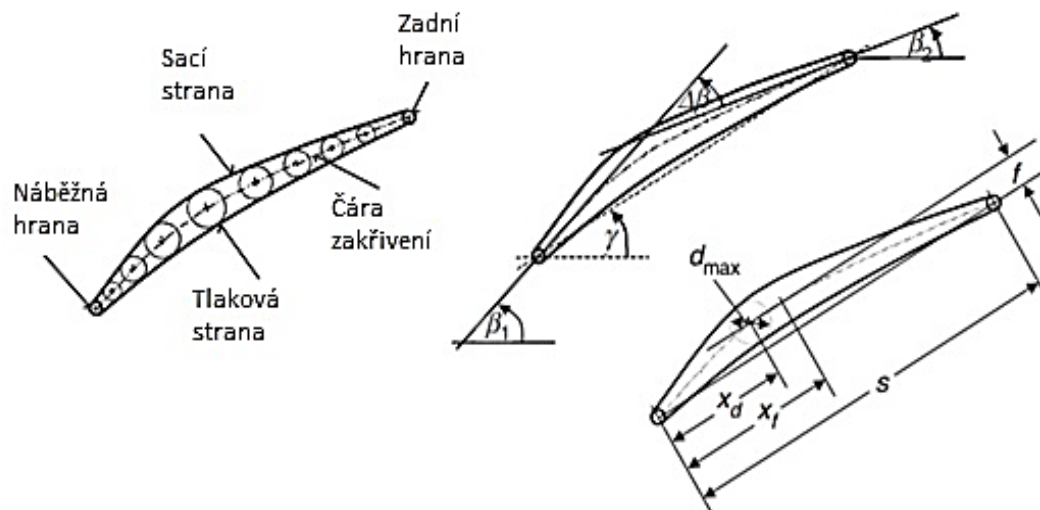


## 3. Technologie pro leštění lopatkových kol

### 3.1. Leštění lopatkových kol

Letecký motor se skládá z kompresorové a turbínové části, které obsahují jeden nebo více stupňů, přičemž každý stupeň je tvořen uspořádáním stacionárních lopatek nebo pomocí lopatek rotoru. Tyto lopatky jsou tvořeny kořenem a špičkou. Mezi kořenem a špičkou každé lopatky se rozprostírá profil lopatky. [9]

Účinnost profilu lopatkového kola se zvyšuje se sníženou drsností povrchu lopatek, a to z důvodu snížení energetické ztráty při tření plynu s povrchem lopatky. Z tohoto důvodu je potřeba stanovit takový leštící proces, aby se zvýšila účinnost profilu snížením drsnosti povrchu, aniž by se ale změnila geometrie profilu nad přípustnou prahovou hodnotou nebo toleranci. Jinak se tak mění geometrické parametry lopatky, a to může vést ke snížení aerodynamické účinnosti celého lopatkového kola kompresoru. Základní geometrické parametry lopatek jsou na vyobrazeny na obrázku 13. Kvalita povrchu a přesnost geometrie profilu lopatek turbínových kol má významný podíl nejen na výkonu celého turbínového systému, ale i na bezpečný chod. Tyto lopatky pracují ve velmi náročném pracovním prostředí se zvýšenou teplotou, vysokým tlakem a vysokou rychlostí. To klade přísné standardy při výrobě takovýchto součástí. [9]



Obrázek 13 - Základní geometrické parametry lopatek [10]

Základní geometrické parametry lopatek:

- Délka těživy –  $s$
- Maximální tloušťka profilu –  $d_{\max}$
- Bod maximální tloušťky profilu –  $x_d$
- Maximální odchylka ohybové čáry –  $f$
- Bod maximální odchylky ohybu –  $x_f$
- Vstupní úhel –  $\beta_1$
- Výstupní úhel –  $\beta_2$
- Úhel natočení –  $\Delta\beta$
- Úhel ohybu –  $\gamma$
- Tloušťka náběžné a zadní hrany lopatky [10]

### **3.1.1. Leštění lopatek pomocí brusných pásů**

V důsledku úzkého průchodu a složité geometrie mezi jednotlivými lopatkami kola je dostupnost k povrchu lopatky velmi obtížná. Proto přesné obrábění či povrchové zpracování v těchto místech bylo vždy velkým problémem. V současné době se pro povrchové zpracování lopatky používají technologie jako elektrochemické obrábění, abrasivní tok, broušení a leštění brusným pásem či ruční leštění pomocí brusných kotoučů. [11]

Díky své vysoké účinnosti, vysoké přesnosti, flexibilitě a leštění za snížených teplot je technologie pásového leštění považována za jednu z nejvhodnějších, co se týče zpracování součástí z titanových slitin. Leštění brusným pásem lze vidět na obrázku 14. [11]

Stále se velice často používá ruční broušení a leštění povrchů lopatek u lopatkových kol, které je z hlediska nákladů levné a technologicky nenáročné. Nevýhodou ručního broušení lopatek však spočívá ve vysoké kvalitaci operátora, nízká efektivita a mnohdy i ne zcela přesné zpracování povrchu. [11]

Proto pro zlepšení efektivitu procesu a kvality zpracování se používají víceosé číslicově řízené obráběcí stroje CNC spolu s brusnými pásy. Avšak díky úzkému prostoru mezi lopatky kola a technologií broušení pomocí brusných pásů, brousící hlava stroje je v malém kontaktu s povrchem lopatky.



Obrázek 14 - Leštění lopatek brusným pásem [11]

Tenkostěnná lopatka kola pak spolu s brusnou hlavou tvoří slabě tuhou sestavu obrábění. Během procesu pak dochází k vibracím, které mají velký vliv na rozměrovou přesnost profilu lopatky. [11]

### **3.1.2. Vibrační leštění lopatek**

Jednou z leštících technologií, kterou lze pro leštění těchto lopatek použít, je pomocí vibračního zařízení – vibrační omílání. Vibrační omílání umožňuje umístění součásti s lopatkami do pracovního prostoru, který představuje vibrační nádobu. Součást je následně zasypána tělísky spolu s leštícím tekutým médiem. Následně pracovní prostor začne pomocí vibračních motorů vibrovat a vytvoří se tak tok leštící směsi podél profilu lopatek, dokud se nedosáhne požadovaných parametrů drsnosti. Konečná hodnota drsnosti  $R_a$  bývá rovna nebo menší než 0,2  $\mu\text{m}$ . [9]

Lopatka je složena z náběžné hrany na vstupu a zadní hrany na výstupu. Vibrace by měly být nastaveny tak, aby vytvořený tok leštící směsi proudil od zadní hrany k náběžné a nedocházelo tak ke změně geometrie náběžné hrany, která je velmi důležitá pro výslednou účinnost celého lopatkového systému. Pro tyto aplikace se používají kryty kol, které mají funkci krytí důležitých částí na lopatkovém kole – např. náboj pro hnací hřídel, ale i k vedení toku leštící směsi podél lopatek. Tloušťka lopatek se v průměru sníží o méně než 0,5 % (0,02-0,1 mm) při dosažení požadovaných parametrů drsnosti povrchu. Geometrie ostří tedy není v podstatě nijak výrazně změněna a funkčnost je stále zajištěna. [9]

Leštící směs je tvořena vibračními tělísky a leštícím médiem. Jako tělíska se používají kovové částice nebo třísky. Leštící médium je pak brusný prášek složený z korundu (oxid hlinitý), keramiky nebo jejich kombinací. Kapalná část může být obyčejná voda s mýdlem pro vyjasnění povrchu lopatky. [9]

Z pohledu hmotnostního složení je leštící směs tvořena:

- Kovové částice → 90-98 %
- Brusný prášek → 0,05-0,4 %
- Kapalina → 3-10 % [9]

Samotný krok působení vibrací, tedy leštění, může trvat od 2 až do 10 hodin k dosažení požadovaných parametrů povrchu. Závisí na tom především složení leštící směsi a samotného leštěného materiálu. [9]

### **3.2. Leštící stroj SPM LPG 1**

Stroj SPM LPG 1 od firmy S.P.M. Mould Polishing System – viz obrázek 15, je primárně určen pro leštění skla. Nicméně výrobce uvádí použitelnost stroje i na leštění součástí z jiných materiálů, jako například z litiny, oceli, bronzu a dalších kovů. Stroj disponuje pracovním prostorem o velikosti 500 x 500 x 600 mm, kde ve spodní části tohoto pracovního prostoru jako upínací zařízení slouží elektropermanentní magnetická deska. Dodání a odčerpání leštících tělísek do pracovního prostoru je zde zcela automatické, stejně jako recyklace tohoto leštícího systému po procesu leštění. Stroj využívá technologii založenou na vibračním omílání, popsanou v podkapitole 3.1.2. [12]

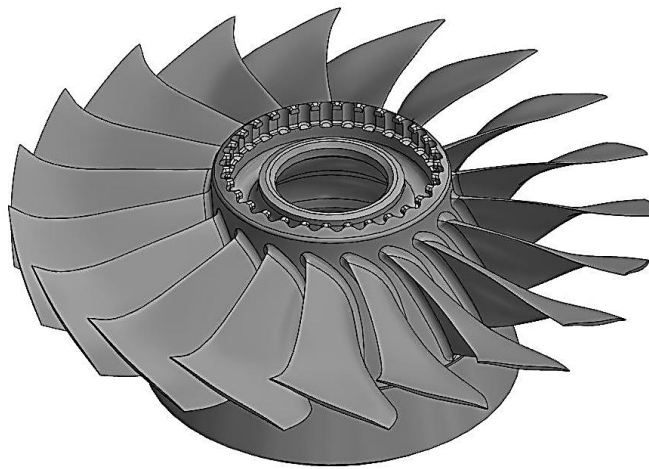


*Obrázek 15 - Leštící stroj SPM LPG 1 [12]*

Postup pro leštění ve stroji spočívá v upnutí leštěné součásti na upínací desce a následném zasypání součásti v pracovním prostoru dostatečným množstvím omílacích tělísek tak, aby leštěnou součást obklopovaly tělíska ze všech stran. Tělíska jsou v našem případě měděné. Po tomto kroku následuje přidání do pracovního prostoru leštícího média v podobě korundu, který je ve formě jemného prášku. Spolu s korundem se přidávají kapaliny za účelem vyjasnění leštěného povrchu a zvýšení viskozity leštící směsi. Poměr korundu a kapalin závisí na požadovaných výsledcích leštění a leštěném materiálu. Následuje nastavení procesních parametrů, které spočívá především v délce procesu leštění a nastavení vibrací, které určují směr proudění leštícího média přes leštěnou část. Toto nastavení vibrací je většinou nastaveno v pravidelných intervalech, kdy se pravidelně mění směr proudění leštícího média.

## **4. Zadaná součást pro výrobu přípravku**

Zadaná součást, pro kterou má být přípravek v rámci této práce navržen a vyroben, je znázorněna na obrázku 16 (CAD model). Jedná se o rotační součást, konkrétně jde o jeden z několika stupňů kompresorové části leteckého motoru. Tento stupeň kompresorové části motoru reprezentuje lopatkové kolo. Lopatky u těchto kol mohou být vyměnitelné, nebo celý rotor i s lopatkami může být vyroben z jednoho kusu materiálu. Tato kola se pak nazývají také jako „blisk“ a jde o tento případ.



Obrázek 16 – Zadaná součást – lopatkové kolo

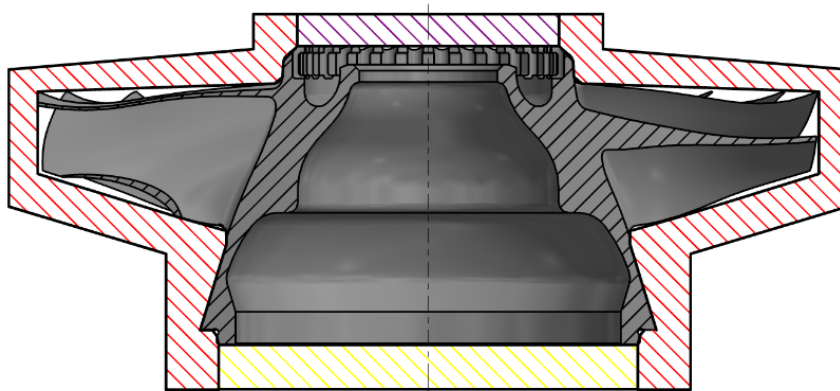
### **4.1. Analýza součásti pro výrobu přípravku**

Zadané lopatkové kolo bude podrobena dokončovacímú procesu leštění popsané v podkapitole 3.1.2. již v zmíněném stroji SPM LPG 1. Lopatkové kolo bude soužit jako testovací kus, na kterém se budou zjišťovat změny geometrie lopatek a integrita povrchu pro různá nastavení vstupních parametrů procesu leštění. Aby bylo možno provést na jednom lopatkovém kole několik testů leštění, požadavek na přípravek je takový, aby se leštila vždy jenom určitá část kola s určitým počtem lopatek.

Během procesu leštění se leštící médium nesmí dostat mimo část kola, která je určena pro leštění s konkrétními parametry. Zbytek kola tedy musí být krytý, a proto je potřeba navrhnout a vyrobit takový přípravek, který bude konat tuto úlohu.

Lopatkové kolo obsahuje centrální otvor pro uložení hnací hřídele s funkčními plochami, které nesmí být procesem leštění nijak ovlivněny. Proto bude potřeba vnitřní prostory kola zakrýt. Protože se jedná o rotační součást, k zakrytí těchto vnitřních prostor budou sloužit dva válcové kryty, které budou dosedat na čela kola a zabrání tak možnému vniknutí leštícího média do vnitřních prostor kola, a tedy i znehodnocení funkčních ploch kola. Zjednodušené znázornění

zakrytí těchto vnitřních prostor kola představují fialově a žlutě šrafované části na obrázku 17. K těmto dvěma válcovým krytům kola bude potřeba třetí hlavní části přípravku (na obrázku 17 červeně šrafovaná část), která bude kopírovat geometrii lopatek tak, aby vymezila prostor mezi lopatkami a zabránila tak vniknutí leštícího média k ostatním lopatkám. Celková geometrie lopatek kola je složitá a skládá se z obecných ploch. Krycí část lopatek tedy bude taktéž složitějších tvarů. Proto se předpokládá při návrhu a výrobě této části přípravku využití technologie 3D tisku, kterou ústav disponuje. Tato technologie bude pro výrobu této části přípravku o složitějším tvaru relativně jednoduchou a ekonomicky přijatelnou možností. Použití jiné technologie by bylo mnohem technologicky složitější a časově náročnější.



Obrázek 17 - Zjednodušené znázornění krytí kola

## **4.2. Návrh materiálu pro výrobu přípravku**

Jako další na řadu přišla otázka, z jakého materiálu se bude přípravek vyrábět. Vlastnosti materiálu jsou důležitým hlediskem při hodnocení výroby. Protože se jedná o lopatkové kolo vyrobené ze slitiny titanu, nepřichází zde v úvahu použití běžné uhlíkové oceli, kvůli možnosti kontaminace slitiny titanu a znehodnocení tak celého kola. Přípravek nebude během procesu leštění nijak extrémně namáhán. S tím i pro snížení nákladů na celou výrobu přípravku se tak nabízí možnost použití plastových materiálů.

### **4.2.1. Krycí část lopatek**

Protože se tato část bude tisknout na 3D tiskárně a zároveň na přípravek celkově nebudou působit nijak velké napětí, nabízí se použití termoplastického materiálu. Ústav disponuje 3D tiskárnou F370 od firmy Stratasys. Tato tiskárna nabízí tisk z několika druhů termoplastů, jako PLA, ABS-M30, ASA, PC-ABS a TPU 92A. Z těchto materiálů byl kvůli cenové dostupnosti a dostačujícím pevnostním vlastnostem navržen pro výrobu krycí části lopatek materiál ABS-M30. [13]

## ABS-M30

Jedná se o modifikaci ABS materiálu, který má zvýšenou o 25 až 70 % pevnost oproti běžnému ABS, a je tedy ideální pro modelování funkčních prototypů, výrobu nástrojů a součástí pro konečné použití. Dochází zde i k výrazně silnějšímu spojování jednotlivých vrstev než u klasického ABS. Díky tomu mají součásti vyrobené z tohoto materiálu větší pevnost v tahu a ohybu, povrch součástí je hladší a je zde lepší citlivost pro detail. Základní mechanické vlastnosti materiálu ABS-M30 jsou v následující tabulce 3. [14]

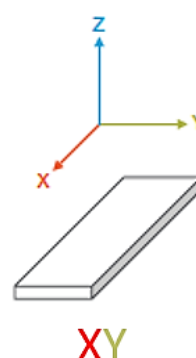
Tabulka 3 - Základní mechanické vlastnosti materiálu ABS-M30 [14, 15]

<b>Vlastnost</b>	<b>Norma zkoušky</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Pevnost v tahu</b>	ASTM D638	MPa	31
<b>Youngův modul</b>	ASTM D638	GPa	2,4
<b>Pevnost v ohybu</b>	ASTM D790	MPa	61
<b>Modul pružnosti v ohybu</b>	ASTM D790	GPa	2,22
<b>Prodloužení po přetržení</b>	ASTM D638	%	8

Vlastnosti uvedené v tabulce 3 jsou hodnoty pro vytištěný zkušební vzorek v rovině tisku XY – viz obrázek 18.

### 4.2.2. Válcové kryty

Aby byla zachována podmínka zabránění kontaminace slitiny titanu, i zde přichází v úvahu použití polymerního materiálu. Protože se vycházelo hlavně z dostupných materiálů a polotovarů na ústavu, po domluvě s vedoucím se navrhl pro tyto části přípravek kopolymerní materiál POM-C.



Obrázek 18 – Orientace tisku zkušební vzorku pro ABS-M30 [15]

**POM-C**

Tento plastový materiál se vyznačuje vysokou tvrdostí a stálostí. Jeho trvalá pracovní teplota je od -60 °C do +100 °C. Vykazuje houževnaté chování až do teplot -40 °C. Díky vysoké tvrdosti a kluznosti povrchu má tento materiál vysokou otěruvzdornost. Dále vykazuje vysokou teplotní stabilitu, odolnost vůči rozpouštědlům a je prakticky nenasákavý, tedy nízká objemová změna při použití ve vlhkém prostředí nebo ve vodě (0,8 % - voda; 0,2 % - vzdušná vlhkost). V neposlední řadě je jeho vlastností i vynikající obrobiteľnosť. Základní mechanické vlastnosti materiálu POM-C jsou uvedené v následující tabulce 4. [16, 17]

Tabulka 4 - Základní mechanické vlastnosti materiálu POM-C [18]

<b>Vlastnost</b>	<b>Norma zkoušky</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Pevnost v tahu</b>	ISO 527	MPa	65
<b>Youngův modul</b>	ISO 527	GPa	2,855
<b>Pevnost v ohybu</b>	ISO 178	MPa	115
<b>Modul pružnosti v ohybu</b>	ISO 178	GPa	2,9
<b>Prodloužení po přetržení</b>	ISO 527	%	28



## 5. CAD návrh přípravku

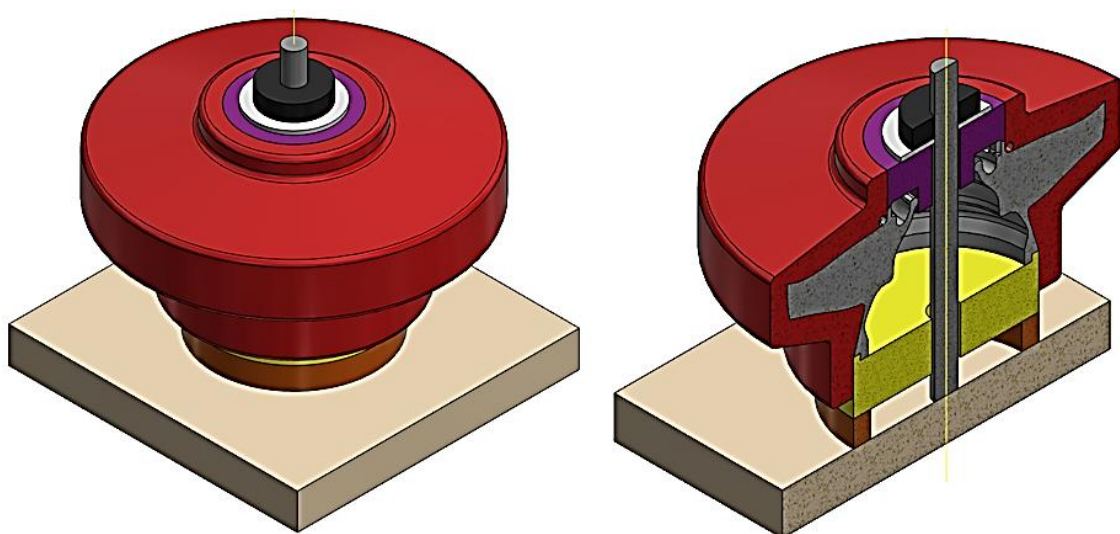
Pro návrh a modelování krycího přípravku pro lopatkové kolo byl použit software Autodesk Inventor Professional 2020 [19] pro jeho dostupnost pro studijní účely.

Prototypová výroba je často složitým procesem, kde se ve většině případů jedná o spojení více různých výrobních odvětví a technologií. Podstatou je nápad, a tento nápad dovést až k samotné realizaci. Avšak při realizaci onoho nápadu se může narazit na problémy s funkčností či možností vyrobitelnosti. V tomto případě se musí výchozí stav optimalizovat tak, aby se vzniklé problémy a překážky odstranily a byla zachována funkčnost a vyrobitelnost prototypu.

V této kapitole jsou popsány a uvedeny jednotlivé kroky, návrhy a jejich optimalizace, od prvního návrhu až po finální, který se následně po schválení vyráběl.

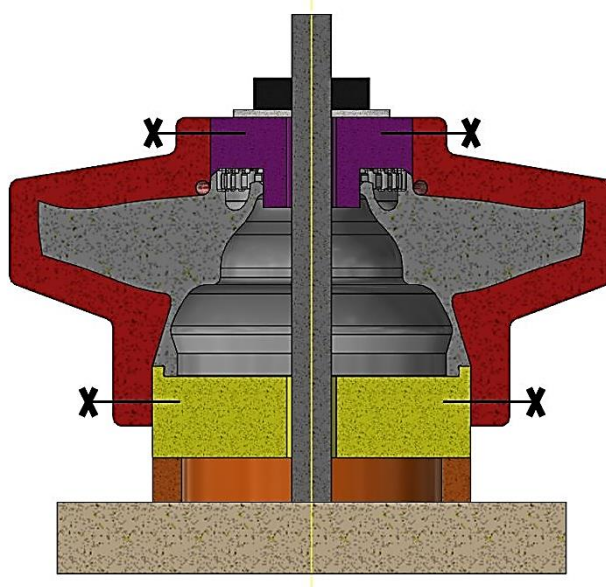
### 5.1. Návrh první

Po analýze zadaného lopatkového kola spočívá prvotní návrh krycího přípravku, který je na obrázku 19, ve vytvoření válcových krytů přípravku pro zakrytí vnitřních prostor kola a celistvého krytu lopatek, který kryje lopatky po celém obvodu kola. Jde o první myšlenku celého návrhu, kdy šlo hlavně o vizualizaci návrhu, která bude dál sloužit pro následnou optimalizaci a zjišťování celé funkčnosti a proveditelnosti přípravku. Jednotlivé části přípravku jsou barevně odlišné, kvůli lepší přehlednosti modelu.



Obrázek 19 – První zjednodušený CAD návrh

Celý návrh se skládá z již zmíněného krytu lopatek kola (červená část), který slouží jako hlavní krycí část lopatek. Vnitřní strana krytu kopíruje geometrii lopatek. Vnější strana je pak vytvořena z jednoduchých tvarových ploch. Dalšími částmi návrhu jsou dva válcové kryty (fialová a žlutá část), které byly navrženy tak, aby zakryly vnitřní prostory kola a chránily tak přesně obrobene funkční části kola. Obě části dosedají na čela kola. Nesou vždy tvar tohoto čela, aby přesně dosedaly na plochy a netvořily tak případné mezery pro možnost průniku leštícího média. Sloužit by také měly jako součásti pro spojení a upevnění krytu lopatek, které by mělo být zrealizováno pomocí klasického šroubového spoje. Toto spojení je schematicky znázorněno na obrázku 20.



Obrázek 20 – Znázornění plánovaného šroubového spojení krycí obálky

Další částí návrhu je nastavovací kroužek (oranžová část). Tento kroužek zde slouží jako možnost nastavení potřebné výšky celého přípravku společně s lopatkovým kolem. Nastavení výšky přípravku v pracovním prostoru leštícího stroje může mít vliv na celý proces leštění, a tedy i na konečný leštěný povrch lopatek. Je tedy dobré mít na přípravku tuto možnost nastavení výšky celého přípravku.

Spodní část přípravku (běžová část) slouží nejenom jako podstavec celého přípravku, ale hlavně slouží jako část pro upnutí přípravku ve stroji. Upínání v leštícím stroji SPM LPG 1 je realizováno pomocí elektropermanentní magnetické desky. Tato část přípravku tedy musí být vyrobena z magnetického materiálu. Jedná se o čtvercovou desku o rozměrech 200x200x25 mm.

Posledními částmi návrhu jsou pouze zjednodušené modely spojovacích součástí pro představu, a to závitová tyč (tmavě šedá část), matice (černá část) a podložka (světle šedá část)

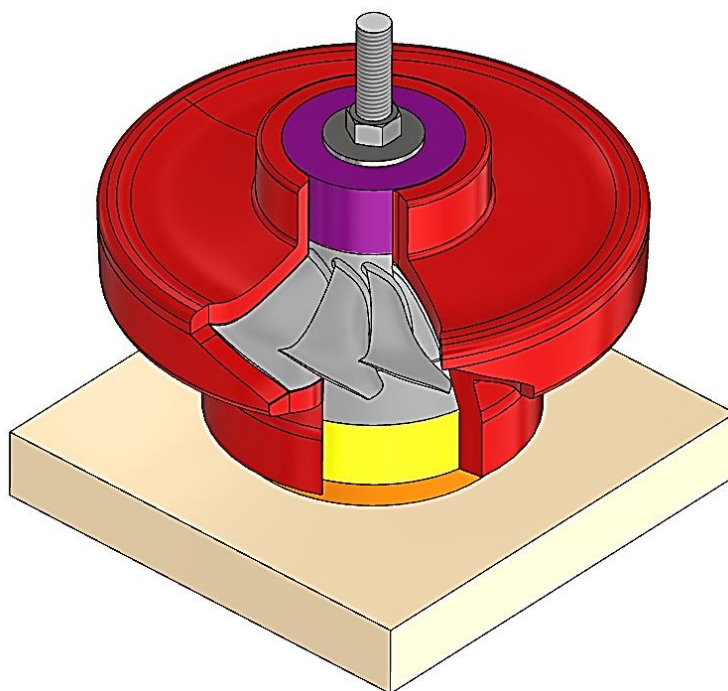
s větším vnějším průměrem pro větší rozložení upínací síly. Tyto tři součásti slouží pro upnutí a spojení přípravku s lopatkovým kolem a s upínací deskou.

## 5.2. Návrh druhý

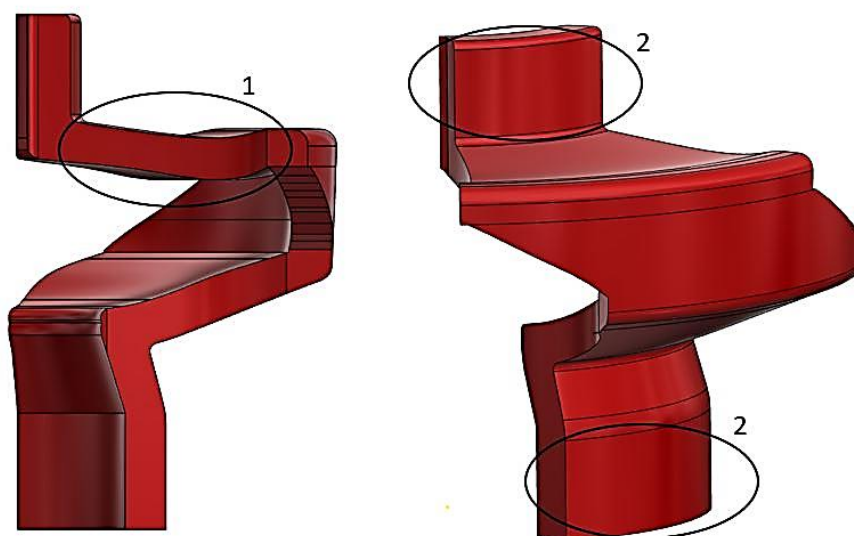
V prvním návrhu je krycí část kola, která kryje lopatky, v celistvém tvaru. U přípravku ale je potřeba, aby zde byla vymezená část, která by odkrývala určitý počet lopatek a vznikl tak prostor pro proudění leštícího média. Odkryté lopatky pak budou následně vystaveny procesu leštění, zatímco ostatní lopatky budou před tímto procesem kryty.

Další představou bylo, že by se počet lopatek, které by byly určeny k leštění, dal případně zvýšit, a to tím, že by se odkrytá část kola dala zvětšit. Tento požadavek se vyřešil tím, že se celý tvarový kryt rozdělí do několika částí – segmentů. Každý segment pak odkrývá/zakrývá určitý počet lopatek. Odstraněním dalšího segmentu by se pak odhalily další lopatky určené k leštění. Jednotlivé segmenty musí navazovat na geometrii lopatek tak, aby se zamezilo případnému vniknutí leštícího média k dalším lopatkám, u kterých není leštění požadováno.

Zadané kolo disponuje 19 lopatkami. Po konzultaci s vedoucím práce se rozhodlo, že segmenty budou rozděleny po třech lopatkách a jeden segment po čtyřech. Toto rozdělení nám dává celkově šest segmentů k zakrytí celého kola. Na obrázku 21 je znázorněn výřez pouze jednoho segmentu v obálce. Obrázek 22 dále vyobrazuje pouze samotný segment spolu s označenými částmi, které byly optimalizovány.



Obrázek 21 – Výřez jednoho segmentu v krytu lopatek



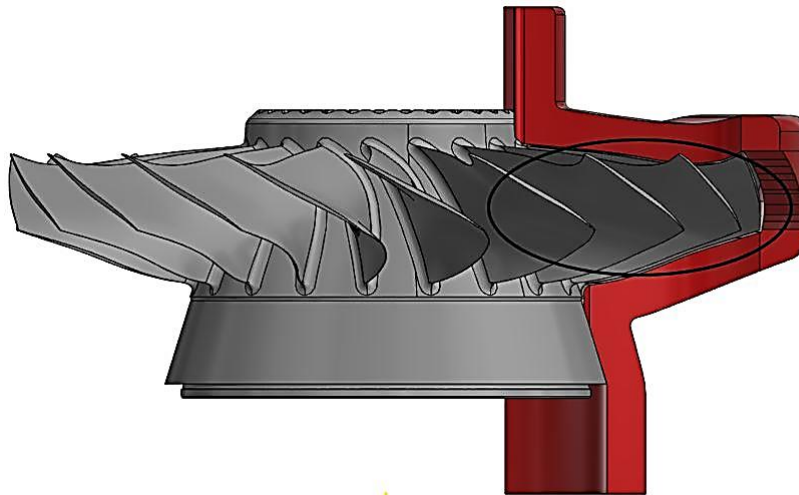
Obrázek 22 – Model segmentu s označenými optimalizacemi

Část označená 1 znázorňuje optimalizaci vnějšího tvaru obálky, který nyní nese stejný tvar, jako vnitřní strana. V předchozím návrhu nesla vnější strana obálky jednodušší tvary ploch. Optimalizace proběhla jak z důvodu zachování konstantní tloušťky obálky, tak i kvůli zmenšení nákladů na materiál. Tloušťka stěny je nyní 10 mm. Tato hodnota by měla spolu s materiálem ABS – M30 zajistit dostatečnou pevnost a tuhost přípravku.

Oblasti označené 2 jsou taktéž optimalizovány, a to protažením (zvětšením) plochy. Tato optimalizace proběhla z důvodu potřeby vytvoření dostatečného místa pro otvor na spojovací a zajišťovací šroub spolu s podložkou. Dále i toto prodloužení zvětší opěrnou plochu k válcovými krytům přípravku (fialová a žlutá část na obrázcích). Přípravek tak bude vykazovat vyšší tuhost a pevnost. Tím je zde vyšší pravděpodobnost zabránění případného zlomení či jinému znehodnocení přípravku během leštícího procesu, kdy na přípravek působí napětí. Samozřejmě po této optimalizaci byly upraveny a zvětšeny související válcové části.

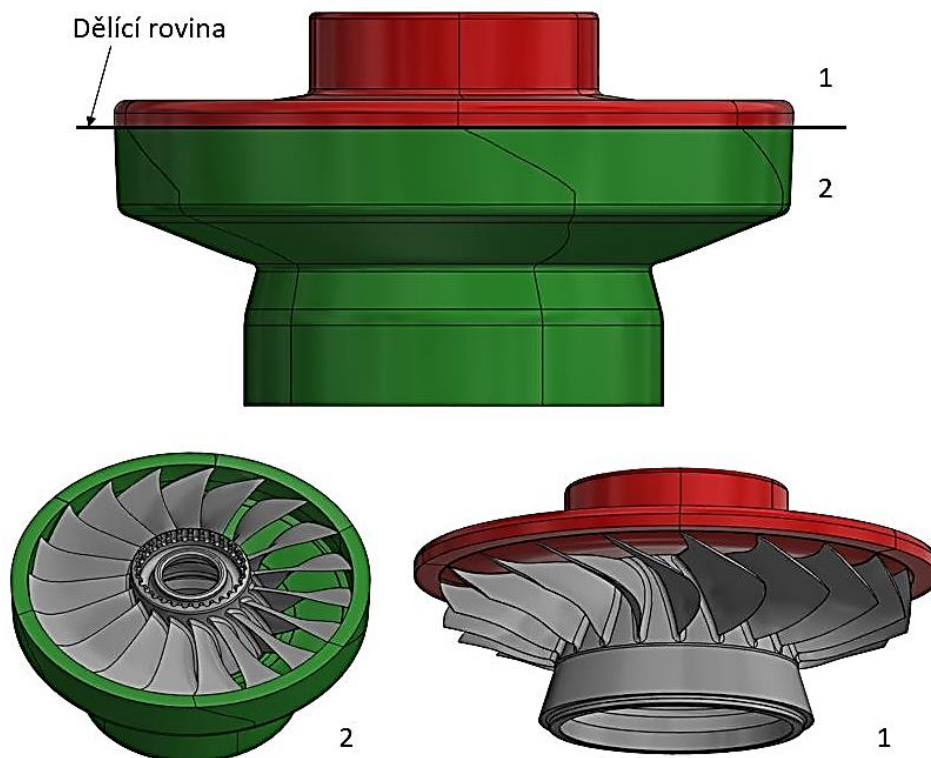
### **5.3. Návrh třetí**

Při detailnějším zkoumání segmentů z obrázku 23 se vyskytl problém s možností montáže segmentů na lopatkové kolo ve vyznačené oblasti. Konkrétně jde o vnitřní tvar segmentů, který kopíruje geometrii lopatek. V případě, že by segmenty byly v této podobě, tak díky této geometrii by nebylo možno nasadit segmenty na kolo.



Obrázek 23 – Vyznačení problémové části segmentu

Z tohoto důvodu se provedla po konzultaci s vedoucím práce další optimalizace, a to taková, že se segmenty rozdělily na dvě části. Jednotlivé části segmentů tak na sebe budou dosedat na ploše dělicí roviny. Toto rozdělení a jednotlivé části přípravku (na obrázku označeny 1 a 2) jsou znázorněny na obrázku 24. Po této optimalizaci již bude možno segmenty na kolo bezproblémově namontovat. Funkční stránka přípravku by tímto rozdělením neměla být nijak ovlivněna.

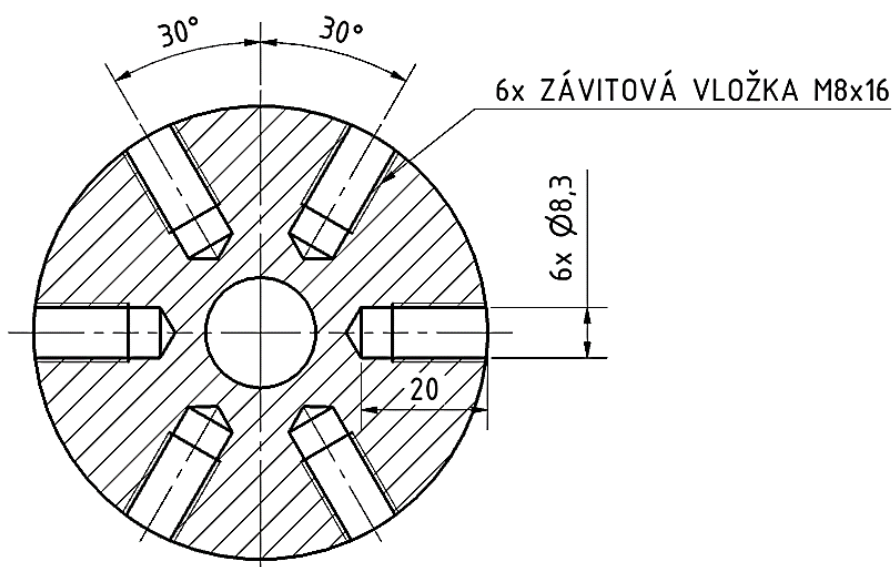


Obrázek 24 – Rozdělení segmentů do dvou částí

## 5.4. Návrh čtvrtý

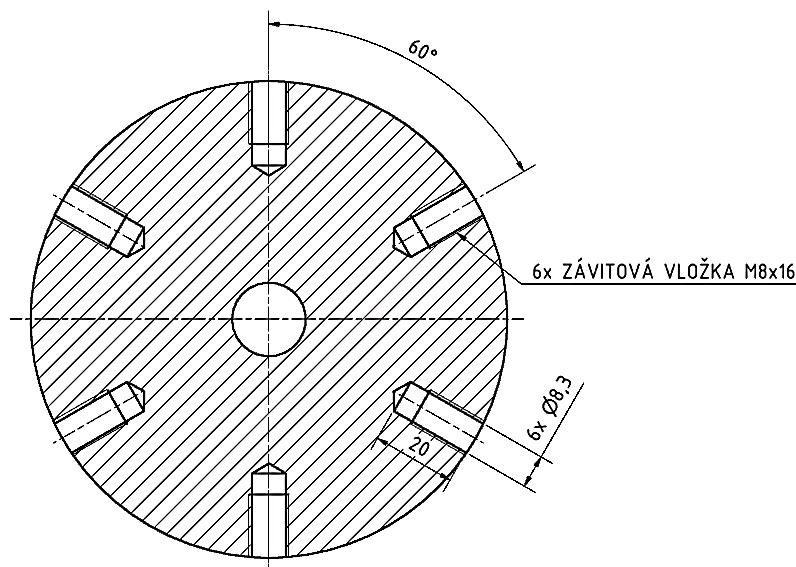
V tomto návrhu se po rozdělení jednotlivých segmentů na dvě části řešila problematika spojení všech částí přípravku do jednoho celku. Do této doby byly návrhy spojení pouze orientační, kde se uvažovalo o nijak více specifickém šroubovém spojení.

Spojení segmentů nakonec bude spojena kválcovým krytům přípravku pomocí šroubového spoje. Konkrétně jedním šroubem s válcovou hlavou nízkou s vnitřním šestihranem M8x25 – DIN 6912/A2 pro každou část segmentu. Pod šrouby pro rozložení síly budou ploché podložky 8.4 – DIN 433/A2. Rozměry šroubů by měly zajistit dostatečnou pevnost k zajištění segmentů k válcovým částem přípravku. Díry v segmentech pro šrouby jsou navrženy dle ČSN EN 20273 řady střední –  $\varnothing 9$  mm. Protože válcové kryty přípravku budou vyrobeny z plastového materiálu POM-C, existuje zde pravděpodobnost, že by závit nevydržel utahovací moment a mohl se strhnout. Proto je potřeba závit ve válcových částí realizovat pomocí nerezové závitové vložky. Do předem vyvrtaných děr odpovídajícím rozměrům pro montáž závitové vložky – v tomto případě díry  $\varnothing 8,3$  mm – se vyřeže strojním závitníkem závit, do kterého se následně namontuje závitová vložka M8. Délka závitové vložky odpovídá 2D podle doporučení pro plastový materiál. Hloubka díry pro závit je 20 mm. Výběh za závitem jsou tedy 4 mm, což vyhovuje podle krátkého výběhu za závitem dle ČSN 02 1034 [20]. Děř je celkem šest – pro každou část segmentu jeden šroub. Díry jsou vůči sobě pootočeno o  $60^\circ$  tak, aby se jednotlivé segmenty daly vedle sebe namontovat. Na obrázku 25 je znázorněn náskres poloh a velikosti závitových vložek v menším válcovém krytu.



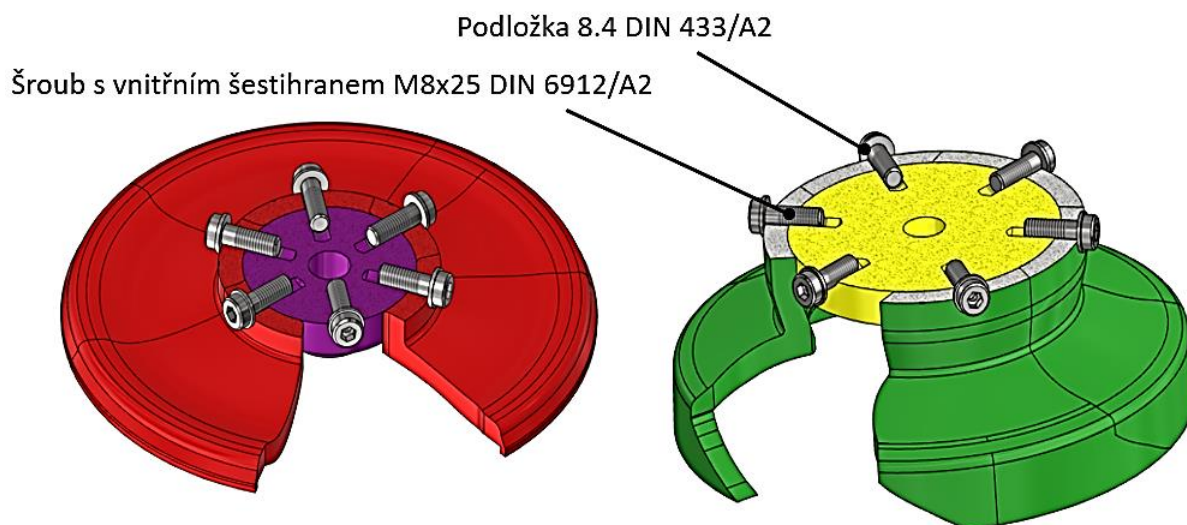
Obrázek 25 – Náskres poloh a velikosti děř se závitovými vložkami – menší válcový kryt

Pro větší válcový kryt přípravku je spojení se segmenty provedeno stejným šroubovým spojem, jako u předchozí válcové části přípravku. Díry spolu se závitovými vložkami jsou tedy navrženy stejně. Náčres poloh a velikostí závitových vložek u většího válcového krytu přípravku je na obrázku 26.



Obrázek 26 – Náčres poloh a velikostí děr se závitovými vložkami – větší válcový kryt

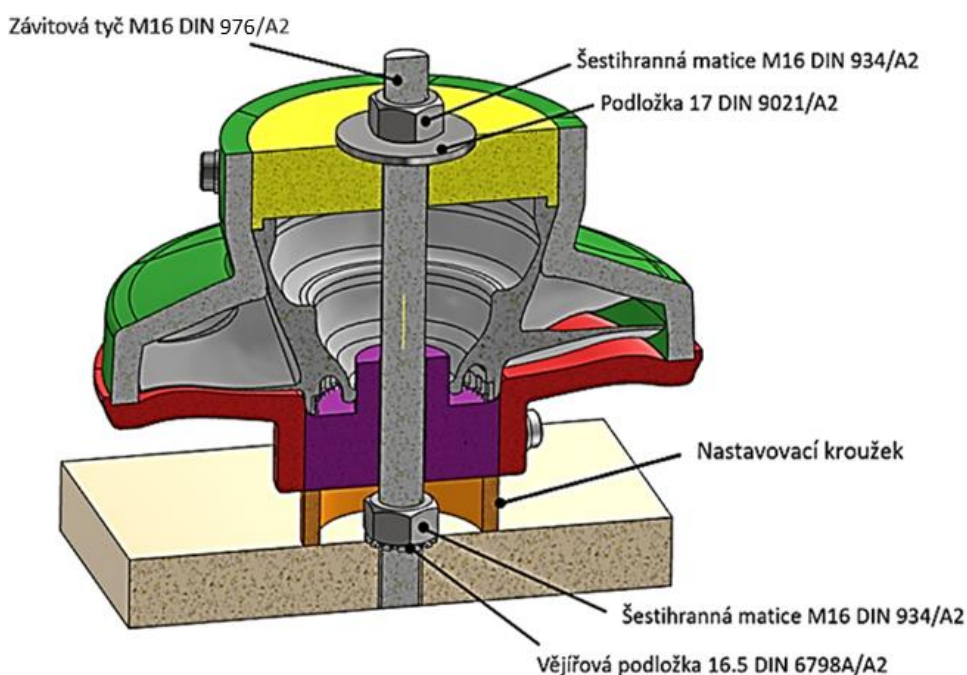
Na obrázku 27 je pak zobrazeno navržené šroubové spojení segmentů spolu s válcovými kryty přípravku v CAD modelu. Lze si však všimnout chybějícího segmentu. Tato absence segmentu je z důvodu, že u lopatkového kola bude vždy vyžadována část s odkrytými lopatkami, které budou určeny k experimentálnímu leštění. Proto se jeden segment odstranil a konečný finální přípravek tedy bude vyroben bez tohoto jednoho segmentu.



Obrázek 27 – Šroubové spojení segmentů k válcovým krytům v CAD modelu

Následuje finální návrh spojení hlavní části přípravku spolu s lopatkovým kolem na upínací část přípravku – upínací desku. Spojení je navrženo též pomocí šroubového spoje. Jedná se o návrh, kdy do upínací desky bude vyřezán průchozí závit. Závitová tyč procházející středem přípravku, a sloužící tak jako hlavní ustavovací element přípravku, bude o velikosti závitu M16 – DIN 976/A2. Tato velikost závitové tyče byla stanovena po domluvě s vedoucím práce, kvůli dostatečné tuhosti přípravku. Proto velikost vyřezaného závitu v upínací desce bude odpovídat M16. Po našroubování závitové tyče do upínací desky se tyč zajistí pomocí šestihranné matice M16 – DIN 934/A2 a vějířové podložky s vnějším ozubením 16.5 - DIN 6798 A/A2 z horní části upínací desky. Aby matice nepřekážela k dosednutí spodní plochy přípravku k upínací desce, bude výška přípravku nastavena nastavovacím kroužkem minimálně o výšku matice. Zajištění pozice hlavní části přípravku s upínací deskou bude zajištěno pomocí šestihranné matice M16 – DIN 934/A2 s podložkou s velkým vnějším průměrem 17 - DIN 9021/A2. Celé spojení a sestavení přípravku s upínací deskou lze vidět na obrázku 28.

Z obrázku 28 si lze všimnout, že se oproti předchozím verzím celý přípravek s lopatkovým kolem obrátil vzhůru nohama. Obrácení přípravku proběhlo z důvodu umístění náběžných hran lopatek kola. U těchto náběžných hran je požadováno co nejmenší možný úběr materiálu tak, aby se zaoblení hrany nijak dramaticky nezvětšilo. V této pozici přípravku jsou náběžné hrany směrem k upínací desce, kde by proudění leštícího média nemělo mít na zaoblení hran příliš velký nebo žádný vliv. Celá koncepce přípravku umožňuje takovéto obrácení bez jakékoliv komplikace nebo vlivu na funkčnost.



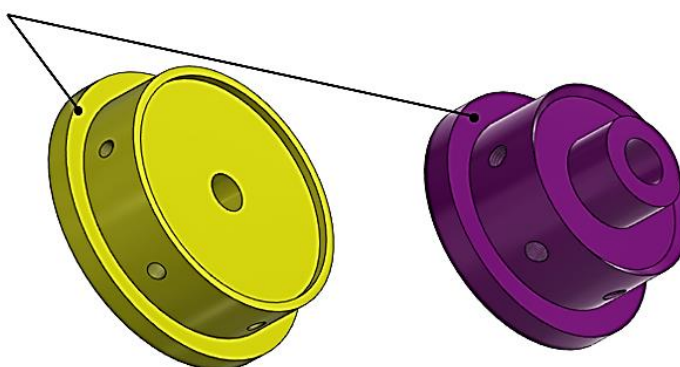
Obrázek 28 – Šroubové spojení hlavní části přípravku s upínací deskou



## 5.5. Pátý návrh – finální

Po předchozím návrhu, kdy je přípravek téměř finální, nastaly poslední úpravy. Jedná se především o válcové kryty přípravku. Úpravy spočívají v přidání osazení, které lze vidět na obrázku 29. Osazení bylo přidáno kvůli větší podpoře jednotlivých částí segmentů. Během procesu leštění bude na segmenty působit tíha měděných tělísek, a protože budou segmenty vyrobeny z plastu ABS – M30, tak i přes větší pevnost než u klasického ABS, by se mohly segmenty pružně deformovat. Díky této úpravě se segmenty mohou o osazení během působení tíhy tělísek „opřít“ a zvýší se tak i celková tuhost přípravku.

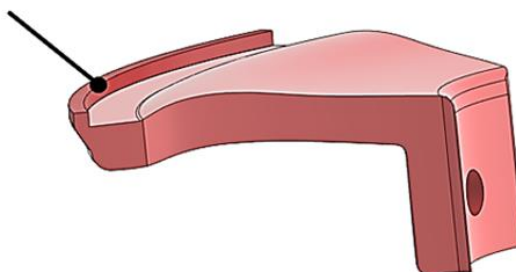
Vytvořené osazení



Obrázek 29 – Optimalizované válcové části přípravku

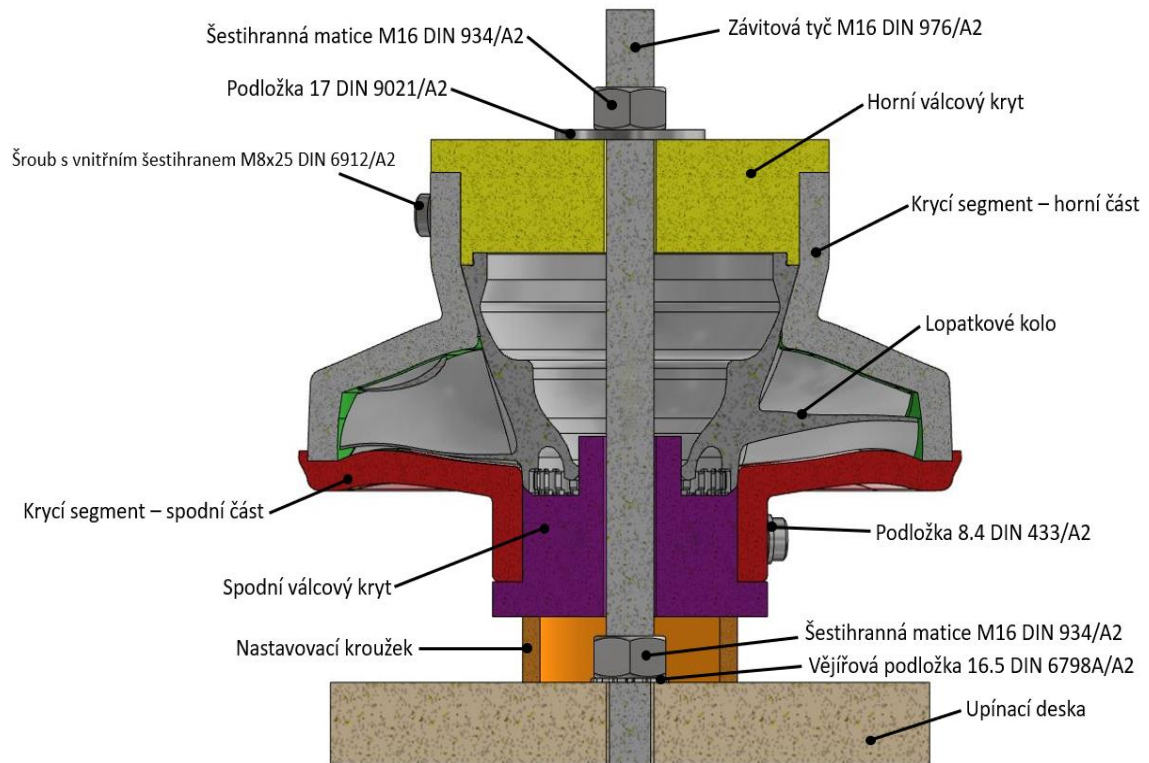
Poslední úprava spočívá v přidání osazení na spodní část segmentů, který je vyobrazen na obrázku 30. Důvod této úpravy je podobný, jako přidání osazení u válcových krytů. Během působení tíhy lešticího média na horní část segmentů by mohly mít tyto segmenty tendenci se rozjíždět do stran mimo stykovou plochu se spodní částí segmentů. Díky tomuto osazení je zajištěná poloha stykové plochy mezi horní a spodní částí segmentů. Tato optimalizace taktéž přispěje k celkové stabilitě přípravku během procesu leštění.

Vytvořené osazení

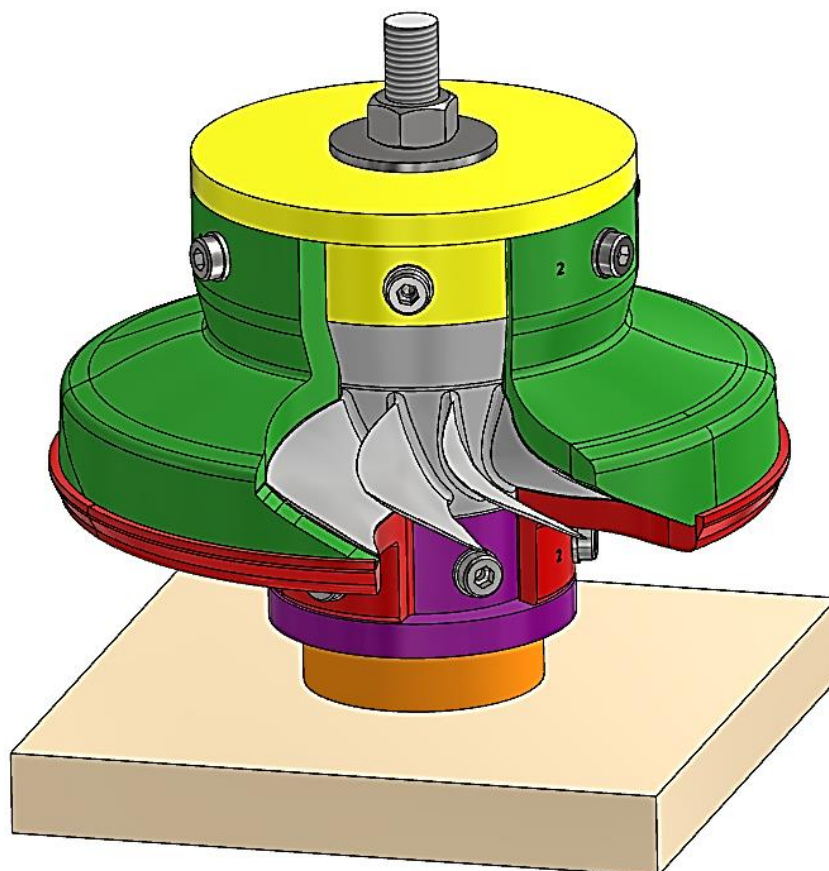


Obrázek 30 – Jedna část segmentu s vytvořeným osazením

Kompletní finální model sestavy přípravku po předchozích úpravách a optimalizacích lze vidět v řezu na obrázku 31 a v celku na obrázku 32.



Obrázek 31 – Finální model sestavy přípravku – v řezu



Obrázek 32 – Finální model sestavy přípravku

## 6. Výroba přípravku

Během celého navrhování přípravku se bral zřetel na výrobní profil ústavu. Všechny hlavní části přípravku jsou proto navrženy tak, aby je bylo možno vyrobit na dostupných strojích bez nutnosti použití externích zdrojů. Aby byla výroba ekonomicky a časově výhodná, volily se výrobní stroje a zařízení, které splní tyto podmínky.

Pro výrobu tvarových krycích segmentů, které tvoří jednu z hlavních částí přípravku, byla použita 3D tiskárna od firmy Stratasys, konkrétní typ tiskárny je F370. Jedná o 3D tiskárnu na tisk plastových dílců využitím metody FDM. 3D tiskárna musela být použita z důvodu tvarové složitosti segmentů, jejichž tvar se odvíjí od geometrie lopatek kola. Jinou technologií by bylo složité či časově a ekonomicky náročné tyto segmenty vyrobit. Přípravek dále obsahuje dva kryty válcového charakteru, které nejsou nijak tvarově složité, a proto se vyráběly na konvenčním hrotovém soustruhu.

Všechny použité nástroje a stroje během výroby přípravku jsou uvedené v tabulce 5 (použité nástroje) a tabulce 6 (použité stroje). Nastavovací kroužek, který je částí přípravku, se během výroby nevyráběl. Na ústavu se kroužek podobných rozměrů nacházel. Výroba tohoto kroužku by tedy byla krokem navíc. Nicméně v příloze 4 je uveden výkres původního navrženého kroužku. Výkresy všech součástí přípravku, včetně celé soustavy, jsou součástí přílohy této práce.





Tabulka 5 - Tabulka použitých nástrojů

<u>Označení nástroje</u>	<u>Obrázek nástroje</u>	<u>Popis nástroje</u>
M-42		<b>Pilový pás</b> Materiál – HSS DIN 1.3247 20x0,9 mm [21]
SV-1		<b>Středící vrták – tvar A-60°</b> Ø 2 mm Materiál: HSS ČSN 221110 [22]
V-1		<b>Vrták s kuželovou stopkou</b> Ø 17,5 mm Materiál: HSS ČSN 221140 / DIN 345 [23]
V-2		<b>Vrták s kuželovou stopkou</b> Ø 14 mm Materiál – HSS ČSN 221140 / DIN 345 [23]
V-3		<b>Vrták s kuželovou stopkou</b> Ø 10 mm Materiál – HSS ČSN 221140 / DIN 345 [23]



SN-1		<b>Soustružnický nůž – vnější</b> Tělo nástroje: SCACL 1616 H 09 VBD: CCMT 09T302E-FM [24]
SN-2		<b>Soustružnický nůž – vnější</b> Tělo nástroje: SWLCL 1616 H 06 VBD: WCMT 06T304E-FM [24]
F-1		<b>Univerzální fréza 3břítá</b> D = $\varnothing$ 20 mm L = 100 mm L1 = 38 mm Materiál: HSS [24]
S-1		<b>Najížděcí dotyková sonda pro frézku, vrtačku</b> L = 88 mm Průměr dotkových částí: 4 mm; 10 mm Měřicí přesnost: 0,005 mm [25]
V-COIL		<b>V-COIL Deluxe-Sada na opravu závitů M 5-12</b> Vrták: $\varnothing$ 8,3 mm Závitník: M8x1,25 Závitová vložka: M8x16 [26]
Z-1		<b>Závitník strojní do průchozí díry</b> M16x2 mm DIN 376 Materiál: HSS-E [27]
P		<b>AJAX dílenský plochý pilník PSO 250/1</b> Délka: 250 mm Sek: 0,5 Průřez: 25x6mm Hmotnost: 3,8kg [28]
DÚ		<b>DIGITÁLNÍ ÚCHYLKOMĚR – MITUTOYO, 543-500B</b> Měřicí rozsah: 0-12,7 mm Rozlišení: 0,001mm [29]

Tabulka 6 - Použité stroje k výrobě přípravku

Stroj	Obrázek stroje	Základní technická data:
<p><b>Pásová pila</b> OPTIsaw S 181 G</p>		<p><b>Řezná oblast 0°:</b> 180 mm  <b>Řezná oblast 0°:</b> 180 × 240 mm  <b>Řezná oblast +45°:</b> 110 mm  <b>Řezná oblast +45°:</b> 170 × 110 mm  <b>Rozměry pásu:</b> 2360×20×0,9 mm  <b>Rychlost pásu:</b> 45/65/77 m/min  <b>Příkon:</b> 750 W  <b>Elektrické připojení:</b> 400 V  <b>Rozměry (š × v × h):</b>                      1275 × 1100 × 450 mm  <b>Hmotnost:</b> 130 kg  <b>Výrobce:</b> BOW spol. s.r.o. [32]</p>
<p><b>Hrotový soustruh</b> SV 18 RA</p>		<p><b>Maximální délka soustružení:</b> 1000 mm  <b>Průměr soustružení nad ložem (max):</b> 380 mm  <b>Točný průměr nad suportem (max):</b> 215 mm  <b>Vrtání vřetena:</b> 41 mm  <b>Otáčky vřetena:</b> 14-2800 ot/min  <b>Kužel pinoly:</b> Mk4  <b>Příkon:</b> 6,5 kW  <b>Rozměry (d x š x v):</b> 2400 x 1000 x 1400  <b>Hmotnost:</b> cca 1800 kg  <b>Výrobce:</b> TOS-TRENCIN [33] [34]</p>
<p><b>Frézka nástrojářská</b> FNGJ 40</p>		<p><b>Upínací plocha stolu:</b> 800x400 mm  <b>Otáčky vřetena:</b> 63-3150 ot/min  <b>Příkon stroje:</b> 4 kW  <b>Pracovní podélný posuv X, Z, Y:</b>                      600x400x400 mm/min  <b>Rychloposuv X, Z, Y:</b>                      2000x2000x1000 mm/min  <b>Hmotnost:</b> 400 kg  <b>Rozměry (d x š x v):</b>                      1810x1975x1910  <b>Výrobce:</b> TOS Žebrák [35]</p>
<p><b>3D tiskárna</b> F370</p>		<p><b>Max. velikost modelu:</b> 355x254x355 mm  <b>Výška vrstvy:</b> 0,330; 0,254; 0,178; 0,127 mm  <b>Přesnost:</b> ±0,2 mm / ±0,002 mm/mm  <b>Stavební materiály:</b> PLA, ABS-M30, ASA, FDM TPU 92A, PC-ABS  <b>Podpůrný materiál:</b> QRS, PLA  <b>Rozměry:</b> 1626x864x711 mm  <b>Hmotnost:</b> 227 kg  <b>Výrobce:</b> Stratasys [13]</p>

### 6.1. Výroba válcových krytů

Výroba přípravku začala zhotovením dvou válcových krytů. Protože tyto části přípravku jsou válcového charakteru a nejsou nijak tvarově složité, jejich výroba probíhala na klasickém hrotovém soustruhu SV 18 RA. Výkresy součástí jsou v příloze práce.

### 6.1.1. Výroba spodního válcového krytu

První operací pro výrobu součásti bylo uřezání vhodného polotovaru na pásové pile na kov OPTIsaw S 181 G. Polotovar v našem případě má rozměry  $\varnothing 125 - 60$  ASTM D 6778, a jedná se o materiál POM – C. Tato operace je popsána v tabulce 7. Průběh operace 05 lze vidět na obrázku 33.

Tabulka 7 – Operace 05 – spodní válcový kryt

ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ Ú12134		<b>VÝROBNÍ POSTUP</b>			Počet listů: 4			
Součást: Spodní válcový kryt Číslo výkresu: 2020-00-00-01		Materiál druh: POM-C Rozměr: $\varnothing 125 - 60$ ASTM D 6778			Jméno: Bc. Filip Prečan			
Č. op	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt – popis práce	Nástroje	Řezné podmínky			
					$v_c$	$f$	$a_p$	$i$
05	OPTIsaw S 181 G	a b c	<p>Upnutí za <math>\varnothing 125</math> mm Uřezat na délku 60 mm Vyjmutí polotovaru</p>	M-42	50	-	-	1



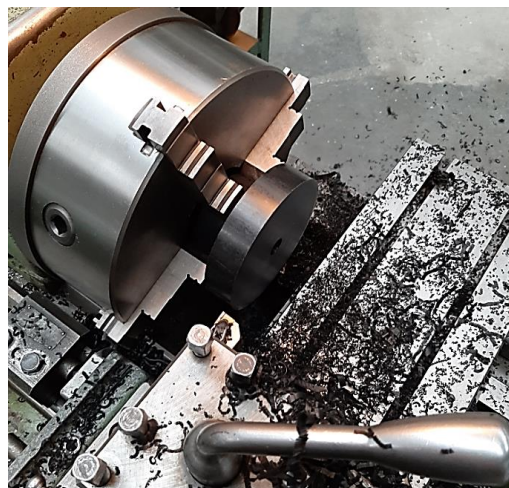
Obrázek 33 – Dělení polotovaru na pásové pile OPTIsaw S 181 G

Po první operaci 05 - dělení polotovaru, následovala operace 10, která je v tabulce 8. Polotovar se upnul do sklíčidla na soustruhu za  $\varnothing 125$  mm. Jako první proběhlo vyrovnaní nožů do osy soustruhu. Po vyvrtání průchozí díry následovalo zarovnání čela na požadovanou délku.

Poté se soustružily požadované průměry na jejich určené délky. Jako poslední se zhotovilo zkosení 45°. Na obrázku 34 je fotografie z průběhu soustružení dílu.

Tabulka 8 – Operace 10 – spodní válcový kryt

ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ U12134		<b>VÝROBNÍ POSTUP</b>			Počet listů: 4			
Součást: Spodní válcový kryt Číslo výkresu: 2020-00-00-01		Materiál druh: POM-C Rozměr: Ø125 – 60 ASTM D 6778			Jméno: Bc. Filip Prečan			
Č. op	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt – popis práce	Nástroje	Rezné podmínky			
					$v_c$	$f$	$a_p$	$i$
10	SV 18 RA							
		a	Upnutí do sklíčidla za Ø125 mm	SV-1				
		b	Vrtání – předvrtání středního dílku Ø2 mm	V-3	35	0,2	5	1
		c	Vrtání – předvrtání průchozí díry Ø10 mm	V-1	35	0,2	3,75	1
		d	Vrtání – vyvrtání průchozí díry Ø17,5 mm	SN-1	90	0,2	1,5	2
		e	Soustružení – srovnání čela na délku 57 mm	SN-1	80	0,2	2	13
		f	Soustružení – nahrubo - Ø125 mm na Ø73 mm v délce 44,37 mm	SN-1	90	0,1	0,6	1
		g	Soustružení – načisto - Ø73 mm na Ø71,79 mm v délce 44,37 mm	SN-1	80	0,2	2,5	7
		h	Soustružení – nahrubo - Ø71,79 mm na Ø36 mm v délce 15 mm	SN-1	90	0,1	0,9	1
		ch	Soustružení – načisto - Ø36 mm na Ø34,18 mm v délce 15 mm od čela	SN-2	90	0,1	1	3
		i	Soustružení – natočení nožové hlavy o 45° - Ø34,18 mm prodloužit na délku 18 mm na Ø64,85 mm					
		j	Vyjmutí obrobku					



Obrázek 34 – Průběh soustružení spodního válcového krytu

Následovala operace 15, kdy se obrobek na soustruhu přeupnul na druhou stranu, aby se mohl díl dokončit, co se z pohledu soustružení týče. Tato operace spočívá pouze v zarovnání čela na konečnou požadovanou délku celého dílu a zmenšení průměru  $\varnothing 125$  mm na požadovaný průměr  $\varnothing 91,5$  mm. Celá operace 15 je detailně popsána v tabulce 9.

Tabulka 9 - Operace 15 – spodní válcový kryt

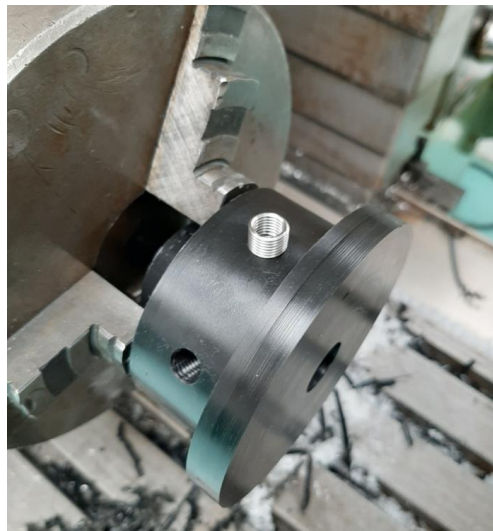
ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ Ů12134		<h1>VÝROBNÍ POSTUP</h1>			Počet listů: 4			
Součást: Spodní válcový kryt Číslo výkresu: 2020-00-00-01		Materiál druh: POM-C Rozměr: $\varnothing 125 - 60$ ASTM D 6778		Jméno: Bc. Filip Prečan				
Č. op	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt – popis práce	Nástroje	Řezné podmínky			
					$v_c$	$f$	$a_p$	$i$
15	SV 18 RA							
		a	Upnutí sklíčidla za $\varnothing 71,79$ mm					
		b	Soustružení – srovnání čela na délku 55 mm	SN-1	90	0,2	1	2
		c	Soustružení – nahrubo - $\varnothing 125$ mm na $\varnothing 93$ mm v délce 10,63 mm	SN-1	80	0,2	2	8
		d	Soustružení – načisto - $\varnothing 93$ mm na $\varnothing 91,5$ mm v délce 10,63 mm	SN-1	90	0,1	0,75	1
		e	Vyjmutí obrobku					

Poslední operace 20 u tohoto dílu již probíhala na jiném stroji – konkrétně na frézce FNGJ 40. Jedná se o vrtání děr  $\varnothing 8,3$  mm po  $60^\circ$  a řezání závitů z průměru. Díl se upnul do otočného stolu s děličkou. Poté se musela zajistit poloha nástroje vůči dílu pomocí dotykové sondy. Po zajištění polohy se nejdříve vyvrtaly díry podle výkresu. Podle návrhu šroubového spojení v kapitole 4.4 je hloubka děr  $\varnothing 8,3$  mm navržena na 20 mm. Během výroby se však díry vyvrtaly skrz díl, jak je znázorněno ve výrobním postupu v tabulce 10. Odpadlo tak odměřování hloubky děr. Na funkčnost dílu nemá tato změna hloubky díry žádný vliv. Následně se do těchto děr vyřezaly závity pomocí strojního závitníku. Posledním krokem bylo ruční vložení závitových vložek M8 o délce 2D do děr pomocí sady V-COIL Deluxe. Detailní popis operace je v tabulce 10. Na obrázku 35 je vyfotografováno vkládání závitové vložky do předem vyvrtané díry s vyřezaným závitěm.



Tabulka 10 - Operace 20 – spodní válcový kryt

ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ Ú12134		<h1>VÝROBNÍ POSTUP</h1>			Počet listů: 4			
Součást: Spodní válcový kryt Číslo výkresu: 2020-00-00-01		Materiál druh: POM-C Rozměr: Ø125 – 60 ASTM D 6778			Jméno: Bc. Filip Prečan			
Č. op	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt – popis práce	Nástroje	Řezné podmínky			
					$v_c$	$f$	$a_p$	$i$
20	Frézka FNGJ 40			S-1 V-COIL V-COIL V-COIL	35 10	0,2 -	4,15 -	6 -
		a	Upnutí do sklíčidla s děličkou za Ø34,18 mm					
		b	Nastavení polohy nástroje vůči součásti					
		c	Vrtání – vrtat díry 6x Ø8,3 mm po 60° skrz					
		d	Řezání závitů – řezat 6x závit strojním závitníkem					
		e	Vložkování – umístění 6x závitové vložky M8x16 do děr					
		f	Vyjmutí součásti					



Obrázek 35 - Vkládání závitové vložky

### 6.1.2. Výroba horního válcového krytu

Po vyrobení menšího válcového krytu se vyráběl větší válcový kryt. Tento díl je technologicky velmi podobný dílu předchozímu. Změna je zde v délce polotovaru – Ø125 – 50 ASTM D 6778, materiál POM – C. Výroba probíhala na stejných strojích a též i postup výroby je velice obdobný. Proto na následujících stránkách jsou uvedeny pouze výrobní postupy, popisující jednotlivé operace výroby součásti – tabulka 11, tabulka 12, tabulka 13 a tabulka 14.



Tabulka 11 - Operace 05 – horní válcový kryt

ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ Ú12134			<b>VÝROBNÍ POSTUP</b>		Počet listů: 4			
Součást: Horní válcový kryt Číslo výkresu: 2020-00-00-02			Materiál druh: POM-C Rozměr: Ø125 – 50 ASTM D 6778		Jméno: Bc. Filip Prečan			
Č. op	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt – popis práce	Nástroje	Řezné podmínky			
					v <sub>c</sub>	f	a <sub>p</sub>	i
05	OPTIsaw S 181 G		<p style="text-align: center;">                     a Upnutí za Ø125 mm                      b Uřezat na délku 50 mm                      c Vyjmutí polotovaru                 </p>	M-42	50	-	-	1

Tabulka 12 - Operace 10 – horní válcový kryt

ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ Ú12134			<b>VÝROBNÍ POSTUP</b>		Počet listů: 4			
Součást: Horní válcový kryt Číslo výkresu: 2020-00-00-02			Materiál druh: POM-C Rozměr: Ø125 – 50 ASTM D 6778		Jméno: Bc. Filip Prečan			
Č. op	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt – popis práce	Nástroje	Řezné podmínky			
					v <sub>c</sub>	f	a <sub>p</sub>	i
10	SV 18 RA		<p style="text-align: center;">                     a Upnutí do sklíčidla za Ø125 mm                      b Vrtání – předvrtání středícího důlku Ø 2 mm                      c Vrtání – předvrtání průchozí díry Ø10 mm                      d Vrtání – vyvrtání průchozí díry Ø17,5 mm                      e Soustružení – srovnání čela na délku 45 mm                      f Soustružení – nahrubo – Ø125 mm na Ø115 mm v délce 28,16 mm                      g Soustružení – načisto – Ø115 mm na Ø113,12 mm v délce 28,16 mm od čela                      h Soustružení – nahrubo – od středu na Ø103 mm v délce 3,66 mm od čela                      ch Soustružení – načisto – Ø103 mm na Ø104,9 mm v délce 3,66 mm od čela                      i Vyjmutí obrobku                 </p>	SV-1 V-3 V-1 SN-1 SN-1 SN-1 SN-1	35 35 90 80 90 80 90	0,2 0,2 0,2 0,2 0,1 0,2 0,1	5 3,75 2,5 1 0,94 1,83 0,95	1 1 2 5 1 2 1



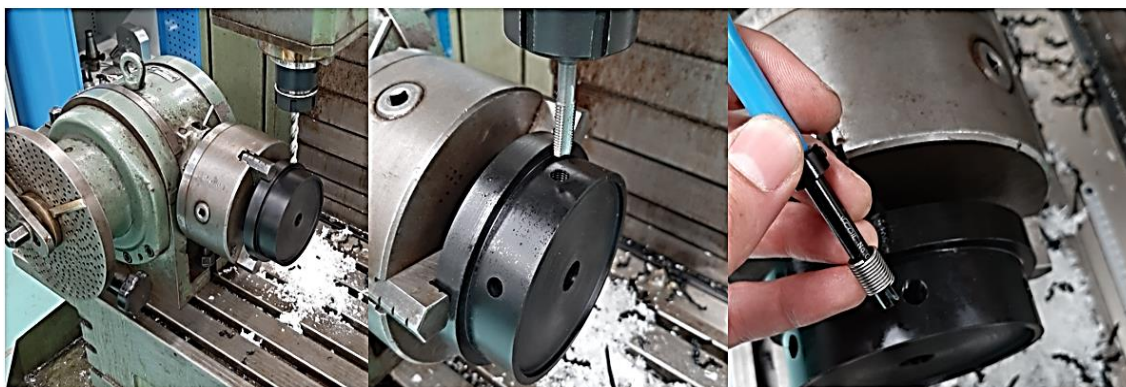
Tabulka 13 – Operace 15 – horní válcový kryt

ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ Ú12134			<b>VÝROBNÍ POSTUP</b>		Počet listů: 4			
Součást: Horní válcový kryt Číslo výkresu: 2020-00-00-02			Materiál druh: POM-C Rozměr: Ø125 – 50 ASTM D 6778		Jméno: Bc. Filip Prečan			
Č. op	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt – popis práce	Nástroje	Řezné podmínky			
					$v_c$	$f$	$a_p$	$i$
15	SV 18 RA							
		a	Upnutí do skličidla za Ø113,12 mm	SN-1	90	0,2	3,4	2
		b	Soustružení – srovnání čela na délku 38,16 mm	SN-1	90	0,1	0,5	1
		c	Soustružení – načisto – Ø125 mm na Ø124 mm v délce 10 mm					
		d	Vyjmutí obrobku					

Tabulka 14 – Operace 20 – horní válcový kryt

ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ Ú12134			<b>VÝROBNÍ POSTUP</b>		Počet listů: 4			
Součást: Horní válcový kryt Číslo výkresu: 2020-00-00-02			Materiál druh: POM-C Rozměr: Ø125 – 50 ASTM D 6778		Jméno: Bc. Filip Prečan			
Č. op	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt – popis práce	Nástroje	Řezné podmínky			
					$v_c$	$f$	$a_p$	$i$
20	Frézka FNGJ 40							
		a	Upnutí do skličidla s děličkou za Ø124 mm	S-1	35	0,2	4	6
		b	Nastavení polohy nástroje vůči součásti	V-COIL	10			
		c	Vrtání – vrtat díry 6x Ø8,3 mm po 60° skrz	V-COIL				
		d	Řezání závitů – fezat 6x závit strojním závitníkem	V-COIL				
		e	Vložkování – umístění 6x závitové vložky M8x16 do děr					
		f	Vyjmutí součásti					

U operace 15 (tabulka 13) si lze povšimnout, že průměr osazení se vyráběl na rozměr  $\varnothing 124$  mm, ačkoli na výkrese (příloha 2) je osazení o průměru  $\varnothing 133$  mm. Tato změna je dána velikostí polotovaru ( $\varnothing 125$  mm), který byl k dispozici. Osazení je tedy v tomto případě menší, než se původně navrhovalo. Změna velikosti není ale nijak dramatická a na funkčnost by tato změna neměla mít příliš velký vliv. Průběh výrobního postupu z tabulky 14 lze vidět na obrázku 36.



Obrázek 36 - Průběh operace 20

Stejně jako u výroby předchozího spodního válcového krytu i zde došlo k provrtání děr  $\varnothing 8,3$  mm skrze součást.

## 6.2. Výroba upínací desky

Další díl, který bylo potřeba zhotovit, byla upínací deska přípravku. Rozměry upínací desky jsou podle návrhu 200x200x25 mm. Protože škola takovým žádným vhodným polotovarem nedisponovala, polotovar se objednal u externí firmy Plechexpres s.r.o. Rozměry objednaného polotovaru byly 202x202x25 mm z oceli S235JR. Tato firma zpracovává plechy pomocí laseru. Povrch po laserovém řezání takovéto tloušťky nemusí být zcela rovný, proto jsou rozměry polotovaru zvětšeny o přídavek na obrábění 2 mm na 202x202x25 mm.

Deska po příchodu z externí firmy vykazovala drsný povrch. K odstranění nerovností povrchu se rozhodlo soustružit obě plochy o 0,5 mm. Rozměry finální desky se tak změny na 200x200x24 mm. Rovnější povrch upínací desky zajistí lepší podmínky upnutí na elektropermanentní magnetické desce ve stroji. Dále bylo potřeba do desky vyřezat závit M16 pro závitovou tyč. Řezání závitu proběhlo současně na hrotovém soustruhu. Celý postup práce na soustruhu je popsán v tabulce 15.

Tabulka 15 - Operace 05 - upínací deska

ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ Ú12134			<b>VÝROBNÍ POSTUP</b>		Počet listů: 2			
Součást: Upínací deska Číslo výkresu: 2020-00-00-03			Materiál druh: S235 Rozměr: 202x202x25 mm		Jméno: Bc. Filip Prečan			
Č. op	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt – popis práce	Nástroje	Řezné podmínky			
					$v_c$	$f$	$a_p$	$i$
05	SV 18 RA							
		a	Upnutí do sklíčidla s vnějšími čelistmi	DŮ				
		b	Vyrovnaní polotovaru	SN-1	70	0,1	0,5	1
		c	Soustružení – zarovnání čela v délce 0,5 mm					
		d	Vyjmutí polotovaru a jeho otočení					
		e	Upnutí do sklíčidla s vnějšími čelistmi	SN-1	70	0,1	0,5	1
		f	Soustružení – zarovnání čela v délce 0,5 mm					
		g	Vrtání – předvrtání středního důlku Ø 2 mm	SV-1				
		h	Vrtání – předvrtání díry Ø 10 mm	V-3	30	0,13	5	1
		ch	Vrtání – vyvrtání průchozí díry Ø14 mm	V-2	30	0,13	2	1
		i	Řezání závitu M16	Z-1	15			
		j	Vyjmutí obrobku					

Další operací bylo obrobení přídavek na obrábění a odstranění tak stop a nerovností po laserovém řezání materiálu. Tato operace probíhala již na jiném stroji, a to konkrétně na frézce FNGJ 40. Tento postup je popsán v tabulce 16. Na obrázku 37 je průběh frézování při výrobě.

Tabulka 16 - Operace 10 - upínací deska

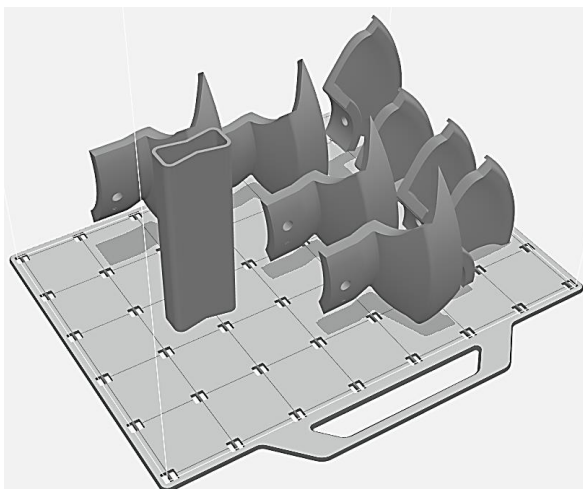
ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ Ú12134			<b>VÝROBNÍ POSTUP</b>		Počet listů: 2			
Součást: Upínací deska Číslo výkresu: 2020-00-00-03			Materiál druh: S235 Rozměr: 202x202x25 mm		Jméno: Bc. Filip Prečan			
Č. op	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt – popis práce	Nástroje	Řezné podmínky			
					$v_c$	$f$	$a_p$	$i$
10	Frézka FNGJ 40							
		a	Upnutí do strojního svěráku	F-1	80	0,75	1	1
		b	Frézování – z každé strany 1 mm – konečný rozměr 200 mm					
		c	Přepnutí obrobku o 90°					
		d	Frézování – z každé strany 1 mm – konečný rozměr 200 mm	F-1	80	0,75	1	1
		e	Vyjmutí obrobku					
15		a	Sražení hran - ručně	P				



Obrázek 37 – Odstraňování stop po laserovém řezání frézováním

### 6.3. Výroba krycích segmentů

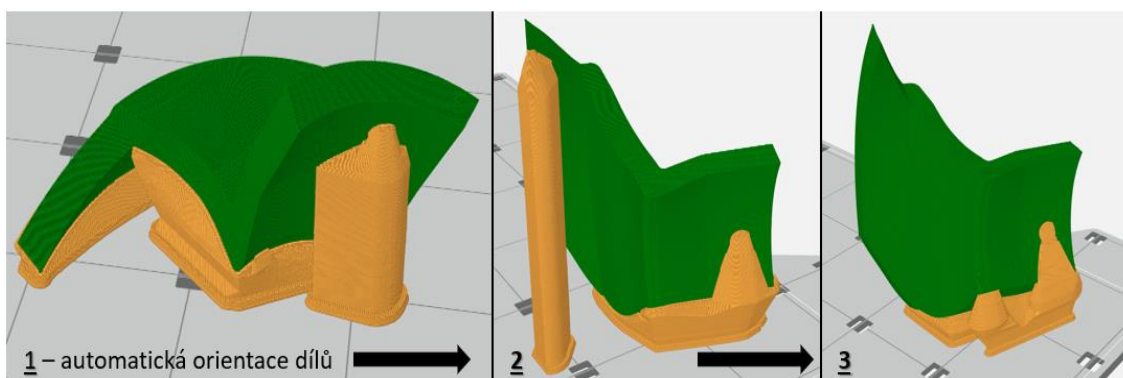
U krycích segmentů přípravku je důležité, aby jednotlivé segmenty přesně seděly a navazovaly na geometrii lopatek kola, z důvodu zabránění možného průniku leštícího média do krytých částí kola. Tato skutečnost dává segmentům jejich tvarovou složitost. Díky tomu by bylo takto tvarově složité segmenty obtížné nebo časově a ekonomicky náročnější vyrábět jinou technologií než technologií 3D tisku. Ústav disponuje 3D tiskárnou F370 od firmy Stratasys využívající metodu tisku FDM. Pro nastavení 3D tisku se využíval software GrabCAD print [30], který je kompatibilní s námi dostupnou 3D tiskárnou. Díly, které jsou určeny k vytisknutí, je potřeba do softwaru nahrát ve formátu .STP nebo .STEP. Jedná se o univerzální soubor obsahující trojrozměrná data. Všechny jednotlivé 3D modely segmentů bylo tedy potřeba převést z výchozích souborů Inventoru (.ipt) do formátu .STP. Nahrané modely se poté naskládaly na stavební desku tiskárny v prostředí softwaru. Tento krok lze vidět na obrázku 38.



Obrázek 38 - Modely segmentů v softwaru GrabCAD print

Na obrázku 38 si lze všimnout i čistícího komínu, který slouží pro čištění trysek po každé nanesené vrstvě materiálu, jak stavebního, tak i podpůrného.

Po nastavení umístění segmentů na stavební desce tiskárny následuje kontrola tisku vygenerováním průběhu tisku po jednotlivých vrstvách, včetně podpůrného materiálu. Zde je velmi důležitá orientace jednotlivých dílů vůči desce a samotného tisku. Závisí na tom jak mechanické vlastnosti dílů, tak i množství vytisknutých podpor dílů, a tím tedy v neposlední řadě i celkové náklady a čas tisku. Software má v nabídce automatické natočení a určení vhodné polohy dílu, ale ne vždy se jedná o tu zcela správnou a ekonomicky výhodnou volbu. Proto nastavení správného natočení dílů se provádělo ručně. Proběhlo několik variant natočení, kde se snažilo získat takovou polohu dílů, která obsahovala nejmenší množství stavebních podpor. Optimalizace natočení dílů je znázorněno na jedné části segmentu na obrázku 39, kde zelená část znázorňuje stavební materiál a oranžová část podpůrný materiál.



Obrázek 39 - Optimalizace natočení dílů pro 3D tisk

Jakmile je umístění a orientace dílů vyhovující, přichází na řadu nastavení parametrů samotného tisku. Pod toto nastavení spadá výběr jak hlavního stavebního materiálu, tak i podpůrného. Hlavní stavební materiál, jak už bylo výše v práci zmíněno, je ABS-M30 se zvýšenou pevností. Tloušťka jedné vrstvy byla nastavena na hodnotu 0,254 mm. Tato hodnota byla vybrána pro zkrácení výrobního času při zachování dostatečných detailů dílů. Podpůrný materiál je nastaven jako QSR. Jedná se o patentovaný rozpustný materiál vyvinutý přímo společností Stratasys. Díky svým adhezním vlastnostem je optimalizován přímo pro materiály typu ABS. [31] Poslední nastavení se týkalo vnitřní struktury vytisknutých dílů. Vybrána byla mřížka pod úhlem 45° o vysoké hustotě pro vysokou strukturální integritu. Plná výplň dílů by byla pro naše účely ekonomicky a časově náročná.

Čas tisku bylo cca 28 hodin. Po vytisknutí se segmentů bylo potřeba odstranit podpůrný materiál. Ten se odstraňoval mechanicky pomocí menších ručních nástrojů – kleště, šroubovák, lámací nůž. Vytisknuté segmenty po vytažení z 3D tiskárny jsou k vidění na obrázku 40.



Obrázek 40 - Vytisknuté krycí segmenty

#### 6.4. Montáž přípravku

Po výrobě všech částí přípravku bylo vše připraveno k smontování přípravku do jednoho celku. Veškerý spojovací materiál byl pořízen u prodejce spojovacího materiálu – Akros s.r.o. Spojovací materiál je vyroben z nerezového materiálu, kvůli zabránění možné kontaminaci lopatkového kola, které je vyrobené ze slitiny titanu. Seznam spojovacího materiálu a všech dílů přípravku jsou uvedené v kusovníku sestavy – tabulka 17.

Během montáže přípravku se zjistila vzniklá mezera mezi bokem lopatky kola a krycím segmentem. Tato mezera mohla vzniknout během procesu 3D tisku segmentů díky teplotním deformacím, které se mohou u této technologie vyskytovat. Vzniklá mezera je větších rozměrů než leštící měděná tělíska, která se používají během procesu leštění. Vniknutí těchto tělísek do prostor ostatních lopatek, které jsou kryty a nejsou určeny k leštění, je nežádoucí. Proto pro vyplnění této mezery bude za potřebí vždy před procesem mezery vytěsnit. V našem případě se jedná o nasazení plastové vložky na boční hranu lopatky kola, kterou lze vidět na obrázku 41.

Sestavený kompletní přípravek je zobrazen na obrázku 42 a 43.



Obrázek 41 - Vytěsnění vzniklé mezery





Obrázek 42 - Sestavený hotový přípravek - 1



Obrázek 43 - Sestavený hotový přípravek - 2



Tabulka 17 - Kusovník sestavy

Po- žka	Název		Č. výkresu - č. normy	Hmotnost [kg]		Množ- ství
	Polotovary			Materiál výchozí	Jednotka	
1	Lopátkové kolo		-	0,966	kg	1
			Ti-6Al-4V			
2	Krycí segment – spodní část – 3L		2020-00-00-05	0,096	kg	4
	Cívka		ABS-M30			
3	Krycí segment – spodní část – 4L		2020-00-00-06	0,128	kg	1
	Cívka		ABS-M30			
4	Krycí segment – horní část – 3L		2020-00-00-07	0,064	kg	4
	Cívka		ABS-M30			
5	Krycí segment – horní část – 4L		2020-00-00-08	0,085	kg	1
	Cívka		ABS-M30			
6	Horní válcový kryt		2020-00-00-02	0,615	kg	1
	Ø125 – 50 ASTM D 6778		POM-C			
7	Spodní válcový kryt		2020-00-00-01	0,287	kg	1
	Ø125 – 70 ASTM D 6778		POM-C			
8	Nastavovací kroužek		2020-00-00-04	0,040	kg	1
	Ø125 – 25 ASTM D 6778		POM-C			
9	Upínací deska		2020-00-00-03	7,185	kg	1
	-		S235JR (11 375)			
10	Závitová tyč M16x250 DIN 976-A2		-	0,400	kg	1
	Závitová tyč M16x1000 DIN 976-A2		-			
11	Šestihranná matice M16 DIN 934-A2		-	0,034	kg	2
	-		-			
12	Podložka s velkým vnějším průměrem DIN 9021-A2		-	0,012	kg	1
	-		-			
13	Vějířová podložka 16,5 DIN 6798A-A2		-	0,003	kg	1
	-		-			
14	Šroub s válcovou hlavou nízkou s vnitřním šestihranem M8x25 DIN 6912-A2		-	0,014	kg	12
	-		-			
15	Podložka 8 DIN 433-A2		-	0,002	kg	12
	-		-			
16						
17						
18						
19						
Index	Změna		Datum		Podpisy	
Vypracov.	Podpis	Datum	Podpis	Datum	Č. svitku:	
Skupinář	Bc. Filip Prečan				Mikrofilm	
Technol.					Sestava	
			Schválil		Hmotn. [kg]	
<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b>  <b>FAKULTA STROJNÍ</b>			NÁZEV: <b>PŘÍPRAVEK – LOPATKOVÉ KOLO</b>			
			ČÍSLO KUSOVNIKU: <b>2020-00-01-00</b>			

LIST:1/1

## **7. Ověření funkce**

Po dokončené výrobě a následné montáži zbývá ověření funkčnosti celého přípravku v leštícím stroji SPM LGP 1. Ověřením funkce se rozumí schopnost přípravku maskovat a chránit části lopatkového kola, které nejsou určeny pro leštění. Přípravek by měl také vydržet celý průběh leštícího procesu, kdy během procesu leštění bude na přípravek působit jak napětí způsobené tokem a samotnou tíhou leštících tělísek, tak i vzniklé teplo během leštění. Po dokončení procesu leštění by přípravek neměl vykazovat větší známky opotřebení či deformací.

V neposlední řadě se změří pro představu i konečná drsnost povrchu lopatek po procesu leštění.

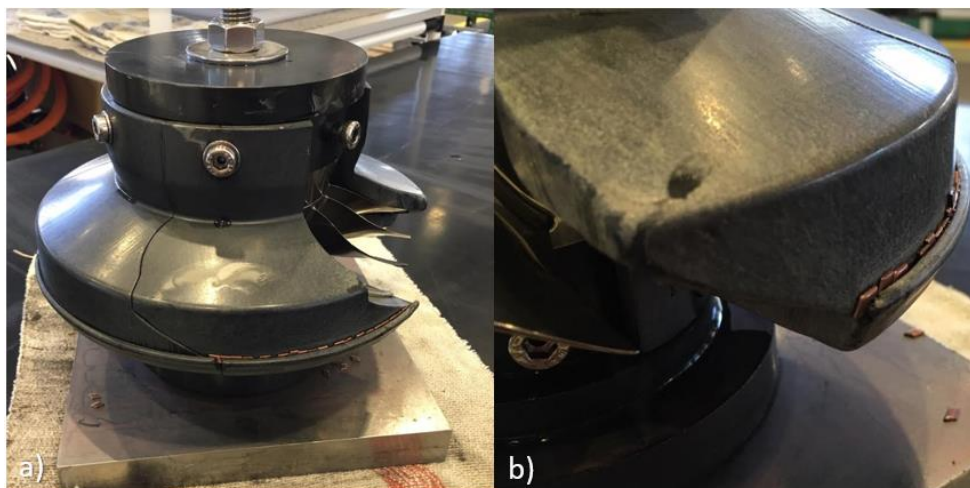
### **7.1. Proces leštění**

Po upnutí přípravku do pracovního prostoru stroje – viz obrázek 44, byl přípravek spolu s lopatkovým kolem zasypán měděnými tělísky. Následně se přidalo leštící médium, které obsahovalo korund ve formě jemného prášku a kapaliny pro vyjasnění a zvýšení viskozity leštící směsi. Přípravek byl ve finále vystaven ve stroji procesu leštění po dobu 2 hodin a 40 minut, kdy 2 hodiny probíhala část leštění a následujících 40 minut patřilo procesu vyjasnění leštěného povrchu.



*Obrázek 44 - Přípravek v pracovním prostoru stroje*

Po dokončení leštění a vytažení z pracovního prostoru přípravek nevykazoval žádné deformace či jiné viditelné poškození – viz obrázek 45 a).



Obrázek 45 – a) přípravek po procesu leštění b) detail na zachycené tělíska

Z obrázku 45 a) si lze všimnout zachycených tělísek mezi segmenty v dělicí rovině, konkrétně v místě mezi osazením spodního segmentu a vrchním segmentem – viz obrázek 45 b). Tyto tělíska zůstaly zachyceny pouze v tomto prostoru a nedostaly se přes dělicí rovinu dále do krytých prostor kola, proto tato skutečnost nijak neomezuje funkčnost přípravku.

Nicméně při následném demontování přípravku se zjistila přítomnost měděných tělísek v jedné z polovin kryté části kola. Na obrázku 46 je zachyceno demontování přípravku spolu s přítomnými tělisky mezi lopatky v jedné polovině kola.



Obrázek 46 - Demontování přípravku

Při bližším zkoumání důvodu přítomnosti tělísek v tomto problematickém místě se přišlo na vzniklé dvě větší mezery mezi spodními segmenty přípravku, které jsou vyznačeny na obrázku 47. Tyto mezery mohou být zapříčiněny možnými deformacemi dílů vzniklých během 3D tisku, které mohou být příčinou například nesprávného polohování dílů pro tisk. Aby se zabránilo vniknutí těchto tělísek do krytých prostor, bylo by potřeba tyto mezery vyplnit před dalším testovacím leštěním, například pomocí vhodného těsnění nebo těsnící pěny. Dalším možným způsobem odstranění mezer by mohlo být zvětšení děr pro šrouby a následného přitisknutí

segmentů k sobě při montáži a při dostatečném dotažení šroubů. Nicméně přítomnost tělísek v těchto prostorách nezpůsobila žádné značné defekty či změny povrchu u lopatek, které měly být před procesem leštění kryty a nedotčeny. Po vytěsnění těchto mezer se tedy dá říct, že přípravek je zcela funkční a splňuje požadavky pro vývoj parametrů leštění lopatkového kola.



Obrázek 47 - Mezery mezi segmenty

## 7.2. Měření drsnosti

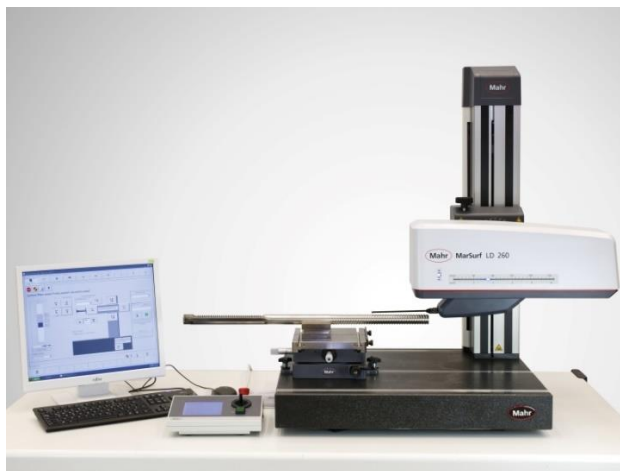
I přes výše popsané menší nedostatky přípravku se část lopatek, která byla určena k leštění, bezproblémově vyleštila. Vyleštěná část lopatek je vyfocena na obrázku 48. Proběhlo tedy měření drsnosti jak na leštěné, tak i neleštěné lopatky.



Obrázek 48 - Vyleštěná část lopatkového kola

Měření probíhalo na měřícím zařízení MarSurf LD 120 – viz obrázek 49. Jedná se o kombinovanou měřicí stanici pro měření kontury a drsnosti povrchu od firmy Mahr. Zařízení se skládá ze stolku, na který je upnutá měřená součást a ramena se snímacím hrotem, který se

konstantní rychlostí pohybuje po povrchu součásti a snímá tak nerovnosti povrchu. Zaznamenaná data následně zpracovává výpočetní technika, která je součástí zařízení.



Obrázek 49 - Přístroj pro měření kontur a povrchu Marsurf LD 120 [36]

Z časových důvodů však proběhlo vždy pouze jedno měření drsnosti. Jedná se tedy o čistě orientační měření, které slouží pouze pro srovnání povrchů před a po dokončovacím procesu. Z těchto výsledků nelze tedy vyvozovat žádné konečné závěry.

Před samotným měřením je nutné určit mezní vlnovou délku  $\lambda_c$ . Mezní vlnová délka označuje filtr, který je nutný pro rozdělení vln na kratší než  $\lambda_c$  a delší než  $\lambda_c$ . Kratší vlny nám pak znázorňují drsnost povrchu a delší vlny vlnitost povrchu. Mezní vlnová délka se určí tak, že se rozhodne, zda se jedná o periodický či aperiodický profil povrchu. V našem případě se jedná o frézovaný povrch, tedy periodický a leštěný povrch, který je aperiodický. Následuje odhad parametrů  $R_{sm}$ ,  $R_z$  a  $R_a$  podle tabulky 18 ISO 4288 a určení odpovídající hodnoty  $\lambda_c$ . V našem případě jsme zvolili hodnotu  $\lambda_c$  pro neleštěnou lopatku 0,8 a pro leštěnou 0,25.

Tabulka 18 – Volba mezní vlnové délky – ISO 4288 [37]

<u>Periodické profily</u>	<u>Aperiodické profily</u>		<u>Mezní vlnová délka</u> <u>(Cutoff)</u>	<u>Jednotlivá/celková</u> <u>měřící dráha</u>
$R_{sm}$ [mm]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\lambda_c$ [ $\mu\text{m}$ ]	$L_r/L_n$ [mm]
>0,013 do 0,04	do 0,1	do 0,02	0,08	0,08/0,4
>0,04 do 0,13	>0,1 do 0,5	0,02 do 0,1	0,25	0,25/1,25
>0,13 do 0,4	>0,5 do 10	>0,1 do 2	0,8	0,8/4
>0,4 do 1,3	>10 do 50	>2 do 10	2,5	2,5/12,5
>1,3 do 4	>50 do 200	>10 do 80	8	8/40

Následovalo nastavení měření a samotné měření drsnosti – viz obrázek 50. Nastavení parametrů pro měření jednotlivých lopatek jsou uvedeny v tabulkách 19 a 20.



Obrázek 50 - Měření drsnosti povrchu leštěné lopatky

Tabulka 19 - Nastavení parametrů měření pro frézovanou lopatku

Snímaná délka [mm]	5,60
Dílčí měřicí délky	5
Mezní vlnová délka $\lambda_c$ [mm]	0,8
Rychlost měření [mm/s]	0,1
Měřicí interval [ $\mu\text{m}$ ]	0,5

Tabulka 20 - Nastavení parametrů měření pro leštěnou lopatku

Snímaná délka [mm]	1,75
Dílčí měřicí délky	5
Mezní vlnová délka $\lambda_c$ [mm]	0,25
Rychlost měření [mm/s]	0,1
Měřicí interval [ $\mu\text{m}$ ]	0,5



Výsledky měření pro jednotlivé lopatky jsou v následujících tabulkách 21 a 22.

*Tabulka 21 - Výsledky měření pro frézovanou lopatku*

<b><u>Parametr drsnosti</u></b>	<b><u>Jednotka</u></b>	<b><u>Hodnota</u></b>
<b>Ra</b>	μm	0,405
<b>Rz</b>	μm	2,585
<b>Rmax</b>	μm	3,388
<b>Rv</b>	μm	1,291

*Tabulka 22 - Výsledky měření pro leštěnou lopatku*

<b><u>Parametr drsnosti</u></b>	<b><u>Jednotka</u></b>	<b><u>Hodnota</u></b>
<b>Ra</b>	μm	0,065
<b>Rz</b>	μm	0,511
<b>Rmax</b>	μm	0,625
<b>Rv</b>	μm	0,331



## **8. Závěr**

Cílem této práce bylo navrhnout a vyrobit krycí přípravek pro dokončování zadané součásti. Konkrétně jde o lopatkové kolo, které tvoří jeden ze stupňů kompresorové části leteckého motoru. Protože se jedná o prototypový přípravek, první část práce je věnována obecnému popisu prototypování. V této části je popsáno, co všechno toto odvětví v průmyslu obnáší, k čemu slouží a co je k němu potřeba. Následující část popisuje jednotlivé technologie aditivní výroby, které jsou pro výrobu prototypů v dnešní době nedílnou součástí. Popsány jsou i rozdíly mezi výrobou pomocí aditivní technologie a pomocí CNC obráběcích zařízení. Spolu s technologiemi jsou uvedené i základní pravidla pro navrhování součástí, které se vyrábějí pomocí aditivních technologií. V neposlední řadě jsou v práci zmíněny i technologie pro leštění těchto lopatkových kol a technologie stroje SPM LGP 1, který je výchozím leštícím strojem pro navrhovaný přípravek.

Další částí práce je rozbor a samotný návrh krycího přípravku. Jednalo se především o rozbor geometrie lopatkového kola, kde bylo potřeba navrhnout části přípravku, které budou sloužit jako hlavní krytí lopatkového kola. Jednalo se o návrh dvou válcových částí a jedné tvarové části pro krytí lopatek. Materiál těchto částí přípravku se zakládal na charakteru zadané součásti, dostupných polotovarů na ústavu a výrobních technologiích. Následovalo několik optimalizací návrhů jednotlivých částí, včetně rozdělení tvarové části přípravku pro krytí lopatek na jednotlivé segmenty a návrhu jejich spojení do jednoho celku. Pátá optimalizace byla finální a byla určena k výrobě. Dvě válcové části přípravku se vyráběly na hrotovém soustruhu a univerzální nástrojářské frézce. Tvarové segmenty byly zhotoveny pomocí 3D tiskárny technologií FDM.

Následovala montáž přípravku s lopatkovým kolem, kde se ověřila správnost návrhu a přesnost vyrobených částí. Po montáži byl přípravek spolu s lopatkovým kolem podroben testovacímu leštění, a to po dobu 2 hodin a 40 minut. Přípravek celý proces vydržel zkompletovaný bez deformací. Během demontování se však našly nedostatky v podobě mezer mezi spodními segmenty v jedné polovině přípravku. Tyto mezery umožnily vniknutí měděných tělísek do prostor, které měly zůstat kryty. Nicméně přítomnost tělísek v těchto prostorách nezpůsobila žádné značné defekty či změny povrchu u lopatek, které měly být před procesem leštění kryty a nedotčeny. Přesto pro další použití přípravku a předejití této skutečnosti by bylo nutné tyto mezery vytěsnit vhodným těsněním nebo těsnící pěnou. Další možná úprava pro odstranění mezer by mohla spočívat ve zvětšení děr pro šrouby u problémových segmentů a při



montáži segmenty tak k sobě více přitisknout. Po odstranění těchto mezer se tedy dá říct, že přípravek je zcela funkční a splňuje požadavky pro vývoj parametrů leštění lopatkového kola. Cíle této práce jsou tak splněny. Přípravek může sloužit pro výrazné snížení nákladů na dokončování prototypových dílů.

Protože přípravek i přes menší nedostatky s mezerami mezi segmenty splnil svoji funkci a určená část kola se během testování bezproblémově vyleštila, provedlo se pro porovnání měření drsnosti povrchu lopatky původní (frézované) a leštěné. Výsledky z měření jsou zaznamenány v tabulkách 21 a 22. Z výsledků lze vidět, že veškeré naměřené parametry drsnosti po dokončovacím procesu se výrazně snížily. Povrch tak lze považovat za jasně vyleštěný.

## 9. Použité zdroje

1. GIBSON, I., D. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Second edition. New York: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.
2. SHAHRUBUDIN, N., T.C. LEE a R. RAMLAN. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*. 2019, (35), 1286–1296. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
3. 3D tisk - MATCA. Matca [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/3d-tisk/>
4. What is 3D printing? The definitive guide | 3D Hubs. *3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/guides/3d-printing/>
5. Design rules for 3D printing poster [online]. In: . [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/get/3d-printing-design-rules/>
6. GUNAYDIN, K. a H.S. TÜRKMEN. Common FDM 3D Printing Defects [online]. (2018) [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/326146283\\_Common\\_FDM\\_3D\\_Printing\\_Defects](https://www.researchgate.net/publication/326146283_Common_FDM_3D_Printing_Defects)
7. JANOŠ, Miroslav a Ivan MRKVICA. Využití počítačové podpory při konstrukci přípravků. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2011, , 72 [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyuziti-pocitacove-podpory-pri-konstrukci-pripravku.html>
8. WANG, H., Y. RONG, H. LI a P. SHAU. Computer aided fixture design: Recent research and trends. *Computer-Aided Design*. 2010, **42**, 1085-1094. DOI: 10.1016/j.cad.2010.07.003. ISSN 0010-4485.
9. *Airfoil machine components polishing method*. Původci: Lorenzo BIANCHI, Lorenzo Lorenzi, Ferruccio PETRONI, Paolo MOLA. Patent. 2016. EU. EP3057738A1. Zapsáno 24.8.2016

10. KAPPIS, W. Compressors in gas turbine systems. *Modern Gas Turbine Systems*. 2013, s. 89-150. ISBN 978-1-84569-728-0.
11. GUO, W., Y. ZHU a X. HE. A Robotic Grinding Motion Planning Methodology for a Novel Automatic Seam Bead Grinding Robot Manipulator: Study of the Vibration Mechanism and Process Optimization for Abrasive Belt Grinding for a Blisk-Blade. *IEEE Access*. 2020, 8. ISSN 2169-3536.
12. LPG1 500/2310 MAG GLASS. *S.P.M. Mould Polishing System* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://www.spm-polish.com/products.php?id=5>
13. Stratasys F123 Series Printers. *Stratasys: 3D Printing* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/3d-printers/f123>
14. ABS-M30: A High Strength 3D Printing Material | Stratasys. *Stratasys: 3D Printing* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/materials/search/abs-m30>
15. *Characterization of material properties: Fortus ABS-M30*. Dostupné také z: [https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mds\\_fdm\\_abs-m30\\_a4\\_0320a.pdf](https://www.stratasys.com/-/media/files/material-spec-sheets/mds_fdm_abs-m30_a4_0320a.pdf)
16. POM-C - polyacetal kopolymer | TechPlasty. *TechPlasty - Technické Plasty | TechPlasty* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.techplasty.cz/material/pom/pom-c-polyacetal-kopolymer>
17. POM | AK Plast s.r.o. *Specialista v plastech a Váš partner pro dodávky plastových polotovarů a výrobků | AK Plast s.r.o.* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://www.akplast.cz/pom-l>
18. Materiálový list POM-C. In: *Specialista v plastech a Váš partner pro dodávky plastových polotovarů a výrobků | AK Plast s.r.o.* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: [http://www.akplast.cz/admin/files/ck/files/TechData/POM-C\\_mat\\_list.pdf](http://www.akplast.cz/admin/files/ck/files/TechData/POM-C_mat_list.pdf)
19. AUTODESK. *Autodesk® Inventor® Professional 2020 Education Edition*. [Software]. [Minimální požadavky na systém: 64-bit Microsoft® Windows® 7 SP1, CPU: 2.5 GHz nebo více, paměť: 8 GB RAM nebo více, místo na disku: 40 GB, grafická karta: 1 GB GPU a DirectX 11]].

20. LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
21. Pilový pás M42 UNIVERSAL. *Pilanametal - Výroba a prodej pilových pásů a pilových listů* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.pilanametal.cz/pilovy-pas-m42-universal.html>
22. Vrták 221110 HSS středící 60°- tvar A. Nářadí NAKOL s.r.o. [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: [https://www.nakol.cz/vrtak-221110-hss-stredici-60--tvar-a?p%5B21%5D%5Bf%5D%5B3%5D=18927&gclid=CjwKCAjwjLD4BRAiEiwAg5NBFmwcD1i1WBYEatgtnuHDQ2hagOVnQ9aw-C6P63EdaT4KBqoJxZvF1xoCTm4QAvD\\_BwE](https://www.nakol.cz/vrtak-221110-hss-stredici-60--tvar-a?p%5B21%5D%5Bf%5D%5B3%5D=18927&gclid=CjwKCAjwjLD4BRAiEiwAg5NBFmwcD1i1WBYEatgtnuHDQ2hagOVnQ9aw-C6P63EdaT4KBqoJxZvF1xoCTm4QAvD_BwE)
23. Vrták s kuželovou stopkou ČSN221140 HSS. *Vrtáky VRBOVSKÝ* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://vrtaky-vrbovsky.cz/vrtaky-do-kovu/vrtak-s-kuzelovou-stopkou-csn221140-hss>
24. ECatalog Pramet Tools s.r.o.: online katalog [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://ecat.pramet.com/>
25. Najížděcí dotyková sonda pro frézku, vrtačku - vizuální, Warco. *Prima Dilna - e-shop s nářadím, mazivy, soustruhy atd.* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.primadilna.cz/Najizdeci-dotykova-sonda-pro-frezku-vrtacku-vizualni-Warco-d2969.htm>
26. V-COIL Deluxe-Sada na opravu závitů M 5-12 - Závitníky a opravné sady - Závitorezy - Nipo Tools s.r.o. *NIPO - Nipo Tools s.r.o.* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.nipo.cz/sada-na-opravu-zavitu-v-coil-P2262/>
27. Závitník strojní M16,0x2,0mm do průchozí díry typ 3043 - 3500, lícování ISO 2 (6H), náběh C/4-6P, DIN376 | landsmann s.r.o. Landsmann s.r.o. [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.landsmann.cz/?cls=stoitem&stiid=8313>
28. AJAX dílenský plochý pilník PSO 250/1 28621121 2515 | NAKO Pardubice. Ruční nářadí, elektrické nářadí, aku nářadí a zahradní technika | NAKO Pardubice [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.nako.cz/8891-ajax-dilensky-plochy-pilnik-pso-2501-28621121-2515.html>
29. Kovonastroje - Digitální úchylkoměr 59/12,7 mm , 0,001mm Mitutoyo , 543-500B. Kovonastroje - ESHOP [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.kovonastroje.cz/Meridla-Mitutoyo/Uchylkomery->

indikatory/Digitalni/Digitalni-uchylkomer-59-12-7-mm-0-001mm-Mitutoyo-543-500B.html

30. STRATASYS. *GrabCAD print*. [Software]. [Minimální požadavky na systém: Microsoft® Windows® 10 a novější, paměť: 4 GB RAM, místo na disku: 2.5 GB, grafická karta: 512 MB GPU, CPU: 2-jádra nebo více].
31. Stratasys FDM Support Materials | Stratasys™ Support Center. *Stratasys: 3D Printing* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://support.stratasys.com/materials/fdm-materials/fdm-support-materials>
32. Pásová pila na kov OPTIsaw S 181 G - První hanácká BOW. Váš svět strojů - První hanácká BOW [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.bow.cz/produkt/3300182/pasova-pila-na-kov-optisaw-s-181-g>
33. Hrotový soustruh SV18 RA. Technologie strojního obrábění kovů a broušení nástrojů [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/hrotovy-soustruh-sv18-ra/>
34. Univerzální soustruh TOS - TRENCIN SV 18 RA. UniMachines - Bazar strojů [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://unimachines.cz/univerz%C3%A1ln%C3%AD-soustruh-tos--trencin-sv-18-ra-1974-4210.html>
35. Frézka TOS Žebrák FRÉZKA NÁSTROJAŘSKÁ. LIMETECH s.r.o. | Obráběcí a tvářecí stroje [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.limetech.cz/frezka-nastrojarska-fngj-40/2254>
36. MarSurf LD 130 / LD 260 - Mahr Metrology. Mahr Metrology [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://www.mahr.com.cn/en/Services/Production-metrology/Products/MarSurf---PC-Based-Roughness-Measuring-Units/MarSurf-LD-130---LD-260/>
37. MarSurf. Parametry drsnosti povrchu. In: Kalibrační laboratoř Zindler [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>

## 10. Seznam obrázků

Obrázek 1 - Základní schéma rapid prototypingu .....	9
Obrázek 2 - Závislost tloušťky vrstvy na konečném produktu – CAD model [1].....	10
Obrázek 3 - Převod CAD modelu do STL [1].....	11
Obrázek 4 - 8 základních kroků procesu aditivní výroby [1] .....	13
Obrázek 5 - Tryskání pojiva [3].....	14
Obrázek 6 – Technologie FDM [3].....	14
Obrázek 7 - Tryskání materiálu [3].....	15
Obrázek 8 – Technologie SLS [3] .....	15
Obrázek 9 – Technologie SLA [3].....	15
Obrázek 10 - Tvarově složité součásti vyrobené aditivními technologiemi [1] .....	17
Obrázek 11 - 3D model stavebnicového přípravku [7] .....	23
Obrázek 12 - Základní prvky procesu navrhování přípravku [8] .....	24
Obrázek 13 - Základní geometrické parametry lopatek [10] .....	25
Obrázek 14 - Leštění lopatek brusným pásem [11] .....	26
Obrázek 15 - Leštící stroj SPM LPG 1 [12] .....	28
Obrázek 16 – Zadaná součást – lopatkové kolo.....	29
Obrázek 17 - Zjednodušené znázornění krytí kola.....	30
Obrázek 18 – Orientace tisku zkušebního vzorku pro ABS-M30 [15] .....	31
Obrázek 19 – První zjednodušený CAD návrh.....	33
Obrázek 20 – Znázornění plánovaného šroubového spojení krycí obálky.....	34
Obrázek 21 – Výřez jednoho segmentu v krytu lopatek.....	35
Obrázek 22 – Model segmentu s označenými optimalizacemi .....	36
Obrázek 23 – Vyznačení problémové části segmentu .....	37



---

Obrázek 24 – Rozdělení segmentů do dvou částí .....	37
Obrázek 25 – Nákres poloh a velikostí děr se závitovými vložkami – menší válcový kryt .....	38
Obrázek 26 – Nákres poloh a velikostí děr se závitovými vložkami – větší válcový kryt .....	39
Obrázek 27 – Šroubové spojení segmentů k válcovým krytům v CAD modelu .....	39
Obrázek 28 – Šroubové spojení hlavní části přípravku s upínací deskou .....	40
Obrázek 29 – Optimalizované válcové části přípravku .....	41
Obrázek 30 – Jedna část segmentu s vytvořeným osazením .....	41
Obrázek 31 – Finální model sestavy přípravku – v řezu .....	42
Obrázek 32 – Finální model sestavy přípravku .....	42
Obrázek 33 – Dělení polotovaru na pásové pile OPTIsaw S 181 G .....	46
Obrázek 34 – Průběh soustružení spodního válcového krytu .....	47
Obrázek 35 - Vkládání závitové vložky .....	49
Obrázek 36 - Průběh operace 20 .....	52
Obrázek 37 – Odstraňování stop po laserovém řezání frézováním .....	54
Obrázek 38 - Modely segmentů v softwaru GrabCAD print .....	54
Obrázek 39 - Optimalizace natočení dílů pro 3D tisk .....	55
Obrázek 40 - Vytisknuté krycí segmenty .....	56
Obrázek 41 - Vytěsnění vzniklé mezery .....	56
Obrázek 42 - Sestavený hotový přípravek - 1 .....	57
Obrázek 43 - Sestavený hotový přípravek – 2 .....	57
Obrázek 44 - Přípravek v pracovním prostoru stroje .....	59
Obrázek 45 – a) přípravek po procesu leštění b) detail na zachycené tělíska .....	60
Obrázek 46 - Demontování přípravku .....	60
Obrázek 47 - Mezery mezi segmenty .....	61
Obrázek 48 - Vyleštěná část lopatkového kola .....	61

---





Obrázek 49 - Příklad pro měření kontur a povrchu Marsurf LD 120 [36] .....	62
Obrázek 50 - Měření drsnosti povrchu leštěné lopatky.....	63



## 11. Seznam tabulek

Tabulka 1 - Základní pravidla pro navrhování součástí pro aditivní výrobu – část 1 [5].....	19
Tabulka 2 - Základní pravidla pro navrhování součásti pro aditivní výrobu – část 2 [5].....	20
Tabulka 3 - Základní mechanické vlastnosti materiálu ABS-M30 [14, 15] .....	31
Tabulka 4 - Základní mechanické vlastnosti materiálu POM-C [18].....	32
Tabulka 5 - Tabulka použitých nástrojů .....	43
Tabulka 6 - Použité stroje k výrobě přípravku .....	45
Tabulka 7 – Operace 05 – spodní válcový kryt.....	46
Tabulka 8 – Operace 10 – spodní válcový kryt.....	47
Tabulka 9 - Operace 15 – spodní válcový kryt .....	48
Tabulka 10 - Operace 20 – spodní válcový kryti.....	49
Tabulka 11 - Operace 05 – horní válcový kryt.....	50
Tabulka 12 - Operace 10 – horní válcový kryt.....	50
Tabulka 13 - Operace 15 – horní válcový kryt.....	51
Tabulka 14 – Operace 20 – horní válcový kryt .....	51
Tabulka 15 - Operace 05 - upínací deska .....	53
Tabulka 16 - Operace 10 - upínací deska .....	53
Tabulka 17 - Kusovník sestavy.....	58
Tabulka 18 – Volba mezní vlnové délky – ISO 4288 [37] .....	62
Tabulka 19 - Nastavení parametrů měření pro frézovanou lopatku .....	63
Tabulka 20 - Nastavení parametrů měření pro leštěnou lopatku.....	63
Tabulka 21 - Výsledky měření pro frézovanou lopatku .....	64
Tabulka 22 - Výsledky měření pro leštěnou lopatku.....	64



## **12. Seznam příloh**

Příloha 1: Výkres spodní válcové části

Příloha 2: Výkres horní válcové části

Příloha 3: Výkres upínací desky

Příloha 4: Výkres nastavovacího kroužku

Příloha 5: Výkres krycího segmentu – 3L – spodní část

Příloha 6: Výkres krycího segmentu – 4L – spodní část

Příloha 7: Výkres krycího segmentu – 3L – horní část

Příloha 8: Výkres krycího segmentu – 4L – horní část

Příloha 9: Výkres sestavy