

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



NÁVRH A VÝROBA PŘÍPRAVKU PRO DOKONČOVÁNÍ
ROZVADĚČE TURBÍNY

DESIGN AND MANUFACTURING OF CLAMPING FIXTURE FOR GUIDE VANE
RING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor:

Bc. Jan Hušek

Vedoucí práce:

Ing. Zdeněk Pitrmuc

Studijní program:

Strojní inženýrství

Studijní obor:

Výrobní a materiálové inženýrství

Praha, 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hušek** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **459963**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací 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 rozvaděče turbíny

Název diplomové práce anglicky:

Design and manufacturing of clamping fixture for guide vane ring

Pokyny pro vypracování:

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

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:

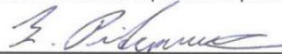
Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

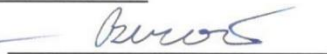
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____



Ing. Zdeněk Pitrmuc
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



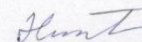
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

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 svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem podklady (literaturu, patenty, software a další) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne:

Podpis autora:

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Zdeňku Pitrmucovi, který mi poskytl cenné rady týkající se nejen technologické a konstrukční stránky této práce, ale i obecné strojírenské praxe, a který mi byl nápomocen zejména ve finální fázi výroby.

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá návrhem maskovacího přípravku určeného pro strojní leštění funkčních ploch lopatkového kola turbíny leteckého motoru, které je prováděno na leštícím stroji LPG1 od firmy SPM. Na základě tohoto konceptu byla realizována i samotná výroba zmíněného přípravku, která je popsána v praktické části této práce. Teoretická část práce je zaměřena na možnosti a metody technologií povrchových úprav omílání a leštění. V souvislosti s tím se práce dále zabývá výčtem nejvýznamnějších světových prodejců strojních zařízení pro dané technologie povrchových úprav.

Klíčová slova:

Leštění, metody omílání, přípravek, lopatkové kolo

Abstract:

This diploma thesis deals with design of clamping fixture for machine polishing of functional surfaces at the aircraft engine guide vane ring, which is done on the polishing machine LPG1 from SPM company. Based on this concept was realized mentioned fixture machining, which is described in practical part of this thesis. The theoretical part of this thesis is focused on possibilities and methods of tumbling and polishing as a surface treatment technology. In connection with the previous text is also listed the enumeration of the most significant global sellers of machines for these surface treatment technologies.

Key words:

Polishing, methods of tumbling, clamping fixture, guide vane ring



Obsah

1. Úvod.....	8
2. Omílání.....	9
2.1. Metody strojního mechanického omílání.....	10
2.1.1. Odstředivé.....	10
2.1.2. Vibrační.....	10
2.1.3. Vlečné.....	11
2.1.4. Proudové.....	12
2.2. Leštění.....	13
2.2.1. Elektrolytické leštění.....	13
3. Procesní vlivy na výslednou jakost povrchu.....	17
3.1. Složení procesního média.....	17
3.1.1. Omílací tělíska.....	17
3.1.2. Kompaundy.....	20
3.1.3. Leštící pasty a prášky.....	20
3.1.4. Flokulanty.....	21
3.2. Parametry omílacího procesu.....	21
3.2.1. Doba procesu.....	21
3.2.2. Rychlost relativního pohybu.....	21
3.2.3. Hloubka ponoření.....	22
3.2.1. Trajektorie pohybu.....	22
3.2.2. Orientace obrobku.....	22
3.3. Čištění a recyklace procesních médií.....	22
4. Přehled dostupných omílacích technologií.....	24
4.1. Walther Trowal.....	24
4.2. REM Surface Engineering.....	24
4.3. Rösler.....	27
4.4. MMP Technology.....	29
4.5. OTEC.....	30
4.6. SPM.....	32
4.6.1. Zařízení LPG1.....	32



5.	Prototypové přípravky	35
6.	Analýza úkolu	36
6.1.	Analýza součástí	37
6.2.	Analýza určené technologie SPM leštění	40
7.	Návrh přípravku	42
7.1.	První navrhovaná koncepce	42
7.2.	Druhá navrhovaná koncepce	49
8.	Výroba přípravku	53
8.1.	Využití strojní zařízení a nástroje	53
8.2.	Výrobní postupy komponentů	57
8.2.1.	Základna přípravku	57
8.2.2.	Svěrné příruby.....	59
8.2.3.	Komponenty z normalizovaných polotovarů.....	64
8.2.4.	Maskovací segmenty	65
8.3.	Montáž přípravku	68
9.	Aplikace do procesu strojního leštění.....	70
9.1.	Vyhodnocení	71
9.2.	Nutné úpravy a optimalizace	73
9.3.	Vyhodnocení po optimalizaci	78
10.	Závěr	82
11.	Použitá literatura	83
12.	Seznam obrázků	87
13.	Seznam tabulek.....	90
14.	Seznam příloh	91

1. Úvod

Dokončovací technologie jsou významnou součástí strojírenské výroby, které mnohdy zauímají pozici finální operace výrobního procesu. Jejich úkolem není pouze docílit konečné přesnosti rozměrů a tvarů daného obrobku, ale umožnit i požadované změny v mikrogeometrii povrchu. Na základě vybrané dokončovací metody lze také ovlivnit i povrchové vlastnosti a s tím i konečnou kvalitu povrchové vrstvy prostřednictvím velikosti a smyslu zbytkových pnutí. Pro dosažení těchto vlastností se obecně využívá mechanické, chemické, nebo elektrochemické cesty, případně i jejich kombinace. [1]

Jedním z hlavních parametrů, jehož konkrétní požadovaná hodnota určuje výběr možné dokončovací metody, je profil drsnosti. Velikost profilu drsnosti není jen otázkou estetických vlastností, ale je stěžejní z hlediska funkčních propozic dané součásti. V případě ploch obecného tvaru, jako je tomu například u povrchu turbínových, či kompresorových lopatek, kde se ani při výrobě pomocí moderních CNC obráběcích strojů zdaleka nedocílí požadovaných hodnot drsnosti, je třeba dbát zvýšené pozornosti při výběru dokončovací technologie v souvislosti s konečnými vlastnostmi a přesností. Profil drsnosti povrchu zde hraje významnou roli, neboť i minimální snížení velikosti mikroskopické nepřesnosti přispívá ke zvýšení účinnosti lopatkových kol, a tedy i k snížení ztrát vzniklých při průtoku vzduchu mezilopatkovým prostorem.

Jednou z technologií využívanou právě pro tyto aplikace je strojní leštění, které postupně stále více nahrazuje manuální metody tohoto procesu. Strojní leštění se prakticky odvíjí od metod strojního omílání, jakožto další z povrchových úprav, s hlavním rozdílem ve složení procesního média. Způsob pohybu procesního média je klíčový parametr pro dosažení požadované jakosti. Ideální směr toku leštících tělísek může při konkrétních metodách strojního leštění usnadnit právě aplikace upínacího přípravku, který umožní ustavení obráběné součásti v takové pozici, vzhledem k souřadnému systému stroje, aby došlo k rovnoměrnému opracování funkčních ploch daného dílce na předem stanovenou hodnotu drsnosti povrchu.

2. Omílání

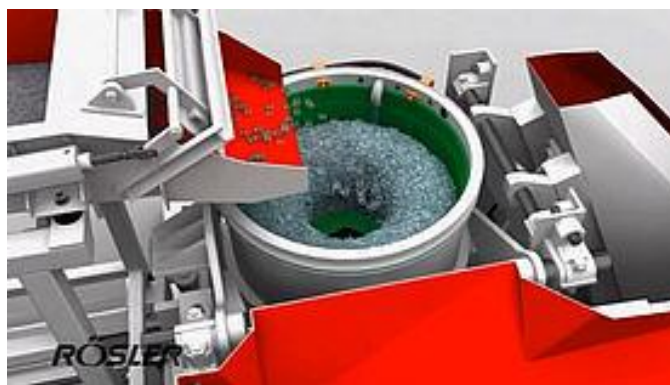
Omílání je technologický proces opracování povrchu součásti, založený na relativním třecím pohybu brusných tělísek, obsažených v procesním médiu, vůči obrobku. Jedná se o velmi produktivní dokončovací metodu, při které lze opracovávat větší množství obrobků současně, při takřka nulové zmetkovitosti. Na rozdíl od technologie broušení nejsou brusná zrna zformována do celistvého tvaru, například v podobě brusných kotoučů a pásů, ale jsou volně rozptýlena v pracovní nádobě. Tou je nejčastěji ocelový buben či žlab, opatřený polyuretanovou nebo pryžovou vložkou, který ve většině případů koná skrze pohon asynchronního nebo vibračního motoru hlavní pracovní pohyb. Procesní médium, které může být v závislosti na mnoha hlediscích různého složení, vyplňuje tuto pracovní nádobu, do které jsou následně obrobky ponořeny, nebo v opačném případě jsou součásti tímto médiem zasypany. [1, 2, 3]

Omílání jako takové je použitelné pro všechny druhy známých materiálů, jako jsou kovy a jejich slitiny, plasty, pryže, dřevo, drahé kameny, keramiky či sklo. Na základě materiálu, jehož povrch chceme zdokonalit, rozměrů dané součásti a její tvarové složitosti se pak odvíjí volba omílacího zařízení a vhodného procesního média v souvislosti s požadavky na finální jakost povrchu obrobku. Primární a nejčastěji využívané funkce této technologie jsou založené na mechanické podstatě. Jedná se zejména o hromadné odstraňování otřepů (odjehlování) u většího množství obrobků najednou, případně se zvětšují poloměry zaoblení hran, nebo lze povrch dané součásti vyhlazovat a zpevňovat. Současně je však tato technologie z části založena i na chemické podstatě, což umožňuje povrch součásti odmašťovat, vyjasňovat, anebo s použitím vhodného procesního média docílit i leštícího účinku, čímž se díky omílání postupně nahrazují finančně i časově náročné ruční metody leštění. Tento proces navíc dosahuje v porovnání s ručními metodami stejné jakosti povrchu, nebo v mnoha případech dosahuje dokonce i daleko lepších výsledků. Z toho tedy vyplývá, že pro dosažení výše uvedených procesů je důležité především správné složení procesního média, které působí na povrch součásti jak mechanicky (třením a abrazí), tak chemicky. [3, 4]

2.1. Metody strojního mechanického omílání

2.1.1. Odstředivé

K relativnímu pohybu média (granulátu) a obráběných součástí, které jsou společně volně rozptýleny v pracovním prostoru, dochází pomocí rotačního pohybu pracovní vany (bubnu). Díky rotaci tohoto bubnu dochází k odstředivým silám a ke společnému pohybu média a obrobků po toroidních drahách, jak lze vidět na obrázku 1, díky kterému dochází k intenzivnímu brusnému otěru. Metoda odstředivého omílání je vhodná především pro hrubé opracování většího množství dílů najednou. [2, 3]



Obr. 1: Ukázka odstředivého omílacího zařízení firmy Rösler [5]

2.1.2. Vibrační

Podobně jako u předchozí metody jsou i u vibračního omílání obráběné součásti volně rozptýleny v procesním médiu uvnitř pracovní nádoby, která může být ve tvaru rotačního bubnu, či žlabu. Daná pracovní nádoba je rozkmitána při určité frekvenci kmitů pomocí integrovaného vibračního zařízení. Médium se společně s obráběnými díly pohybuje uvnitř pracovního prostoru, přičemž dochází k vzájemnému brusnému účinku povrchů. Stejně jako u odstředivého omílání je použití této technologie vhodné pro větší množství obrobků současně. Nevýhodou vibrační technologie je její malý brusný výkon, který je asi 10x menší než předešlá metoda, což se projevuje například v intenzitě zaoblování hran a v procesu odjehlování. [2, 3]



Obr. 2: Ukázka žlabového vibrátoru firmy OTEC [2]

2.1.3. Vlečné

Vlečné omílání je využíváno pro velmi jemné broušení a leštění. Na rozdíl od výše uvedených metod odstředivého a vibračního omílání je obráběný materiál upnut ve speciálním držáku, pomocí kterého je s danou součástí manipulováno. Jelikož je pohyb omílaných dílů řízený, nemůže zde dojít k jejich vzájemnému kontaktu. Obráběné součásti jsou pomocí rotačních držáků ponořeny do procesního média, kde konají hlavní pracovní pohyb. Za současné rotace držáků a celého karuselu, jenž nese jednotlivé upínací přípravky, se tak docílí složeného planetového pohybu, který zaručuje stejné podmínky pro vedení jednotlivých obrobků. Během procesu dochází ke generování velkého měrného tlaku, který zapříčiní abrazivní úbytek materiálu na povrchu součástí. Vlečný způsob je z dosud známých technologií nejintenzivnější omílací metodou. Intenzita procesu je asi 4x vyšší než u odstředivé metody, a dokonce až 40x vyšší než u metody vibrační. Proces je ovlivněn řadou parametrů (podrobněji popisovaných níže v této části práce), které mají významnou roli na výslednou kvalitu povrchu. Mezi tyto parametry se řadí:

- materiál zvoleného média,
- doba a rychlost omílání,
- trajektorie dráhy,
- hloubka ponoření,
- orientace upínacího držáku v pracovní nádobě. [2, 3, 6]



Obr. 3: Ukázka vlečného omílacího zařízení firmy OTEC [2]

2.1.4. Proudové

Proudové omílání je zvláštním případem vlečného omílání. Na rozdíl od předchozí metody koná hlavní pracovní pohyb nádoba s procesním médiem. Ta rotuje kolem své osy, zatímco obráběný materiál, upnutý v mechanickém držáku, je do pohybujícího se média ponořen. Výsledný tlak procesního média na obráběný materiál je ovlivněn rychlostí rotace pracovní nádoby a s tím spojenou odstředivou silou tohoto média a hloubkou ponoření součásti do nádoby. Obráběný materiál uchycený v mechanickém držáku může konat vedlejší rotační pohyb a zpravidla bývá vnořen do pracovní vany pod různými úhly, v závislosti na tvarové složitosti daného dílu, pro dosažení rovnoměrného leštícího účinku v celé délce součásti. [2]



Obr. 4: Ukázka proudového omílacího zařízení firmy OTEC [7]

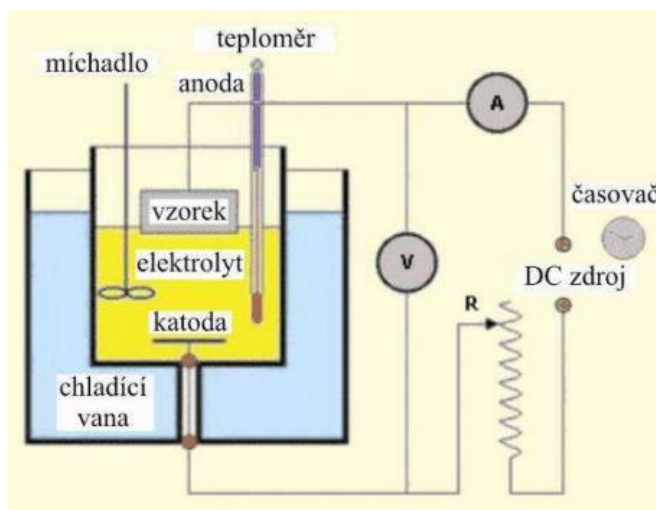
2.2. Leštění

Proces leštění je speciální případ technologie omílání, který se (v případě strojního leštění) v zásadě liší koncepcí a složením procesního média. Úběr materiálu je zde minimální, dochází pouze k vyhlazování povrchu a odstraňování stop po předešlých obráběcích operacích za účelem charakteristického lesku a čistoty povrchu. Nelze tedy změnit přesnost tvarů a rozměrů, ale odstraňují se pouze mikronerovnosti z hlediska profilu drsnosti povrchu. Pomocí leštění se dále také odstraňují různé nečistoty a případné povrchové vrstvičky oxidů ulpívající na povrchu součásti. [1]

Vedle strojního leštění je v praxi stále velmi uplatňováno ruční leštění, používané výhradně pro jednoduché díly v kusové výrobě, či ve výrobě prototypů. Jeho hlavní nevýhodou je zejména nerovnoměrnost a prakticky nekontrolovatelnost průběhu procesu. Nástrojem jsou nejčastěji lamelové kotouče a textilní pásy. Na povrch kotoučů je nanášena leštící pasta s přísadou jemných brusných tělísek, jejichž velikost (zrnitost) je závislá na leštěném materiálu a jeho požadované jakosti. Intenzita procesu a výsledná jakost povrchu se poté odvíjí od manuální zručnosti pracovníka. [1]

2.2.1. Elektrolytické leštění

Elektrolytické, nebo též elektrochemické leštění, je jednou z metod povrchových úprav, jenž je výhradně využívána pro elektricky vodivé materiály. Jejím principem je odebrání iontů z povrchu kovu účinkem procházejícího elektrického proudu v elektricky vodivém prostředí. Vedle minimalizace mikroskopické drsnosti povrchu materiálu a jeho vyhlazování docílíme rovněž znatelného odstraňování otřepů. Důležitým doprovodným efektem je pasivace povrchu leštěného materiálu, díky kterému nachází tato technologie uplatnění zvláště u korozi-vzdorných ocelí, kde se urychluje tvorba plnohodnotné pasivní vrstvy. Ta je tvořena oxidy legujících prvků, jenž kineticky zpomalují korozní děje. Podstata je ukryta v rozdílné rychlosti při oddělování jednotlivých složek oceli. Přednostně totiž při procesu dochází k odebrání atomů niklu a železa, čímž se povrchová vrstva obohacuje o atomy chromu, který je hlavním prvkem podporující korozi-vzdornost ocelí. [8, 9]

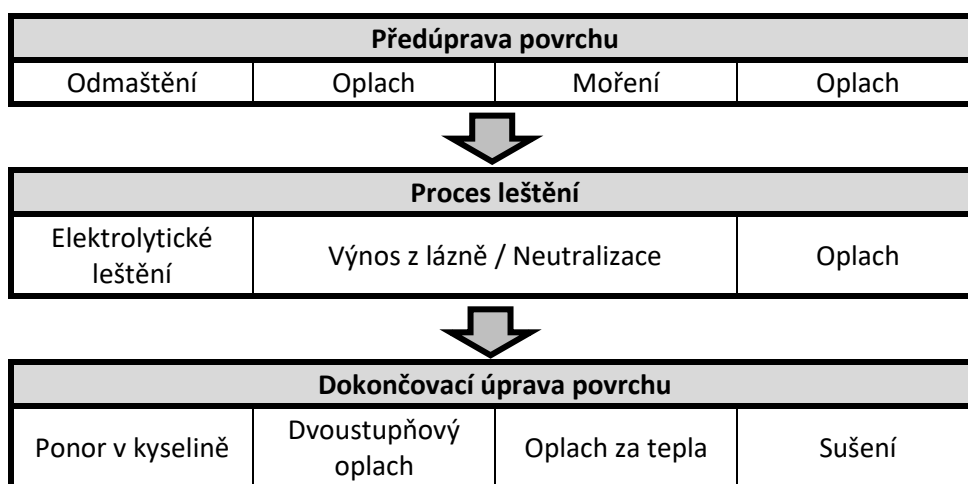


Obr. 5: Schéma principu elektrolytického leštění [10]

Jak samotný název napovídá, celý proces je založen na elektrolýze. Do pracovní vany, která je naplněná elektrolytem (vodivým roztokem kyselin) předem určeného složení, jsou ponořeny dvě elektrody zapojené na zdroj stejnosměrného nízkonapěťového proudu. Anodou, tedy elektrodou o kladném pólu, je zde součást určená k leštění, která je zavěšena na měděném, bronzovém, případně titanovém závěsu. Katodou, elektrodou o záporném pólu, je pak vhodný vodič, který bývá ve formě desek vyrobených nejčastěji z olova, nerozpustného v elektrolytu. V některých případech slouží jako katoda i samotná vana, naplněná elektrolytem. Při ponoření obou elektrod do elektrolytu je vytvořen uzavřený elektrický obvod stejnosměrného proudu a dochází tak k odebrání iontů kovu z povrchu materiálu. Elektrolytické leštění si lze tedy představit jako obrácený proces galvanického pokovování, kdy ionty kovu neulpívají na součásti za účelem tvorby povlaku, ale naopak se odtrhávají od anody a následně rozptýlí v roztoku. Část odtržených iontů ulpívá ve formě kalu u povrchu katody, kterou je třeba pravidelně čistit za účelem udržení účinnosti procesu. Množství odleptaného materiálu je závislé především na intenzitě procházejícího proudu, složení a teplotě příslušného elektrolytu a pracovním čase lešticího procesu, který zde bývá v řádech desítek minut (obvykle 5 až 40 min.). Velikost úběru materiálu anody je z určité míry ovlivněna i vzdáleností mezi elektrodami, jenž se určuje na základě tvaru dané součásti a způsobu jejího zavěšení v pracovní vaně. Stěžejním faktorem je však především zmíněná velikost proudové hustoty, která ovlivňuje potenciál leštěného materiálu. Při zvyšování proudové hustoty

totiž dochází k silnému vývoji kyslíku (v podobě bublinek), který posouvá tento potenciál mimo pasivní oblast. Tento jev má poté za následek snížení celkové kvality leštícího účinku. Nejvyšší intenzity procházejícího proudu se obecně dosahuje v místech s nejmenší tloušťkou, tedy nejčastěji různé výstupky na povrchu součásti, čímž se umožní odstraňování nežádoucích otřepů a vyhlazování povrchu. Hodnota proudové hustoty se v procesu leštění běžně pohybuje v rozmezí 5 až 100 A/dm². [8, 9]

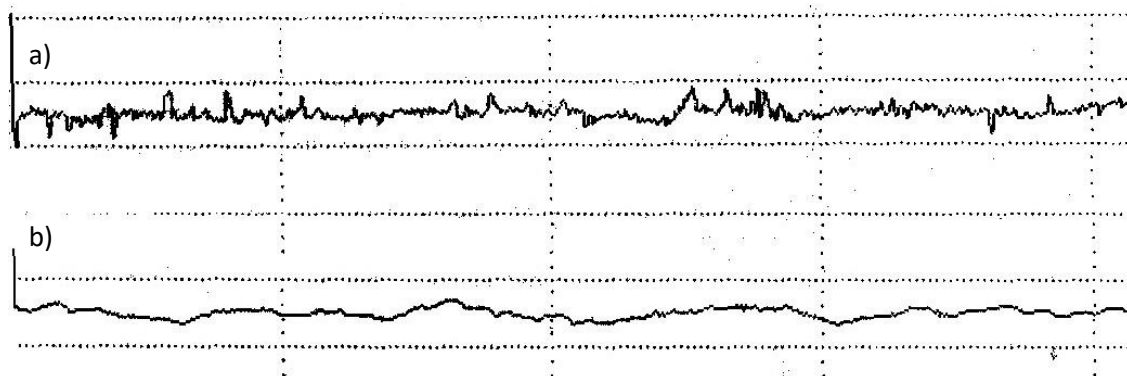
Samotná příprava procesu je však náročnější, neboť je vyžadována předúprava povrchu, spočívající v chemickém očištění, a následně také dokončovací úprava, která má za úkol odstranit zbytky elektrolytu a vedlejší produkty vzniklé při elektrochemické reakci. Schéma postupu celého procesu je znázorněno na obrázku 6. [8, 9]



Obr. 6: Schéma postupu při elektrolytickém leštění [8, 9]

Ačkoli není rozdíl mezi mechanickým a elektrolytickým leštěním na první pohled viditelný v souvislosti s jakostí opracovávaného povrchu součásti, při mikroskopickém zvětšení je již odlišnost těchto dvou metod patrná. U mechanicky leštěného povrchu lze pozorovat stopy plastické deformace povrchu způsobené třením od abrazivních omílacích tělísek, zatímco u elektrolyticky leštěného povrchu, vzniklého pouze na základě chemických reakcí, získáváme hladký povrch s charakteristickým vzorem. Na níže uvedeném obrázku je znázorněn rozdíl mechanicky a elektrochemicky opracovávaného povrchu korozivzdorné oceli, kde je rozdíl zcela patrný. Při první

z uvedených metod bylo dosaženo drsnosti Ra 0,26 μm , zatímco v případě druhém byla naměřena průměrná aritmetická odchylka Ra 0,19 μm . [8, 9]



**Obr. 7: Profilu drsnosti povrchu korozivzdorné oceli po leštění
a) mechanickém, b) elektrolytickém [9]**

Při elektrochemickém leštění nedochází tedy k žádným mechanickým, tepelným ani chemickým vlivům na opracovávanou součást, na rozdíl od mechanických metod leštění, které často vnášejí pnutí do povrchových vrstev materiálu a tím tak zhoršují jeho metalurgické vlastnosti. S tím souvisí i možnost použití této metody pro velmi malé součástky křehké povahy. [8, 9]

3. Procesní vlivy na výslednou jakost povrchu

3.1. Složení procesního média

Struktura a složení procesního média společně s volbou omílacího zařízení jsou založeny především na požadované výsledné kvalitě povrchu součásti. V souvislosti s požadavky na obrobenou plochu lze procesní média rozdělit na média pro omílání za mokra a za sucha. U mokrého omílání je médium tvořeno omílacími tělísky a kompaundy, které jsou společně smíchány v kapalně složce, kterou je nejčastěji voda. Hlavní funkcí a výhodou přítomné směsi kompaundu a kapalně složky je zde odplavování obroušených částic z leštěných ploch, čímž se zajistí maximální možný účinek procesu. Naproti tomu v případě omílání za sucha probíhá proces bez přítomnosti kapalně složky. Vzhledem k tomu, že proces probíhá za sucha, jsou při této metodě kladeny vysoké nároky na výkon odsávací jednotky. Omílací tělíska však mohou být v procesu doprovázena leštícími pastami (suspenzemi), nebo prášky. [11]

3.1.1. Omílací tělíska

Správný výběr omílacích tělísek zásadně ovlivňuje výslednou jakost povrchu dílce. Typ omílacích kamenů má rovněž vliv na rychlost a výkon celého procesu. Můžeme je rozdělovat dle tvaru, rozměrů a dle materiálu, z kterého jsou vyrobeny. Tvar tělísek je obvykle zvolen tak, aby byl schopný opracovat všechny požadované plochy a záhyby dané součásti. V případě rozměrů pak musíme při výběru dbát na to, aby nedošlo ke vzpříčení, či k uvíznutí tělíska v otvorech a dutinách daného dílce. Obecně jsou pro jemnější leštící účinek vhodná menší tělíska s nízkou měrnou hustotou a s ideálně zaoblenými tvary v podobě elipsoidů, koulí a válečků. Naproti tomu běžně dostupná tělíska tvaru trojbokého hranolu, hvězdic, jehlic a čtyřbokých jehlanů mají sice intenzivnější výkon, ale hrubší výbrus na povrchu součásti. Z materiálového hlediska je na trhu k dispozici několik skupin materiálů přírodního i umělého charakteru využívaných pro omílací tělíska, jejichž výčet je uveden níže. [11, 12]

- **Keramická tělíska**

Keramická omílací tělíska se využívají v procesu mokrého omílání. Jsou charakteristická svou vysokou tvrdostí a měrnou hustotou. S tím je spojená i vysoká hodnota výbrusu těchto tělísek. Vyskytují se v různém tvarovém uskupení s rozměry pohybujících se od 3 do 15 mm. Využívají se zejména pro kovové materiály a jejich slitiny. [11]



Obr. 8: Keramická tělíska tvaru tříbokého jehlanu [11]

- **Plastová tělíska**

Plastová omílací tělíska lze využít zejména pro omílání za mokra. Můžeme se však setkat i s polyuretanovými tělíska s přísadou SiC prášku využívané pro suchý proces. Vyznačují se vysokou hodnotou úběru za vzniku velmi jemného povrchu obráběného dílu. Vyrábějí se buď ve tvaru kuželů a čtyřbokých jehlanů s rozměry 6 až 15 mm pro mokré omílání, anebo ve tvaru kuliček a válečků s rozměry 0,4/2 mm až 0,8/5 mm v případě suchého omílání. Uplatnění nachází jak u tvrdých, tak u měkkých materiálů. V praxi se používají zejména pro neželezné a vzácné kovy. [11]



Obr. 9: Plastová tělíska (vlevo) a polyuretanová tělíska s povlakem SiC (vpravo) [11]

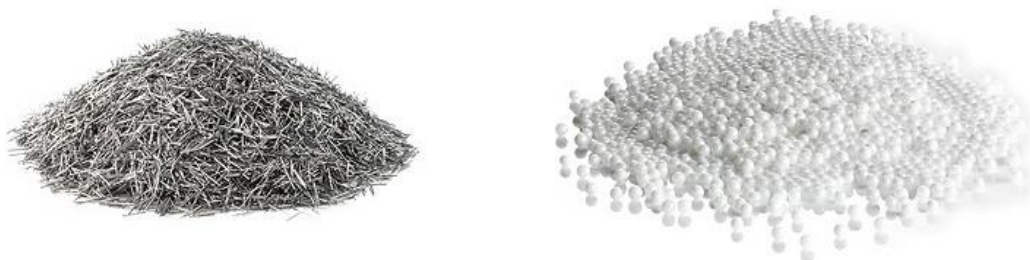
- **Kovová tělíska**

Tento druh tělísek nachází uplatnění při mokrému omílání. Při použití kovových tělísek je takřka nulový úbytek materiálu. Povrch součásti se pouze vyhlazuje a zhutňuje. Z tohoto důvodu jsou využívána pro dokončování součástí vyžadujících vysoký lesk. Tato tělíska

mají nejčastěji tvar jehlic a satelitů vyrobených převážně z korozivzdorné oceli. V praxi se uplatňují také pro tlakové odjehlování vzácných kovů. [11]

- **Zirkonová tělíska**

Zirkonová tělíska se vyrábějí ve tvaru kuliček s rozměry od 0,8 mm do 2,5 mm. Jsou velmi tvrdým a trvanlivým materiálem s vynikajícím leštícím účinkem. Jedná se o abrazivní složku procesního média pro mokrý proces omílání zejména vibrační metodou. [11]



Obr. 10: Jehlicovitá ocelová tělíska (vlevo) a zirkonové kuličky (vpravo) [11]

- **Granuláty z ořechových skořápek a kukuřice**

Tato přírodní tělíska jsou typická pro omílání za sucha. Obecně se vyznačují nižší životností v porovnání s například uměle vytvořenými materiály. Na trhu se můžeme často setkat s impregnovanými granuláty tohoto typu, kde nejsou zapotřebí v prvních třech až čtyřech dávkách (dle doporučení daného výrobce) žádné leštící pasty a prášky, jinak běžně přidávané do procesního média. Velikost média se pohybuje v případě kukuřičného granulátu v rozmezí 0,4 až 1,3 mm. U granulátu z drcených ořechových skořápek se velikosti pohybují od 0,2 mm do 6 mm. [11]



Obr. 11: Drcené ořechové skořápky (vlevo) a kukuřičný granulát (vpravo) [11]

- **Tělíska z umělého korundu**

Posledním zmíněným brusným médiem jsou tělíska z umělého korundu. Ta se používají pro suchý proces omílání, a to převážně k zaoblování hran nástrojů z rychlořezných ocelí. Velikost těchto tělísek mající geometricky obecný tvar se pohybuje v průměru od 0,5 mm do 3 mm. [11]



Obr. 12: Tělíska z umělého korundu [11]

3.1.2. Kompaundy

Jedná se převážně o kapalné chemické látky, avšak často se využívají i ve formě prášků. Kompaundy se smíchávají v určitém poměru s vodou a společně s omílacími tělíska tvoří procesní médium. Hlavním úkolem kompaundů je udržování čistoty povrchu součástí a omílacích tělísek a zajistit konstantní úroveň kvality celého procesu. Díky svému složení poskytují antikorozi ochranu omílaným součástím za vzniku pasivní vrstvy a zrychlují proces omílání. V případě dílců náchylných na vnější nárazové poškození chrání jejich povrch před nežádoucími účinky omílacích tělísek. Volba určitého typu kompaundu se volí na základě materiálu součástí. Z hlediska složení se v praxi můžeme setkat s kompaundy kyselého i zásaditého povahy. [11, 12, 13]

3.1.3. Leštící pasty a prášky

Leštící a brusné pasty se využívají zejména v procesu suchého omílání a leštění pro dosažení jemného leštícího účinku. Jedná se o homogenní polotuhé směsi abrasiv ucelených v tukovém pojivu, které se vnějšími tepelnými vlivy při procesu rozloží. Stejně jako kompaundy u mokrého procesu obsahují i tyto leštící pasty látky, nejčastěji oleje,

vytvářející antikorozi ochranu omílaného dílu. V případě prášků se oleje nebo tuky musí přidávat jako doprovodné látky, které umožňují dostatečné usazení daného prášku na omílacích tělíscích. [11, 14]

3.1.4. Flokulanty

Flokulanty jsou chemické látky kapalného nebo pevného stavu (v podobě prášku), které slouží zejména pro čištění a recyklaci procesního média. Jako takové oddělují oleje a pevné látky (abrazí odebrané částice z povrchu obrobku) od kapalně složky pomocí shlukování těchto částic do velkých aglomerátů, takzvaných vloček. Uskupení do těchto vloček pak umožňuje a urychluje filtraci nejčastěji pomocí odstředivé síly. Kapalně flokulanty se používají zejména v automatických recyklačních jednotkách. U malých omílacích zařízeních, kde probíhá dávkování ručně, se využívají spíše flokulanty práškové. [13, 15]

3.2. Parametry omílacího procesu

3.2.1. Doba procesu

Doba procesu omílání je závislá na tvarové složitosti a materiálu opracovávané součásti společně s volbou použitého procesního média a omílacího stroje. Celkový strojní čas procesu se tak může v závislosti na těchto podmínkách pohybovat v řádech desítek minut až po jednotky hodin.

3.2.2. Rychlost relativního pohybu

Rychlost relativního pohybu součásti a procesního média ovlivňuje ve velké míře rovnoměrnost a intenzitu úběru materiálu. V případě vysoké rychlosti pohybu se docílí vyššího abrazivního úběru v důsledku nárůstu přitlačného tlaku, ale naproti tomu nemusí dojít k opracování těžko dostupných míst, jako jsou například obecně zakřivené otvory, přechodové radiusy, či úzké drážky a dutiny. Snížením rychlosti omílání se naopak zvyšuje rovnoměrnost leštícího účinku na povrchu součásti, ale za cenu zvýšení strojního času. [3, 6]

3.2.3. Hloubka ponoření

Hloubka ponoření se volí na základě celkové hmotnosti omílacího média, které působí statickým tlakem na obráběnou součást. Obecně se s vyšší hloubkou ponoření docílí většího zaoblení náběžných hran součásti a vyššího leštícího účinku. [6]

3.2.1. Trajektorie pohybu

Dráha, po které se pohybuje součást, případně procesní médium, za současného vzájemného působení obou segmentů, se odvíjí od volby omílacího stroje. Zejména při vlečném omílání, využívající planetový pohyb omílaných součástí, je relativní pohyb média a obrobků rozdílný v závislosti na místě a času. Díky odlišným rychlostem pohybujícího se dílce v čase tak působí v každém místě pracovního prostoru rozdílný měrný tlak od procesního média. [3, 6]

3.2.2. Orientace obrobku

Orientace obrobku v pracovním prostoru stroje je dalším důležitým parametrem ovlivňující výslednou jakost. Natočení obrobku se provádí pro snadnější přístup média do problematických oblastí. Při natočení do předem definované roviny se docílí rovnoměrného proudění média po omílaných površích a zefektivní se tak celý proces.

3.3. Čištění a recyklace procesních médií

Čištění, případně recyklace procesního média je nedílnou součástí omílacího procesu. Zejména v případě mokrého procesu dochází během abrazivního působení tělísek na obráběný povrch součásti ke znečišťování vody, obsažené v procesním médiu, částicemi obrobeného materiálu. Mimo to dále dochází k její degradaci smícháním s přítomnými oleji. Toto znečištění kapalně složky je důležité řešit nejen z ekologického hlediska, v případě její likvidace, ale i z hlediska provozního, kdy míra znečištění negativně ovlivňuje intenzitu a strojní čas omílacího procesu. Nutnost čištění je důležitá i v případě brusných tělísek. Pevné částice rozptýlené ve vodě se mohou usazovat na omílacích tělískách a snižovat tak jejich abrazivní schopnost. Proto je důležité pravidelně filtrovat procesní médium pro zajištění konstantního výkonu. [3, 16]

Avšak ani filtrací není samozřejmě zaručena zcela dokonalá čistota procesního média. Zejména jemné částice odebraného materiálu z obrobku (rozptýlené v kapalně složce média) mohou být příčinou problémů pro další aplikace příslušného média. V případě omílání různých druhů materiálů totiž může při užití stejné procesní kapaliny dojít k lokální degradaci povrchu, která se nejčastěji jeví ve formě tenké vrstvy rzi. Typickým příkladem je omílání běžné konstrukční oceli. Pokud do stejného stroje následně aplikujeme součást z korozi-vzdorné oceli, dojde k přilnutí zmíněných částic k povrchu slitiny, čímž se porušuje její pasivní vrstva, která způsobuje v daných místech snížení korozní odolnosti slitiny. Pro zaručení dokonalé jakosti povrchu obrobku je tedy v ideálním případě zapotřebí, aby pro každou skupinu materiálů (běžné konstrukční oceli, slitiny titanu, korozi-vzdorné oceli a další) bylo využíváno vlastního omílacího zařízení s připojeným výměnným a filtračním okruhem příslušné procesní kapaliny. Z ekonomického hlediska je však toto řešení velmi náročné, proto se uplatní především v sériové a hromadné výrobě.

Samotné oddělení pevných částic od kapalně složky a omílacích tělísek probíhá uvnitř rotujícího odkalovacího bubnu, do kterého je médium automaticky odčerpáno z pracovního prostoru. Pomocí odstředivé síly se vytváří vrstva kalu, jenž je po zpětném odčerpání kapaliny odstraněna z odstředivky. To může být zabezpečeno buď automaticky, nebo ručně, prostřednictvím vyprázdnění odkalovací vložky. Pokud jsou částice nečistot menší než $1\ \mu\text{m}$, využívají se k čištění zmíněné flokulanty, práškové, nebo kapalně, které se přidávají do procesního média před zahájením procesu. [3, 16]

4. Přehled dostupných omílacích technologií

4.1. Walther Trowal

Firma Walther Trowal je německým výrobcem zaměřujícím se na omílací techniku, působící na trhu již přes 80 let. Vedle toho se zabývá i recyklační technikou procesních médií a zařízeními pro tryskání. Zde vyráběné stroje jsou vhodné pro automobilový, letecký, elektrotechnický a v poslední době i pro potravinářský průmysl. Seznam produktů tvoří především vibrační stroje, průchozí i uzavřené, ale i odstředivé omílací stroje a zařízení pro vlečné broušení.

V případě strojů pro recyklaci procesních kapalin, které jsou nedílnou součástí omílacích zařízení, se jedná o poloautomatické i plně automatické odstředivky. Ty jsou výjimečné zejména svou vysokou účinností, kdy je recyklován 98 % podíl vody v médiu a až 90 % podíl přítomných kompaundů. Použitý kompaund tedy zůstává z větší části zachován. V případě vyššího úbytku je, stejně jako voda ubývající odparem a ulpíváním na obrobcích, automaticky doplňován samostatnými dávkovacími stanicemi. Automatické odstředivky Walther Trowal obecně dokážou vyčistit 1 000 až 2 000 litrů procesní kapaliny za hodinu. [16]

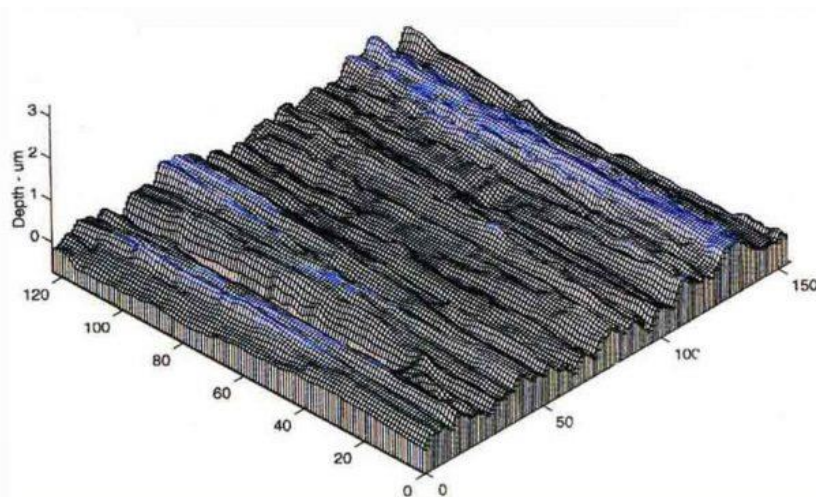
4.2. REM Surface Engineering

Firma REM, založena ve Spojených státech amerických roku 1965, se specializuje na výrobu technologických zařízení pro povrchovou úpravu kovových materiálů od běžných uhlíkových ocelí po korozivzdorné oceli, titanové a niklové slitiny a další. Uplatnění nacházejí stroje firmy REM takřka ve všech průmyslových odvětvích, jako je letecký a automobilový průmysl, aditivní výroba, farmacie, nebo energetický průmysl.

- **Isotropic Superfinish Process (ISF®)**

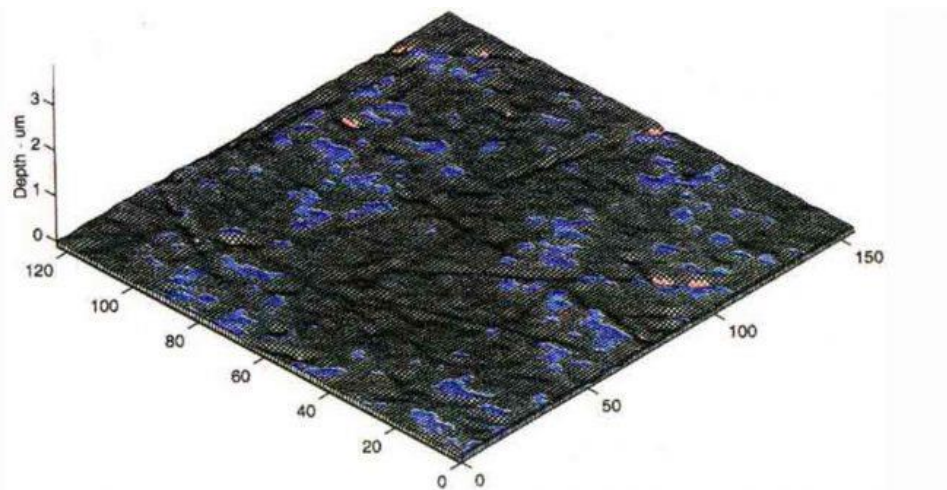
Proces ISF je patentovaná technologie firmy REM, založené na klasické metodě superfinišování, pomocí které lze získat velice přesné a lesklé povrchy obráběných součástí s velmi nízkými odchylkami profilu drsnosti. Hlavní výhodou procesu je dosažení

izotropie opracovávaného povrchu, což přispívá k snížení tření a opotřebovávání, a to rovnoměrně po celé ploše daného povrchu. Výsledkem je tedy jednotný povrch vykazující stejné vlastnosti v jakémkoli místě dané plochy. Na rozdíl od přesných dokončovacích technologií, jako je broušení, manuální leštění pomocí leštících pásků, honování, nebo klasická metoda superfinišování, nezanechává proces ISF žádné periodicky se opakující stopy na povrchu obráběné součásti. Tato nerovnoměrnost na mikroskopické úrovni je charakterizována opakujícími se vrcholky a prohlubněmi profilu drsnosti. Důvodem je předem stanovený směr pohybu brusných zrn pro odebrání mikrotřísek z povrchu součástí u všech výše zmíněných dokončovacích technologií, jednotlivě zanechávajících charakteristické stopy po nástroji. [17, 18, 19]



Obr. 13: Anizotropie povrchu součásti po technologii broušení [18]

Základ procesu ISF je tedy v generování dráhy nástroje, jinak řečeno směru toku procesního média. Pro vytvoření izotropního povrchu je nutné, aby dráha nástroje byla z hlediska směru čistě náhodná, ale takovým způsobem, aby se vytvořil rovnoměrně opracovaný rovinný povrch. Samotná technologie ISF se realizuje pomocí vibračních omílacích bubňů a van umožňujících požadovaný náhodný pohyb abraziva. Tyto vibrační nádoby mohou být přizpůsobeny pro hromadnou i kusovou výrobu v závislosti na typu a účelu obráběné součásti. V procesu se využívají omílací tělíska s vysokou měrnou hustotou v doprovodu s chemickými, ekologicky nezávadnými urychlovači. [17, 18, 19]



Obr. 14: Jakost povrchu po dokončovací technologii ISF s viditelnou izotropií [18]

- **Chemicky urychlené vibrační dokončování**

Firma REM na metodě ISF založila ještě další modifikaci technologie superfinišování, která využívá chemicky urychlené vibrační dokončování. Ta našla uplatnění zejména v oblasti průmyslových převodovek. Jelikož se jedná o chemickou metodu dokončování, je základ této metody ukryt v procesním médiu. Na rozdíl od základní metody ISF zde médium tvoří neabrazivní tělíska určitého tvaru a velikosti. Proces je opět prováděn ve vibračních zařízeních, jejichž pracovní prostor je vyplněn médiem, do něhož jsou poté obráběné součásti ponořeny. Do média je dále přidávána chemická sloučenina, vytvářející na povrchu obráběných součástí měkký konverzní povlak. Tento povlak je sice chemicky stabilní, ale neodolává mechanickým vlivům. Pomocí třecích sil neabrazivního média dochází k odstraňování tohoto povlaku, který se následně opět obnovuje, vlivem další chemické reakce povrchu součásti se sloučeninou. Opakováním těchto dějů tvorby a zániku povlaku dochází postupně k rovnovážnému stavu. Sloučenina, sloužící jako katalyzátor, snižuje energii potřebnou k odstranění materiálu z povrchu součásti, na úrovni mikronerovností, a umožňuje tak řídit rychlost vyhlazování daného povrchu. Touto metodou lze docílit rovnoměrného úběru materiálu při dosažení drsnosti povrchu s hodnotou menší než $R_a 0,1 \mu\text{m}$. V praxi se tohoto účinku hojně využívá například pro povrchovou úpravu profilu zubu evolventního ozubení. [18]

4.3. Rösler

Německá společnost Rösler, pracující v oboru již od roku 1933, tvoří skrze vlastnictví patnácti poboček napříč Evropou, Asií a Amerikou celosvětovou prodejní síť. Jedná se o výrobce technologií pro povrchové úpravy omíláním a tryskáním a čistících zařízení (průmyslové myčky). Vedle produkce samotných strojů pro povrchovou úpravu se specializuje i na výrobu a vývoj složek procesního média pro suché i mokré omílání, jako jsou keramická a plastová brusná tělíska, kompaundy a leštící a brusné pasty. Stejně jako u firmy REM je uplatnění technologií Rösler možné ve všech sektorech strojírenské výroby. Z hlediska produktů disponuje technologiemi založenými na odstředivé, vibrační a vlečné metodě omílání, využitelných pro celou řadu technických materiálů včetně nestandardních materiálů jako je dřevo, či kámen. Jednou ze specializací je povrchová úprava dílů vyráběných aditivní technologií. Zde se soustředí nejen na odstraňování pomocných a nosných prvků a zaoblování hran, ale i na vyhlazování a leštění povrchů do vysokého lesku pro jakékoli materiály používané v aditivní výrobě, ať už se jedná o plasty nebo různé slitiny kovů. [20]

- **Rösler Keramo-Finish®**

Velké zastoupení má firma Rösler i v leteckém průmyslu, pro který dodává omílací a tryskací stroje na povrchovou úpravu součástí turbín a jiných tvarově náročných dílů. A právě speciálně pro tyto aplikace byl vyvinut proces Keramo-Finish, umožňující opracování lopatek turbín, rotorů a statorů za zvýšení živostnosti a účinnosti těchto dílů a dosažení jemného povrchu na mikro úrovni. Zařízení je tvořeno rotačně-vibrační pracovní nádobou, do které je přiváděno speciální vysokohustotní médium s velmi nízkou abrazivností, označované pod firemním názvem Keramo-Finish-RP. Jedná se o porcelánová leštící tělíska s měrnou hmotností $2,91 \text{ g/cm}^3$. Tato tělíska jsou smíchána společně s leštící pastou a kompaundy. Porcelánová tělíska potažená leštící pastou poté působí během relativně pomalé rotace pracovní nádoby (ve srovnání s běžnou metodou odstředivého omílání) mírným tlakem na opracováváný povrch dílců, a to po přesně definované dobu. [21]

Pro většinu nadměrných součástí není třeba vždy využívat jen metod proudového a vlečného omílání. Rotačně-vibrační technologie firmy Rösler je tak jednou z dalších efektivních a v určitých konfiguracích i plně automatických metod pro opracování dílců s rozměry pohybujících se v rozmezí 300 až 1 900 mm do hmotnosti až 800 kg. [21]



Obr. 15: Leštění lopatek turbíny procesem Keramo-Finish [21]

- **Surf-Finisher**

Jednou z dalších technologií firmy Rösler využívanou pro opracování dílů z leteckého průmyslu je plně automatizované zařízení Surf-Finisher, založené na principu proudového omílání za mokra i za sucha. Speciální multiosé robotické rameno, nesoucí obráběnou součást, umožňuje cílenou manipulaci v rotujícím bubnu s procesním médiem pro dosažení maximální přesnosti leštěných ploch s dosahovanou drsností povrchu až Ra 0,04. Díky předem naprogramovanému pohybu tohoto ramena, který se odvíjí od geometrie součásti, lze navíc zamezit opracovávání nežádoucích ploch obrobku. [22]



Obr. 16: Zařízení Surf-Finisher využívané pro dokončování lopatkových kol [22]

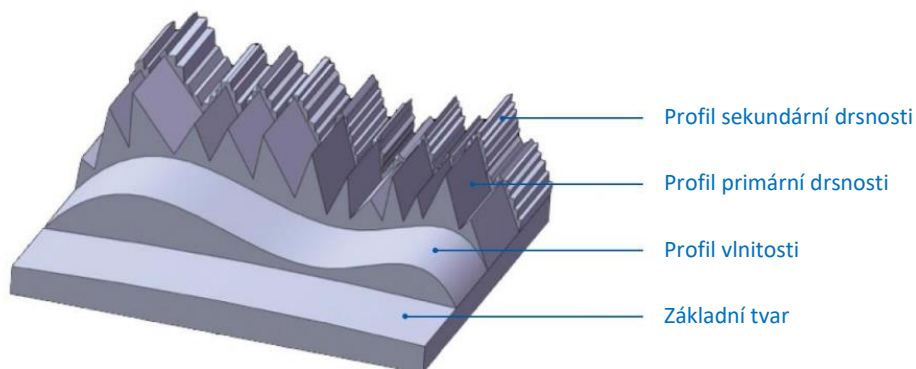
4.4. MMP Technology

Společnost MMP Technology je registrovanou firmou od roku 1995, založenou ve Spojených státech amerických, jenž patří mezi mladší poskytovatele služeb pro povrchové úpravy. Se svým patentem v podobě technologie strojního leštění MMP (Micro Machinig Process) dosahuje v mnoha ohledech bezkonkurenčnosti.

Technologie MMP je plně automatizovaná, mechanicko-fyzikální metoda strojního leštění. Je založená na selektivní filtraci nerovností mikroskopické úrovně, tedy v rámci profilu drsnosti povrchu, a je využitelná pro jakékoliv kovové materiály a jejich slitiny bez ohledu na jejich tvrdost a technologii předešlého zpracování (obrábění, kování, slévání, či aditivní výroba). Nedochozí zde k žádnému mechanickému ani chemickému narušení povrchu součástí. Proces je využíván obecně pro dvě aplikace. První je plně automatizované leštění (někdy též nazývané jako superleštění) umožňující dosáhnout stejných výsledků v rámci kvality povrchu i v takových oborech jako je například šperkařství, kde je dosud jinak stále využíváno manuální metody leštění. Druhou aplikací je pak vyjasňování povrchu součásti, kterou se generuje zcela nová topografie povrchu. [23, 24, 25]

Základem Micro Machining procesu je pečlivá studie povrchu obráběné součásti. Každý povrch obsahuje nerovnosti o určité mikroskopické velikosti skládající se z pravidelně, nebo nahodile se opakujících výstupků a prohlubní, které si lze představit jako soubor frekvenčních rozsahů o různých vlnových délkách. Velikost a charakter těchto nerovností jsou závislé na předchozím technologickém zpracování dané součásti. Obecně tyto zmíněné frekvence pak můžeme rozdělit do čtyř úrovní, ležících na povrchu součásti vrstveně nad sebou od největší po nejmenší. Základní (požadovaný) tvar součásti je ve skutečnosti zvlněn, což jsou nepřesnosti povrchu na úrovni dlouhých vlnových délek. Povrch jednotlivých vln je pokryt primárním profilem drsnosti povrchu. Ten je v porovnání s předchozí úrovní charakteristický ostrými výstupky, též nazývané jako peaky, a prohlubněmi, tvořícími povrchové nepřesnosti o vyšším frekvenčním rozsahu.

Poslední vrstvou je pak sekundární profil drsnosti, pokrývající povrch primárního profilu, vyznačující se nejkratšími vlnovými délkami. Jednotlivé úrovně profilu jsou znázorněny na níže uvedeném obrázku. [24, 25]



Obr. 17: Obecná analýza mikrogeometrie povrchu součásti [24]

Proces MMP je využitelný, stejně jako u většiny zde uvedených firem, v mnoha sektorech průmyslu, a to včetně zdravotních pomůcek. Jedním z hlavních zaměření firmy MMP jsou však dokončovací technologie pro kovové díly vyráběné 3D tiskem, obecně známými metodami SLM a DMLS. [23, 26]

4.5. OTEC

V Německu sídlící společnost OTEC Präzisionsfinish je další relativně mladou firmou v porovnání s ostatními, zde uvedenými zástupci vyrábějících dokončovací technologie. Stroje vyráběné touto firmou využívají všechny známé omílací metody od jednoduchých vibračních žlabů k odstředivým, proudovým a vlečným zařízením. Jednotlivé stroje jsou rozděleny do několika řad se specifickým firemním označením. Jednou z klíčových vlastností strojů firmy OTEC je hospodárnost. To dokazují stroje řady ECO-Maxi, disková odstředivá zařízení s magnetickým upínáním, která lze snadno přestavět z hlediska provedení pro suché, nebo mokré leštění dle potřeby uživatele. OTEC Präzisionsfinish vyrábí stroje s takřka neomezeným potenciálem. Nacházejí využití v celé řadě průmyslových oborů, jako je výroba řezných nástrojů, zdravotnická technika a farmacie, automobilový průmysl, aditivní výroba, šperkařství a další. Mimo uvedené aplikace strojů firmy OTEC se tato společnost v nemalé míře zaměřuje i na letecký průmysl.

Bezpečnost, a především spolehlivost ve všech etapách technologického zpracování dílů pro tento průmysl vedou k přísným požadavkům na povrchovou úpravu leštěním, která z těchto důvodů byla často realizována ručně případně poloautomaticky. Naproti tomu nekonstantní výsledky a finanční náročnost ručního leštění zavedly firmu OTEC k využití technologie proudového omílání pro vysoko nárokové díly leteckého průmyslu. [27]

- **Pulsfinish**

Jednou z inovativních technologií, kterou přinesla tato firma, je tak zvané pulzní omílání řady SF využívající nového technologického procesu Pulsfinish. Jedná se o modifikaci proudového omílání, které umožňuje dokonalé a přesné opracování extrémně citlivých obrobků. Stejně jako u klasické metody proudového omílání, lze současně opracovávat více součástí najednou (dle výrobce až pět). Výhoda spočívá v rychlosti relativního pohybu média a obrobků, která je vyvozena vysokými otáčkami sklíčidla uchycující daný obrobek. Velikost otáček upínacího prvku dosahuje hodnoty až 2 000 ot/min. Po relativně krátkém čase (v řádu jednotek minut) je sklíčidlo ihned zastaveno a následně roztočeno opačným směrem. Díky přítomným setrvačným silám dochází k opracování i těžko přístupných míst, která mohou být v případě použití hromadných omílacích zařízení nedostupná. Využití se nachází například u příčně vrtaných otvorů segmentů hydraulických mechanismů. Díky přesnému úběru, kterým lze dosáhnout drsnosti povrchu obráběné součásti o hodnotě Ra 0,01, je tato technologie dále využívána pro náročné součásti leteckého průmyslu. [28]



Obr. 18: Stroj řady Pulsfinish firmy OTEC Präzisionsfinish pro pulzní omílání [28]

4.6. SPM

Firma Mould Polishing System (SPM), sídlící v Itálii, je jedním z dalších předních světových výrobců strojního zařízení pro povrchové úpravy leštěním. Zaměřuje se především na sklářský průmysl, ale také na součásti z ropného a leteckého odvětví jako jsou zejména lopatková kola.

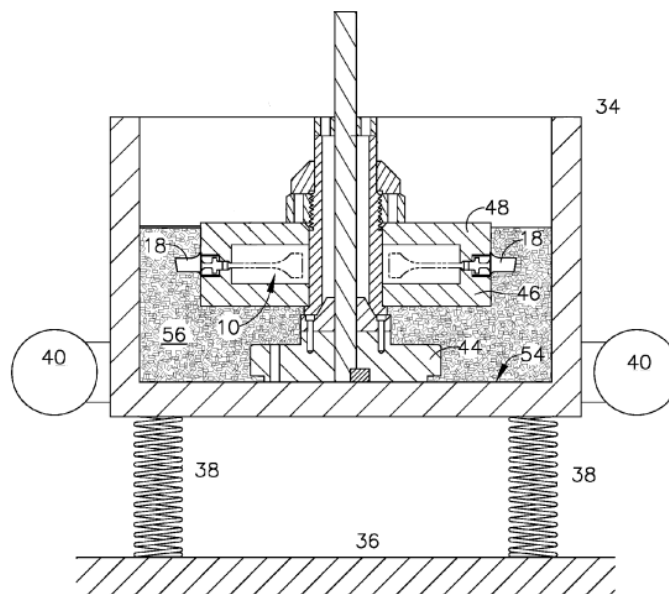
4.6.1. Zařízení LPG1

Zařízení LPG1 je jedním ze strojů firmy SPM určené pro technologii leštění za mokra s dosahovaným úběrem v řádech jednotek mikrometrů. Princip stroje je založený na speciální modifikaci vibračního omílání a používá se zejména pro leštění forem, určených pro výrobu součástí z technického skla, a komponentů z oceli, bronzu a dalších kovů. Následující odstavce budou detailněji zaměřeny na základní princip a parametry tohoto zařízení, z kterých bude posléze vycházeno v praktické části této práce. [29, 30]

Tab. 1: Technické parametry stroje LPG1 [29]

Parametr	Využitelné rozměry pracovního prostoru [mm]	Instalovaný výkon [kW]	Příkon stroje [kW]	Vzduchové připojení [bar]
Hodnota	448 x 448 x 350	16	1,1	6

Pracovní prostor stroje je umístěn v uzavíratelném těsnícím boxu (34) o rozměrech 500 x 500 x 600 mm. Obrobky se vkládají na dno tohoto boxu, které tvoří ocelová deska sloužící jako permanentní elektromagnet (54). Přes elektromagnetickou sílu jsou jednotlivé obrobky upnuty s předem stanovenou bezpečnou roztečí, čímž je zamezeno jejich vzájemnému kontaktu během procesu. Obrobky mohou být případně upnuty k základní desce skrze přípravek s upínací kovovou deskou (44), který umožňuje nastavení hloubky ponoření a natočení obrobků vzhledem k souřadnému systému stroje. Přípravky jsou zpravidla opatřeny maskováním (46, 48), které slouží k zakrytí vybraných částí obrobku (10), a tím se tak zamezí jejich kontaktu s brusnými členy procesního média. [29, 30]



Obr. 19: Schéma stroje LPG1 [30]

Před začátkem procesu jsou upnuté součásti zasypány procesním médiem (56), které vyplní pracovní prostor do určité výškové hladiny nad obrobky. Přívod i následný odvod média je u stroje LPG1 plně automatizován. Po zapnutí stroje dochází skrze pružné členy (38) k oscilaci pracovního boxu pomocí zdroje kmitů (40), čímž se docílí relativního pohybu média vůči nezakrytým místům maskovacího přípravku (18). Samotné médium je tvořeno zhruba 98 % kovovými pláty. Jsou to například drobné třísky z čisté mědi nebo zinku o tloušťce pohybující se v řádech desetin milimetru (v závislosti na rozměrech obrobku), jejichž účelem je rovnoměrné roznesení abrazivní složky po leštěných površích. Tyto kovové třísky jsou smíchány společně s kapalným médiem, které je složeno ze směsi vody, mýdla a antikorozičního prostředku. Zmíněná směs tvoří asi 2 % z celkového objemu procesního média. Samotné abrazivum je zastoupeno objemovým podílem okolo 0,05 %. Z hlediska množství a zrnitosti abraziva, které výrazně ovlivňuje intenzitu úběru, pak může být celý proces rozdělen na několik etap, zpravidla do dvou až tří, které se vzájemně liší převažujícími účinky procesního média daného složení na omílanou součást (hrubý brusný úběr, vyhlazování povrchu a vyjasňování, leštění a dolešťování). Kapalná složka procesního média slouží zejména k mazání kovových plátů, které se pak snáze smýkají a efektivněji tak rozvádí částice abraziva. Materiál abrazivní složky, kterým může být například korundový prášek, se pak volí v závislosti na

výše zmíněných faktorech. S ukončením procesu jsou opět veškeré složky procesního média automaticky odsáty z pracovního prostoru stroje skrze filtrační zařízení a přípravek s obrobkem je tak možné po vypnutí elektromagnetu odebrat. [30]



Obr. 20: Zobrazení stroje LPG1 (SPM) [29]

Délka procesu leštění je ovlivněna řadou faktorů, které již byly zmíněny v kapitole 3. Na základě rotačního pohybu pohonu stroje, který vyvolává vířivý proud abraziva točící se neustále ve smyčkách kolem leštěné součásti, bylo zjištěno, že pokud bude periodicky v čase měněn směr otáčení, docílí se tak mnohem přijatelnějších výsledků v podobě rovnoměrného úběru. Obecně se délka těchto intervalů doporučuje na 15 minut. Celková doba leštění se pak tedy skládá ze součtu střídajících se časových úseků, charakterizovaných směrem proudění média. [30]

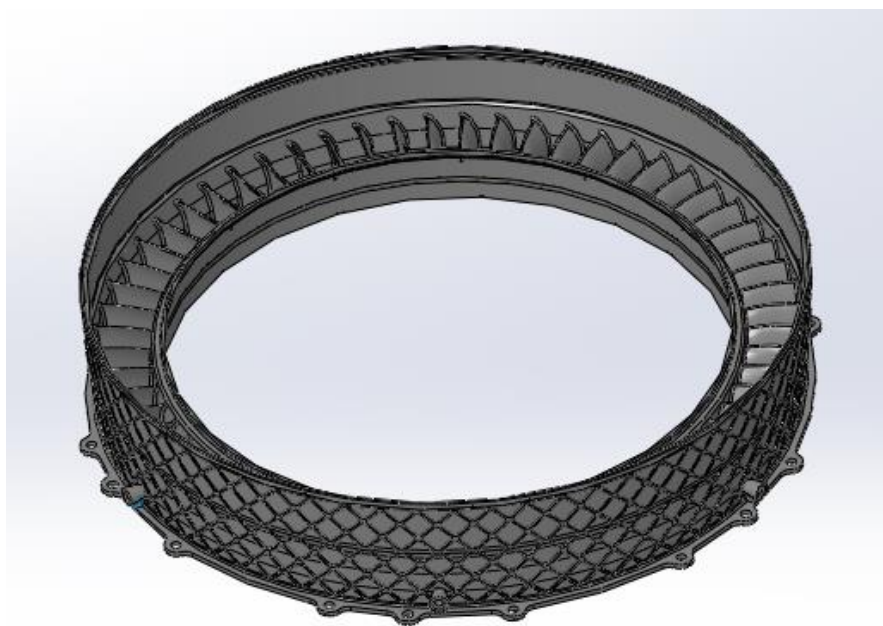
5. Prototypové přípravky

Přípravky jsou podstatnou součástí téměř všech úseků strojírenské výroby, jako je obrábění, svařování, dělení materiálu, ale třeba i metrologie nebo montáž. Primární činností přípravků je pevné a bezpečné ustavení součásti do požadované polohy, která je vztažena k danému strojnímu zařízení, případně jiné součásti, aby se co nejvíce usnadnila daná výrobní činnost. Jejich podstatou je tedy zvýšení efektivnosti a současně i přesnosti ustavení upevňovaných součástí, což má obrovský význam především v malosériové a hromadné výrobě. V závislosti na počtu vyráběných kusů se pak odvíjí i koncepce a konstrukce daného přípravku. V případě prototypových přípravků jsou z hlediska jejich výroby obecně dána určitá pravidla. Jelikož se praktická část této práce zabývá primárně tímto typem přípravků, bude při samotném návrhu konstrukce vycházeno z následujících poznatků. [31]

Prototypové přípravky lze označit za speciální jednoúčelové upínací zařízení, které slouží vždy k jedné konkrétní operaci, jenž má být provedena na jednom druhu tvarově a rozměrově specifické součásti, která je ve fázi určitého vývoje. Jednoúčelovost těchto výrobních pomůcek většinou předurčuje zamezení použitelnosti typizovaných dílů, které jsou komponentou tak zvaných stavebnicových přípravků. Jelikož je v prvotní fázi vývoje ekonomicky nulová návratnost za náklady použité pro jejich výrobu a dále také vzhledem k riziku, že vývoj daného prototypu, pro který je přípravek vyráběn, může být ukončen, jsou v tomto procesu využívány především standardizované součásti a polotovary. Ze stejného důvodu je i ovlivněn výběr použitého výrobního zařízení, kde je využíváno především konvenčních obráběcích strojů s malými provozními náklady. Časově nejméně náročné a v současné době nejpoužívanější technologie, využívané při zhotovování prototypů, jsou však aditivní metody výroby, známé v této souvislosti pod souhrnným názvem Rapid Prototyping. Díky technologii 3D tisku tak lze ekonomicky nenáročnou cestou vytvořit i tvarově náročné dílce, díky kterým pak lze urychlit vývoj daných prototypů. [31]

6. Analýza úkolu

Cílem praktické části diplomové práce je kompletní návrh maskovacího přípravku pro strojní leštění lopatek prototypu rozváděcího kola turbíny leteckého motoru, dále jen rozvaděč. Na základě návrhu, obnášejícího konstrukci 3D modelu přípravku prostřednictvím CAD softwaru, a komplexní technické dokumentace je dalším stěžejním úkolem výroba tohoto přípravku a jeho aplikace do procesu strojního leštění s použitím technologie SPM, popsané v teoretické části práce.



Obr. 21: CAD model turbínového rozvodového kola

Základní idea je taková, že samotné maskování přípravku bude rozděleno do několika stejně velikých segmentů, které musí zcela zakrýt a utěsnit vyhrazené mezilopátkové prostory (kanály). Zároveň však musí být tyto segmenty konstrukčně navrženy tak, aby umožnily plynulé proudění procesního média po leštěných plochách lopatek. Vzhledem k tomu, že se jedná o prototyp vyráběný aditivní technologií 3D tisku, je hlavním problémem relativně vysoká hodnota drsnosti povrchu tohoto dílu, ve srovnání s běžně užívanou technologií třískového obrábění na CNC strojích. Hlavním cílem bude tedy postupné odkrývání maskovacích segmentů, přičemž budou následně aplikovány různé omílací technologie s konkrétními, postupně se měnícími pracovními parametry.

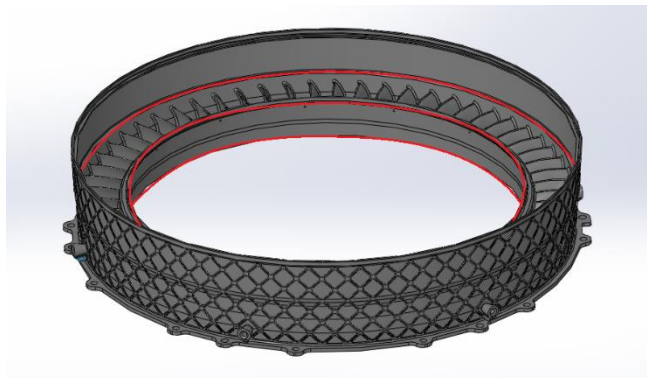
Porovnání výsledků těchto technologií pak umožní stanovit nejvýhodnější proces pro dokončování povrchu lopatek. Jejich výsledná hodnota drsnosti by se měla pohybovat na úrovni $Ra\ 0,1\ \mu\text{m}$, a to rovnoměrně po celé ploše. Drsnost povrchu lopatek je obecně vzhledem k efektivnímu proudění vzduchu a spalin velmi důležitá a má veliký vliv na účinnost. Cílem této práce však nebude aplikace jednotlivých omílacích technologií a jejich vyhodnocení, ale pouze případné odzkoušení přípravku v předem určeném stroji LPG1 za účelem potvrzení jeho funkčnosti.

6.1. Analýza součásti

Turbovrtulové motory, z části založené na principu jednoproudových leteckých motorů, využívají pro tah urychlený proud vzduchu vyvozený prostřednictvím rotující vrtule. Z malé části může být tah motoru někdy vyvozen i urychleným vnitřním proudem spalin v dýze. Základem proudových motorů je kompresor. Ten nasává vzduch z okolní atmosféry, který je následně stlačen (až na třicetinu svého objemu) a veden do spalovací komory. Zde se stlačený vzduch smísí s kontinuálně dodávaným palivem, přičemž dochází k hoření za vzniku horkých plynů, které roztáčí lopatková kola turbíny, pevně spojená s hřídelí motoru. Vstupní díl, tedy daný rozvaděč turbíny, lze charakterizovat jako tenkostěnnou rotační součást typu axiálního lopatkového kola. Funkce rozvaděče obecně spočívá v usměrňování toku spalin, jdoucích od plamence ze spalovací komory na lopatky turbínového kola. Proud spalin musí být při výstupu z rozvaděče pod takovým úhlem, aby se docílilo ideálního a maximálního využití tlaku horkých plynů pohánějících turbínu, a tím se tak zajistila co nejvyšší účinnost motoru. [27, 30, 32]

Pro samotnou konstrukci přípravku je stěžejní především jeho rozměrová analýza odvíjející se od velikosti daného prototypu. Vzhledem k velikosti pracovního boxu omílacího stroje LPG1, uvedenou v tabulce 1, bylo nutné určit maximální rozměry rozvaděče. Ty jsou určeny maximálním vnějším průměrem kola, který je 355 mm, a celkovou výškou kola měřící 68 mm. Prostor mezikruží, dále určený minimálním vnitřním průměrem kola 267 mm, se skládá z 62 rovnoměrně rozmístěných lopatek, s kolmou výškou (vůči základně) 30 mm. Tato část rozvaděče, jenž skrze lopatky spojuje

náboj a vnější plášť kola, bude dále v této práci uváděna pod pracovním označením prstenec.



Obr. 22: Vyobrazení prstence turbínového rozvaděče (červeně vyznačeno)

Daný počet lopatek kola je vzhledem k myšlence o rovnoměrně velikých krycích segmentech problematický. Stejně rozměrné segmenty by usnadňovaly výrobu, a především i následnou montáž přípravku, jelikož by mohly být všechny tyto díly vzájemně zaměnitelné. Z tohoto důvodu byl stanoven počet segmentů, který bude tvořen devíti páry protilehlých dílů (devět na náběžné straně rozvaděče a devět na straně odtokové). Osm dvojic bude tak mezi sebou vzájemně zaměnitelných a v sestavě společně umožní zakrytí 56 mezilopatkových prostorů. Devátý pár segmentů byl určen jako výchozí, vzhledem k přesně stanovené poloze vůči přípravku, kterou bude vyžadovat. V případě nutnosti může tak výchozí dvojice krytů maskovat zbylých 6 kanálů.

Jelikož daný rozvaděč pracuje při vysokých provozních teplotách v oblasti teplého okruhu turbovrtulového motoru, musí materiál součásti vykazovat především vysokou teplotní odolnost. Zatímco kompresorová lopatková kola, která pracují za výrazně nižších teplot, jsou často vyráběna z korozivzdorných precipitačně vytvrzených ocelí maraging a titanových slitin, v případě turbínových lopatkových kol se téměř výhradně setkáváme se slitinami na bázi niklu. Jednou z takovýchto slitin je inconel 718, z které je zde řešený rozvaděč vyroben. Inconel 718 je precipitačně vytvrditelná slitina na bázi niklu a chromu, patří do skupiny materiálů hojně využívaných pro součásti pracující v extrémních prostředích a podmínkách. Pro své vlastnosti, mezi které se řadí právě vysoká teplotní odolnost dosahující až 760 °C a vynikající mez pevnosti v tečení, se často

aplikuje v odvětvích leteckého a automobilového průmyslu. Zde nachází využití především v oblastech s vysokou provozní teplotou, jako jsou plynové turbíny a motory. V opačném případě ji lze díky hlubokému podchlazení, které může dosahovat hodnoty až -253 °C , použít i pro součásti kryogenních prostředí, kde je vyžadována odolnost vůči velmi nízkým teplotám. Dalšími klíčovými přednostmi, kterých je docíleno příměsí především legujících prvků niobu, molybdenu, hliníku a titanu, jsou rovněž odolnost proti korozi a mechanické vlastnosti, jako jsou vysoká mez pevnosti (v závislosti na tepelném zpracování až $1\,700\text{ MPa}$ při teplotě 21 °C) a mez kluzu ($1\,200\text{ MPa}$ při teplotě 21 °C). Vzhledem k vysoké pevnosti, tvrdosti a houževnatosti je obrobitelnost této slitiny obecně problematická. Během obrábění navíc dochází k intenzivnímu zpevňování povrchu materiálu a dále z důvodu nízké tepelné vodivosti slitiny, která je v porovnání například s běžnou uhlíkovou ocelí téměř 5x nižší (viz tabulka 2), dochází k vysokým teplotním změnám na břitu nástroje, které vedou k jeho lavinovitému opotřebení. Proto se pro zvýšení obrobitelnosti provádí rozpouštěcí žíhání při teplotách v rozmezí 950 °C až 1340 °C ve vakuu, nebo inertní atmosféře, který redukuje stav zpevnění. [33, 34, 35, 36]

Tab. 2: Porovnání tepelné vodivosti slitiny inconel 718 [36]

	Uhlíková ocel s 0,2 hm% C	Inconel 718
$\lambda\text{ [W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	50	11,4

Vzhledem k vysoké ceně materiálu, který se ve formě třísek stává ztrátovým, a také z důvodu velmi drahých obráběcích nástrojů, vlivem vysokých nároků na vyměnitelné břitové destičky, je inconel 718 v současné době stále více směřován k výrobě pomocí technologie 3D tisku. Zejména se jedná o metodu SLM (Selective Laser Melting = Selektivní laserové tavení), případně technologii založenou na velmi podobném principu, zvanou jako DMLS (Direct Metal Laser Sintering), spojovaná s německou společností EOS. Tyto technologie jsou využívány právě pro tisk kovových materiálů jak korozivzdorných a nástrojových ocelí, tak slitin titanu, hliníku a niklových slitin, mezi které patří právě i inconely. Na rozdíl od metody SLS (Selective Laser Sintering) nedochází ke spékání jednotlivých mikroskopických vrstev stavebního materiálu dané

slitiny v podobě kovového prášku, ale k jeho úplnému roztavení za vzniku výrobku zcela homogenních vlastností. Tato technologie díky vysoké přesnosti umožňuje tisk složitých tvarových ploch a lze tedy vyrábět náročné komponenty, jako jsou právě i kompresorová a turbínová lopatková kola.

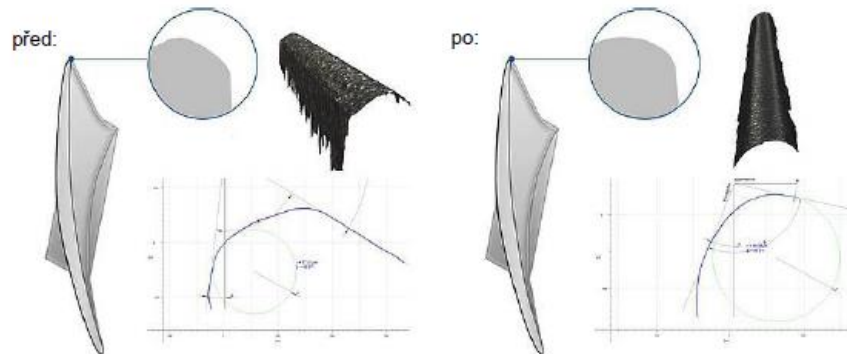
Tab. 3: Chemické složení [hm%] slitiny inconel 718 [34]

	Ni+Co	Cr	Nb	Mo	Cu	C	Mn	Si	P	S	Ti	Al
Min.	50	17	4,75	2,8	-	-	-	-	-	-	0,65	0,2
Max.	55	21	5,50	3,3	0,3	0,08	0,35	0,35	0,015	0,015	1,15	0,8

6.2. Analýza určené technologie SPM leštění

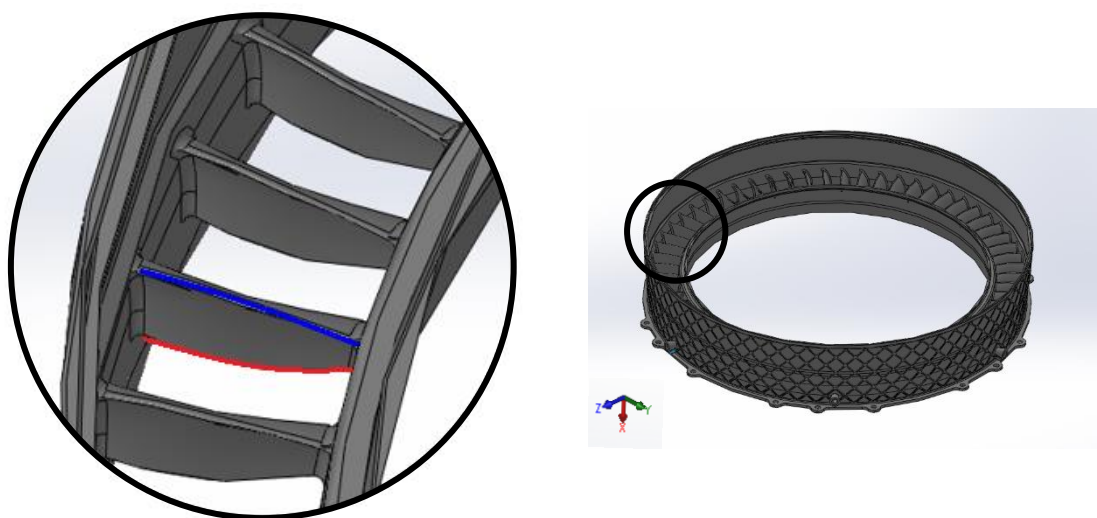
Leštění daného rozváděcího lopatkového kola bude v první řadě odzkoušeno ve stroji LPG1, využívající speciální technologie leštění SPM, jejíž princip byl již popsán v teoretické části této práce. Na základě těchto informací bude nyní řešena obecná koncepce přípravku v souvislosti s technologickými požadavky, které musí splňovat. Jedním ze zásadních požadavků je ustavení rozvaděče v pracovním prostoru omílacího stroje takovým způsobem, aby docházelo k co nejefektivnějšímu toku procesního média kolem obráběných ploch. Během procesu leštění zde dochází vlivem vibrací k jednosměrně orientovanému vířivému proudu procesního média napříč pracovním boxem, kde směr proudu média je dán rotací motoru stroje. Jak již bylo popsáno v kapitole 4.6.1., pro efektivní lešticí účinek je vhodné tento směr v určitých časových intervalech přeměrovat na opačný. Při samotném procesu dochází vedle odstraňování mikronerovností k odhrotování a zaoblování hran lopatek, které se úměrně zvyšuje se strojním časem procesu. Z tohoto důvodu je důležité stanovit orientaci kola vůči souřadnému systému pracovního prostoru stroje na základě určení náběžných a odtokových hran lopatek. Obecně je v případě lopatkových kol, pracujících v tzv. teplém okruhu leteckých motorů, zaoblení lopatek na náběžné straně kola větší než na straně odtokové, jejíž hrana se jeví jako ostrá. Důvodem je proud expandujícího vzduchu, vedený přes náběžnou stranu lopatek, jejichž zaoblený tvar, připomínající profil křídla, umožňuje maximální výměnu kinetické energie, pohánějící kolo turbíny. U kompresorových lopatkových kol je naopak menší zaoblení hrany na náběžné straně

lopatek a větší na straně odtokové, z důvodu zajištění vyšší účinnosti při sání vzduchu do spalovací komory.



Obr. 23: Zaoblení hran lopatek jako důsledek procesu strojního leštění [27]

Na obrázku 24 vlevo je červeně vyznačena náběžná hrana lopatky rozvaděče, která je charakterizována určitým zaoblením. Vzhledem k toku brusiva skrze zasypanou součást v pracovním boxu, které proudí neustále ve smyčce, bude docházet na výše orientovaných hranách součásti k jejich zaoblování. Naproti tomu u níže orientovaných hran součásti, vlivem odplouvajícího brusiva z omílaných ploch, za současného působení třecí síly a abraze, bude docházet k většímu úbytku materiálu, a tedy i k ztenčování hran. Pro zachování většího zaoblení na náběžné hraně musí být tedy rozvaděč v přípravku orientován vzhledem k souřadnému systému stroje s lopatkovým prstencem vzhůru.



**Obr. 24 vlevo: Vyznačení náběžné (červená) a odtokové (modrá) hrany lopatek
vpravo: Celkový pohled na odtokovou stranu rozvaděče**

7. Návrh přípravku

Jelikož je rozvaděč, pro který je přípravek konstruován, prototyp vyráběný zcela novým technologickým postupem, bude další vývoj této součásti záviset v nemalé míře i na výsledcích dosažených v procesu leštění aditivně vyráběných lopatek z niklové slitiny. Navrhovaný přípravek je tedy určený pro ustavení jedné specifické součásti, jenž má být podrobena danému procesu dokončovací technologie. Na základě poznatků uvedených v kapitole 5 jsou tak stanoveny požadavky na konstrukci, jenž vyžaduje finanční nenáročnost a jednoduchost, spojenou s využitím běžně dostupných, nebo snadno výrobitelných polotovarů. Před samotným návrhem se proto stanovili technologické možnosti, které lze využít pro výrobu přípravku a které tudíž musí být zohledněny již při konstrukci CAD modelu. Výčet těchto strojů, které následně budou využity pro výrobu komponentů přípravku, jsou uvedeny v kapitole 8.1. této práce.

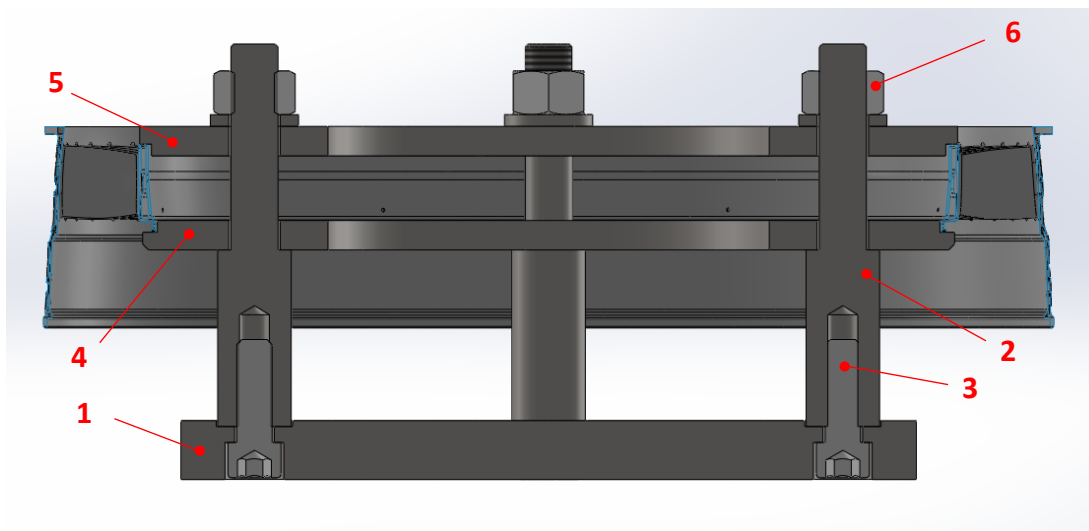
7.1. První navrhovaná koncepce

Základem každého přípravku je tuhá podstava sloužící k upevnění celé sestavy k danému stroji. Jak bylo zmíněno, upínání obrobků k desce pracovního boxu u stroje LPG1 je realizováno pomocí elektromagnetu. Konkrétně se jedná o elektropermanentní magnetický upínač. Ten pracuje na principu spojující výhody permanentního magnetu a elektromagnetu. Základem elektromagnetu jsou cívky napájené usměrněným proudem za vzniku elektromagnetické síly. Ta je po celou dobu závislá na vnějším zdroji energie, při jehož přerušení tato síla opět zaniká. Zde nacházejí využití integrované permanentní magnety (nejčastěji neodymové), které v případě výpadku energie zabrání uvolnění obrobku a případnému vzniku kolize. Jejich další výhodou je teplotní stálost, díky které nedochází k zahřívání kontaktní plochy, která může vlivem tepelné dilatace snížit přesnost ustavení. U elektropermanentních magnetických upínačů je tedy elektrický proud využíván pouze k zapnutí a vypnutí neodymových magnetů, vytvářejících nezávislé a stálé magnetické pole. Při opačně orientovaném energetickém impulsu dochází pak prostřednictvím řídicí elektroniky k okamžitému odmagnetování obrobku. [37]

Velikost upínací magnetické síly je obecně ovlivněna mnoha faktory. V první řadě se jedná o materiál upínaného dílu, v tomto případě upínací části přípravku, dále nazývanou jako základna. Jako taková musí vykazovat především feromagnetické vlastnosti, čímž se obecně výběr omezuje na kovové materiály. V případě ocelí má důležitou roli množství obsaženého uhlíku. Nízkouhlíkové oceli totiž vedou tok magnetických silnic snadněji než oceli uhlíkové, nebo legované, obsahující nemagnetické částice legujících prvků. Z tohoto důvodu jsou například litiny nevhodné pro magnetické upínání vzhledem k vysokému obsahu uhlíku (v různé formě v závislosti na typu litiny) ve struktuře. Dalším důležitým faktorem je obecně tloušťka kontaktní plochy obrobku (tloušťka základny přípravku). Ta je ovlivněna šířkou pólu elektromagnetu stroje. Indukční čáry protékající obrobkem mohou převyšovat tuto tloušťku, čímž není zcela využito maximální síly pro upnutí. Třetím zmíněným faktorem je jakost a velikost kontaktní plochy. Kontaktní plocha by měla být ošetřena od magneticky těžko prostupných překážek, jako je například povrchová vrstva koroze. Zásadní je i rovinnost upínací plochy, omezující vznik vzduchových mezer v kontaktním místě, které jsou těžko prostupné pro indukční čáry a snižující tak pevnost upnutí. [37]

Pro základnu přípravku byla nakonec zvolena ocelová deska čtvercového průřezu s rozměry 200 x 200 x 24 mm. Spojení základny (1) s tělem přípravku, tedy části sloužící pro upevnění rozvaděče, je vyřešeno pomocí čtyř trnů (2), rozmístěných pravidelně po 90° na roztečné kružnici o průměru 200 mm. Jednotlivé trny jsou k základně připevněny pomocí zapuštěných šroubů s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem (3). Samotné tělo přípravku je složeno ze dvou osazených kruhových desek, dále nazývané jako příruby, které mají z důvodu odlehčení celé sestavy průřez tvaru mezikruží. Do přírub jsou vyvrtány čtyři otvory (normalizované velikosti děr s vůlí pro daný vnější závit na osazených trnů), polohovány na stejné roztečné kružnici a se stejnou úhlovou roztečí jako základna. Na osazení trnů je nasunuta skrze tyto díry spodní příruba (4), na kterou je usazen rozvaděč. Ten je poté sevřen z druhé strany horní přírubou (5) a stlačen pomocí čtyř matic (6), které po dotažení momentovým klíčem pevně spojují tělo přípravku se základnou skrze vnější závity trnů. Celý přípravek je koncipován tak, aby

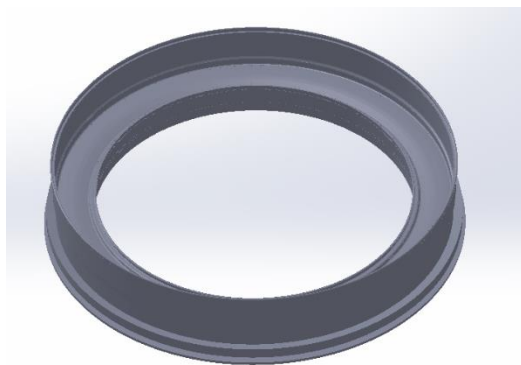
bylo umožněno dle potřeby celé tělo přípravku otočit ve svislém směru o 180° a zaměnit tak orientaci náběžné a odtokové strany rozvaděče. Osazení na přírubách usnadňuje vystředění rozvaděče v přípravku a zajišťuje jeho souosost s přírubami.



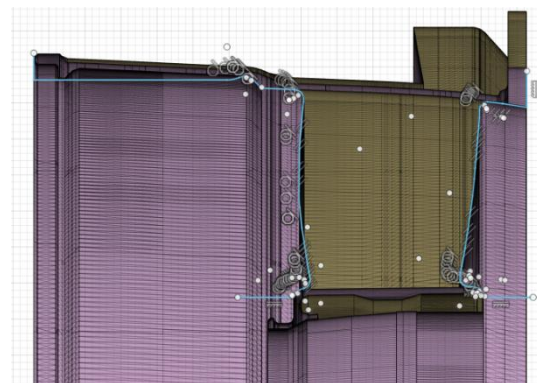
Obr. 25: První návrh konstrukce v řezu (bez krycích segmentů)

Dalším krokem byla koncepce maskovacích segmentů. Jejich hlavním úkolem je zakrytí vybrané skupiny mezilopatkových kanálů a zajistit těsné spojení s hranami lopatek, aby nedocházelo k propouštění kovových tělísek, nesoucích abrazivní složku procesního média do krytých prostorů. Pro zajištění dokonalého těsnění bylo zapotřebí přesně definovat vnitřní stavbu rozvaděče. Za tímto účelem bylo prostřednictvím CAM softwaru využito funkce kinematické obálky, pomocí které lze vytvořit 3D obrazec, skládající se z velkého množství vzájemně navazujících ploch definovaného tvaru (nejčastěji trojúhelníky) s velikostí, která se odvíjí od požadovaného rozlišení. Tento 3D objekt, generovaný do formátu STL, přesně kopíruje povrch součásti s přesností, která je závislá na množství plošných útvarů. Soubor STL je pak nutné převést pomocí CAD softwaru na objemové tělo, s kterým již lze snadno pracovat a vytvořit tak jednotlivé krycí segmenty. Při transformaci plošného těla na objemové však nastal technický problém. Vzhledem k požadované přesnosti, byl STL soubor příliš náročný na výpočet, a tedy jej nebylo možné převést na použitelný formát pro CAD software. Pro transformaci bylo využito hned několik dostupných CAD softwarů, ale výsledek byl ve všech případech negativní. Další méně přesnou a také pracnější možností byla aproximace křivky tvořící hranu

lopatky. To bylo provedeno ručně v prostředí skici CAD softwaru pomocí tečně navazujících spline křivek, ekvidistantně kopírující vnitřní stavbu rozvaděče. Po vytvoření uzavřené skici je pak již možné rotací vytvořit přímo objemové tělo. Pro vzdálenost ekvidistantní křivky od povrchu byla stanovena hodnota 0,2 mm, která by měla zaručit přesné usazení segmentu na rozvaděč bez ztráty těsnosti. Hodnota byla zvolena na základě průměrné tloušťky kovové třísky tvořící součást procesního média, která se pohybuje okolo hodnoty 0,6 mm.



Obr. 26: Kinematická obálka rozvaděče



Obr. 27: Ekvidistantní křivka kopírující hranu lopatky

Dalším opatřením pro zajištění dokonalého těsnícího účinku je stanovení vhodného materiálu. Z výše uvedených důvodů je třeba zvolit obecně měkčí materiál ze skupiny polymerů, který je snadno zpracovatelný a umožňuje alespoň malou elastickou deformaci při usazování dílů, pro vytvoření dokonalého negativního tvaru dané geometrie. Vzhledem ke složitosti tvaru segmentů a požadované přesnosti, bylo rozhodnuto o využití technologie 3D tisku, která je hlavním zástupcem metod prototypové výroby. Konkrétně byla vybrána dostupná tiskárna STRATASYS F370, založena na technologii FDM. Tato tiskárna umožňuje jednotlivě zpracovávat hned několik termoplastických materiálů, které jsou ve své podstatě téměř všechny založeny na, v praxi běžně využívaném, termoplastickém kopolymeru ABS. Mezi tyto materiály patří ABS-M30, ABS-ESD7, ASA, PC/ABS, TPU a PLA. Při omílacím procesu bude materiál samozřejmě vystaven nejen vysokému abrazivnímu opotřebení, ale i chemickým a tepelným vlivům od proudících složek procesního média. Na základě těchto

skutečností bylo nutné udělat analýzu vlastností dané skupiny materiálů, podle níž pak bude vybrán nejvhodnější zástupce pro výrobu maskovacích segmentů.

- **ABS**

Prvním z materiálů, který umožňuje tiskárna STRATASYS F370 zpracovat, je ABS-M30. ABS (Akrylonitril-Butadien-Styren) je termoplast s amorfni strukturou. Mezi jeho hlavní parametry patří vysoká tuhost, houževnatost a odolnost vůči mechanickému poškození. Disponuje odolností vůči vysokým i nízkým teplotám a velmi nízkou navlhavostí. Jakožto ropný produkt však vytváří při zahřívání nepříjemný zápach. Velikou nevýhodou je zejména náchylnost ke změnám teploty okolí, čímž dochází k tvarovým nepřesnostem výtisku. ABS-M30 je modifikací, která přináší zvýšení meze pevnosti o 25 až 75 %, a to při malé změně ceny v Kč/g. [38]

- **ASA**

Dalším z uvedených materiálů je konstrukční termoplast ASA (Akrylonitril-Styren-Akryl), který byl vytvořen jako alternativa k výše zmíněnému materiálu ABS, určenému zejména pro aplikace ve venkovním prostředí. Jako takový vykazuje zvýšenou odolnost vůči povětrnostním podmínkám a vynikající odolnost vůči UV záření. Oproti ABS-M30 má zvýšenou tuhost a mechanickou odolnost. Další výhodou je snadná zpracovatelnost technologií FDM a zachování vysokých detailů při tisku. [38]

- **PLA**

Kyselina polyléčná, neboli PLA (Polylactic Acid), je stejně jako ABS jedním ze základních a zároveň nejuniverzálnějších materiálů používaných v technologii FDM tisku. Hlavní výhodou oproti ABS je jeho tvarová stálost v procesu výroby, vzhledem k minimálnímu rozpínání při tavení, čímž se zvyšuje rozměrová a tvarová přesnost finálních výrobků. Obecně je PLA relativně tuhý materiál, v porovnání s ostatními uvedenými zástupci. Nevýhodou je naopak jeho vysoká navlhavost způsobená absorpcí vody ze vzdušné vlhkosti, čímž dochází k degradaci materiálu v podobě zvýšení objemu součásti a v souvislosti s tím i k snížení mechanických vlastností a tepelné odolnosti. Problémem často bývá i odstraňování podpurných prvků. Jelikož je PLA rozpustný

v hydroxidu sodném, stejně jako podpůrný materiál, musí být podpěry odstraňovány pouze mechanicky. [38]

- **PC/ABS**

Jedná se o kompozitní materiál spojující vlastnosti termoplastického polykarbonátu (PC) a ABS. Polykarbonát je jedním z nejodolnějších tisknutých materiálů, vhodných pro velmi namáhané komponenty. Vzhledem ke srovnatelným vlastnostem s ABS a také k vysoké ceně samotného materiálu, je často využíván jako kopolymer. Díky vlastnostem PC má elektroizolační a dielektrické vlastnosti a zvyšuje se jeho rozměrová stabilita při výrobě. Ve spojení s ABS dostáváme vynikající odolnost vůči mechanickým rázům za nižších teplot, která je vyšší než u jednotlivých samostatných složek kopolymeru. [38]

- **TPU**

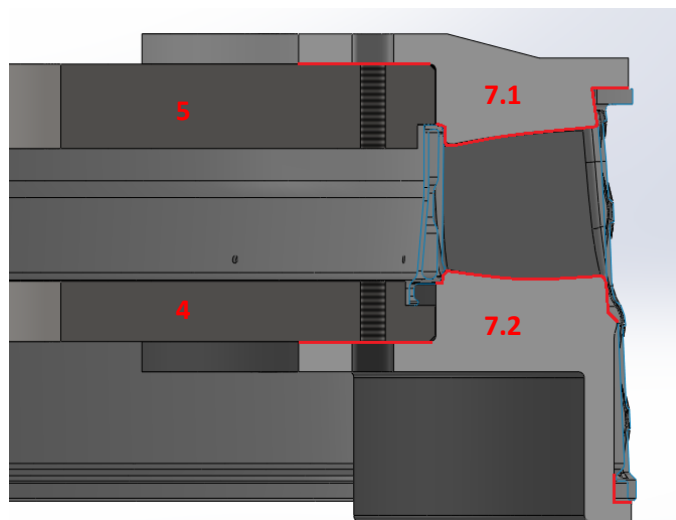
Termoplastický polyuretan TPU, v praxi někdy též označovaný jako TPE-U, se řadí mezi termoplastické elastomery. Jeho stěžejní vlastností je vysoká elasticita i za velmi nízkých teplot (až do -45 °C), díky které může být vnějšími silami výrazně deformován bez porušení soudržnosti a po odlehčení zpět navrácen do původního stavu. I přesto, že se jedná o měkčí materiál s výraznou ohebností, disponuje vysokou odolností, díky které je uplatňován v mnoha odvětvích. V prostředí rozpouštědel a kyselin dochází k jeho výrazné degradaci. Naproti tomu však dobře odolává olejům a tukům. Má dobrou přilnavost na většinu různorodých povrchů. [38]

Tab. 4: Porovnání parametrů vybraných materiálů pro FDM tisk krytů přípravku [38]

	ABS-M30	ASA	PLA	PC/ABS	TPU 92A
Hustota [kg/m^3]	1 050	1 070	1 250	1 130	1 250
Teplota tisku [$^{\circ}\text{C}$]	220 až 240	250 až 255	185 až 235	220 až 240	200 až 220
Teplota podložky [$^{\circ}\text{C}$]	100 až 130	60 až 100	0 až 60	90 až 100	40 až 60
Max. teplotní odolnost [$^{\circ}\text{C}$]	90 až 100	90 až 100	60	150	120
Nasákavost při 23 °C a 50% vzdušné vlhkosti [%]	0,1	0,35	2	0,2	0,5
Průměrná cena struny ($\varnothing 1,75\text{ mm}$) [Kč/g]	0,55	0,60	0,35	0,9	1,5

Z charakteristik jednotlivých zástupců, částečně uvedených v tabulce 4, byl pro výrobu maskovacích segmentů nakonec vybrán materiál ABS-M30, disponující dobrými mechanickými vlastnostmi a odolností vůči mechanickému poškození. Vzhledem k nízké navlhavosti nebude navíc docházet k degradaci materiálu vlivem kapalné složky procesního média. Teplotní odolnost dosahující u tohoto materiálu hodnoty 100 °C by měla být dostačující vzhledem k provozní teplotě omílacího procesu, která je závislá na přeměně kinetické energie v tepelnou prostřednictvím vzájemného tření kovových tělísek procesního média.

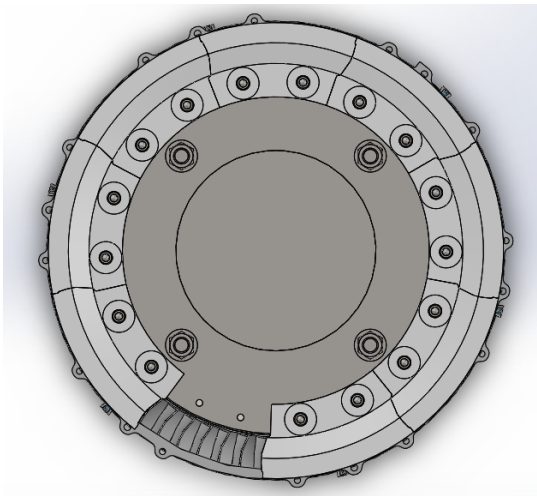
Upevnění jednotlivých krytů k přípravku je patrné na níže uvedeném obrázku, kde je znázorněna dvojice protilehlých segmentů v řezu s označením (7.1) a (7.2) s červeně vyznačenými dosedacími plochami k rozvaděči. Připevnění krytů je vyřešeno pomocí šroubů velikosti M6 s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem, opatřené velkoplošnou podložkou pod hlavou pro rozložení tlaku vzniklého při utahování.



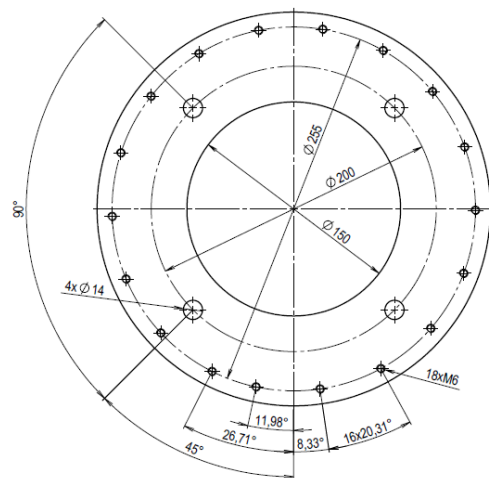
Obr. 28: Maskovací segmenty v řezu s vyznačenými dosedacími plochami (červeně)

Dle prvotní představy byl horní a dolní kryt rozčleněn na 9 segmentů. Vzhledem k devátému (nezaměnitelnému) krycímu segmentu je důležité přesně stanovit polohy náležitých děr se závitem M6 na jednotlivých přírubách pro upevnění dvojic protijdoucích plastových krytů. Orientace těchto děr je závislá na pozici závitových tyčí,

procházející přírubami skrze díry o průměru 14 mm na soustředné roztečné kružnici o průměru 200 mm. Samotná poloha je vždy vztažena k danému čelu příruby (strana s osazením, nebo strana bez osazení), které při výrobě nelze zaměnit. Od pravidelného rozmístění lopatek v prstenci jsou pak odvozeny roztečné úhly mezi jednotlivými maskovacími segmenty. Výchozí poloha pro vrtané otvory je vztažena k ose Y, jak je znázorněno na obrázku 30.



Obr. 29: Půdorys sestavy 1. koncepce přípravku



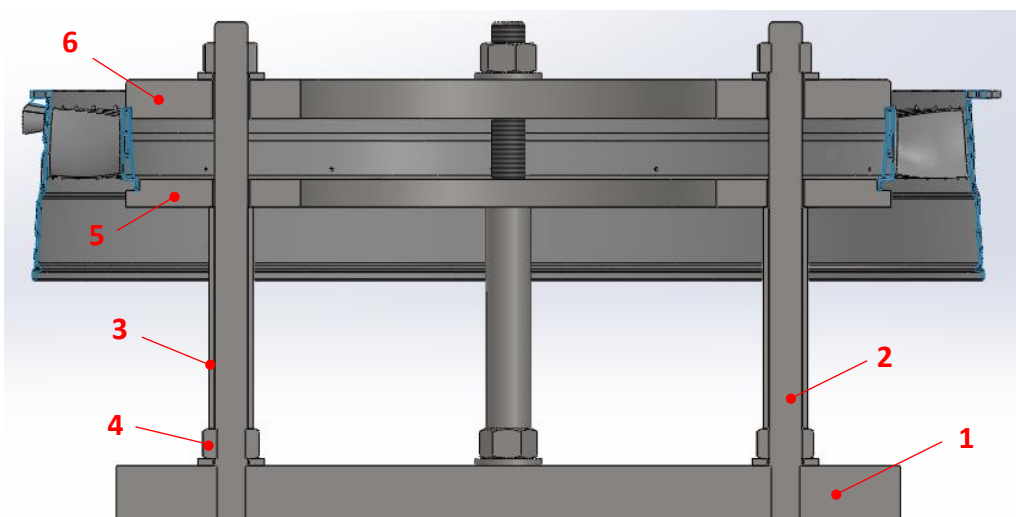
Obr. 30: Poloha děr pro upevnění segmentů v horní přírubě

7.2. Druhá navrhovaná koncepce

Koncepce druhé varianty je zaměřena zejména na optimalizaci krycích segmentů, avšak určité optimalizace byly provedeny i v nosné konstrukci přípravku, která v prvním návrhu příliš nesplňuje požadavky na ekonomicky výhodné prototypové přípravky. Vzhledem k těmto změnám v sestavě budou pro přehlednost jednotlivé komponenty druhé varianty návrhu nově očíslovány.

Spojení základny s přírubami pomocí osazených hřídelů se závitem je technicky funkční, poskytuje dobrou tuhost přípravku, nicméně z hlediska případné úpravy provozní výšky není příliš vhodným řešením. Pokud by bylo zapotřebí zvýšit výšku rozvaděče nad základnou, musely by se všechny 4 podpěry (hřídele) vyrábět celé od začátku. Z tohoto

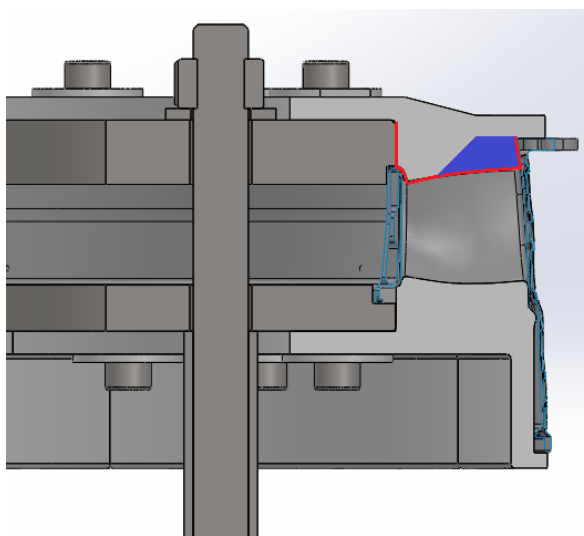
důvodu byly hřídele nahrazeny závitovými tyčemi M12 (2), upevněnými skrze závit v základní desce (1), společně ve spojení s distančními trubkami (3). Dosahuje se tak stejného efektu při zachování tuhosti přípravku a zejména se docílí možnosti pro výškové korekce, kterou lze nastavovat přidavnými členy v podobě trubek normalizovaného rozměru, zarovnanými na přesnou délku. Díky tomuto řešení tak odpadá operace soustružení hřídelů se závit, které jsou nahrazeny přímo normalizovanými polotovary. Závitová tyč M12 je díky přidavné matici (4) upevněna k základně s předpětím, čímž je docíleno pevného spojení, odolného vůči vibracím omílacího stroje, které může jinak zapříčinit uvolnění spojů. Řešení pro upevnění rozvaděče pomocí svěrných přírub zůstává totožné s prvním návrhem.



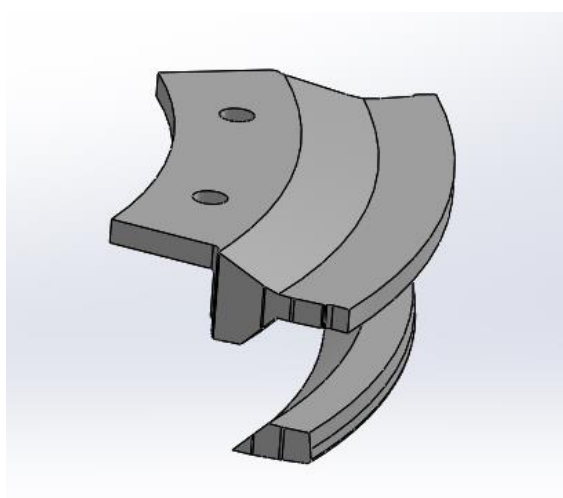
Obr. 31: Druhý návrh konstrukce v řezu (bez krycích segmentů)

Zásadní změnu v konstrukci vyžadoval především horní krycí segment. Vzhledem k tomu, že vnitřní tvar horní části lopatkového prstence (náběžná strana rozvaděče) má tvar klínu rozšiřujícího se směrem vzhůru, jak je patrné z obrázku 32, nebylo by možné horní maskování při kompletaci nasunout do požadované pozice. V případě zachování celistvého tvaru by kryt nemohl plnit těsnící funkci v důsledku nepřilnutí k jedné z vnitřních stěn rozvaděče. Z tohoto důvodu byl horní krycí segment navržen jako dělený.

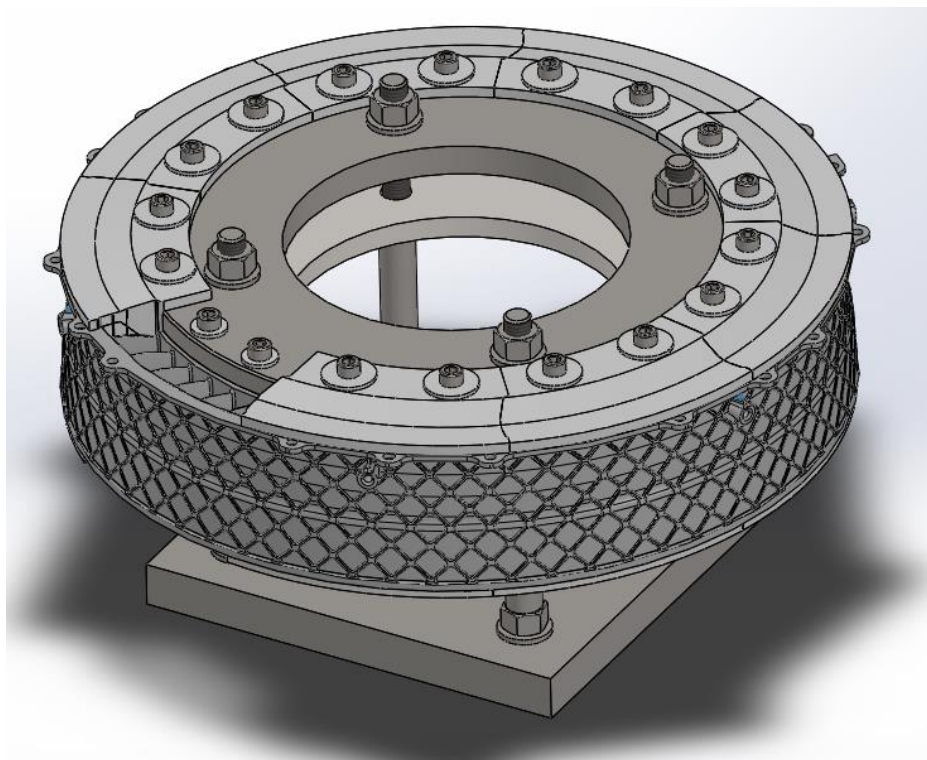
Rozdělení však muselo být provedeno v takové rovině, aby se po nasazení horní (přítlačné) části děleného segmentu a jeho následném dotahování k tělu přípravku spodní díl pevně spojil s vnitřní stěnou rozvaděče. K rozdělení segmentu byla zvolena rovina pod úhlem 45°, čímž je spodní dělený díl díky výslednici sil bezpečně zajištěn hned ve dvou osách. V případě možných rozměrových nepřesností, které mohou vzniknout ve fázi tisku, bude lomená dělicí rovina segmentu utěsněna pryžovou pěnou pro zajištění pevného a těsného spojení.



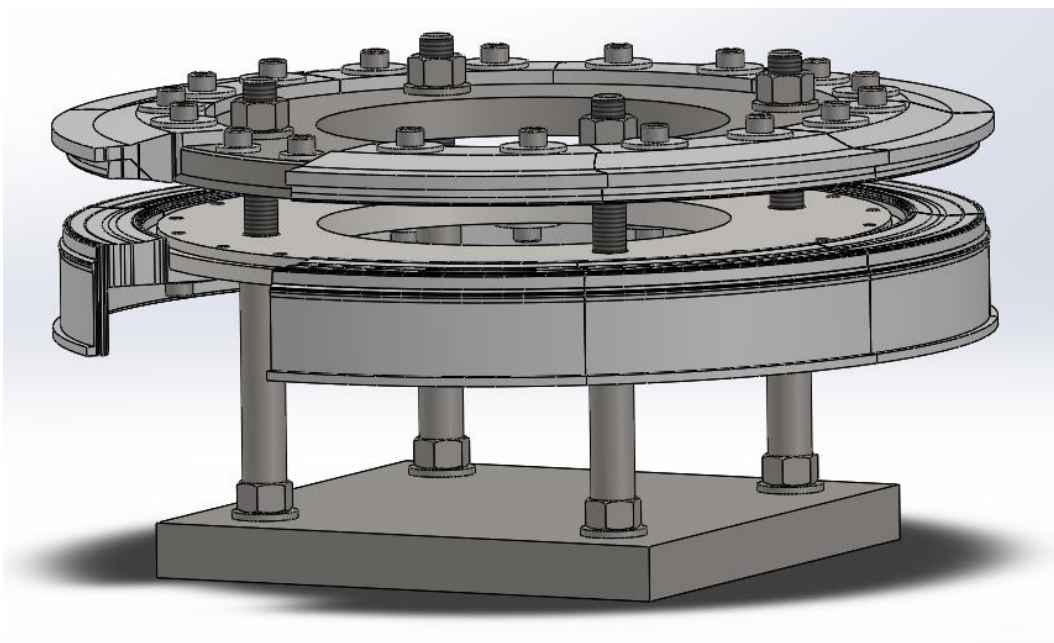
Obr. 32: Vyznačení klínové drážky (červeně) vedoucí k dělenému segmentu



Obr. 33: Model děleného horního krycího segmentu



Obr. 34: CAD model finální verze sestavy přípravku



Obr. 35: CAD model finální verze sestavy přípravku bez rozvaděče

8. Výroba přípravku

Výroba jednotlivých komponentů maskovacího přípravku a následná montáž byla uskutečněna v prostorách halových laboratoří Fakulty strojní ČVUT na Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie. Na základě sepsaného kusovníku byly veškeré potřebné ocelové polotovary, včetně spojovacího materiálu, objednány a zakoupeny od pražských strojních firem PLECHEXPRES a AKROS. Z důvodu rozměrnějších komponentů přípravku, jako jsou svěrné příruby a základní deska, byly z technologických i ekonomických důvodů pro tyto díly určeny polotovary ve formě hrubých výpalků, tedy s určeným přídavkem na obrábění. Kompletní výkresová dokumentace přípravku je pak uvedena v přílohách 1 až 11 na konci této práce.

8.1. Využití strojní zařízení a nástroje

Vzhledem k relativně jednoduché konstrukci přípravku bylo využito především jednodušších konvenčních strojů, avšak jak již bylo naznačeno, bylo také například uplatněno i aditivní FDM technologie výroby 3D tisku. Pro usnadnění práce bylo v některých úsecích výroby využito i CNC stroje s uplatněním postačujícího dílenského programování. Kompletní výčet využitého strojního zařízení s náležitými provozními parametry a charakteristickými informacemi je uveden níže.

- **Soustruh SV 18 RA**

Výkon elektromotoru:	7,5 kW
Max. otáčky vřetena:	2 800 ot/min
Max. obráběný průměr:	380 mm
Max. obr. průměr nad ložem:	215 mm
Max. obráběná délka:	750 mm
Max. hmotnost obrobku:	300 kg
Vrtání vřetene:	41 mm
Výrobce:	TOS Trenčín



Obr. 36: Soustruh SV 18 RA [39]

- **Frézka FNGJ 40**

Příkon stroje:	4 kW
Max. otáčky vřetena:	3 150 ot/min
Upínací plocha stolu:	800 x 400 mm
Rozsah v ose X, Y, Z:	600 x 400 x 400 mm
Max. hmotnost obrobku:	400 kg
Kužel vřetena:	ISO 40
Výrobce:	TOS Trenčín



Obr. 37: Frézka FNGJ 40 [40]

- **Radiální vrtačka VR 4**

Výkon elektromotoru:	3 kW
Max. otáčky vřetena:	2 000 ot/min
Max. vrtaný průměr:	50 mm
Svislý rozsah ramena:	710 mm
Vodorovný rozsah vřeteníku:	945 mm
Kužel vřetena:	Morse 4
Výrobce:	Kovosvit MAS



Obr. 38: Radiální vrtačka VR 4 [41]

- **CNC frézka VMC 500**

Výkon stroje:	3,7 kW
Max. nosnost stolu:	350 kg
Max. otáčky vřetena:	6 000 ot/min
Počet nástrojů:	21
Upínací plocha stolu:	800 x 500 mm
Rozsah v ose X, Y, Z:	500 x 500 x 500 mm
Řídící software:	Acramatic 2100
Výrobce:	Kovosvit MAS



Obr. 39: CNC frézka VMC 500 [42]

- **FDM tiskárna STRATASYS F370**

Technologie 3D tisku:	FDM
Stavební materiály:	ABS-M30, ASA, PLA, TPU, PC-ABS
Podpůrné materiály:	QSR, PLA
Stavební rozměry:	355 x 254 x 355 mm
Přesnost výtisků ¹ :	± 0,2 mm (0,002 mm/1 mm)
Tloušťky tisk. vrstev:	{0,330; 0,254; 0,178; 0,127} mm
Hlučnost procesu:	46 dB
Simulační software:	GrabCAD Print
Požadavky na napájení:	200-240 V/7 A; 50/60 Hz




Obr. 40: Tiskárna STRATASYS F370
[43]

¹ Závisí na geometrii součásti (rozměrové výtěžnosti).

Pro přehlednost je v jednotlivých výrobních postupech komponentů přípravku uvedeno vlastní zjednodušené označení nástrojů a zařízení, které byly využity při výrobě. V tabulce níže je pak uveden úplný seznam s náležitým charakteristickým označením a v případě některých i s doporučenými řeznými podmínkami od daného výrobce.

Tab. 5: Využití nástroje a zařízení při výrobě

OZN.	Zobrazení nástroje	Charakteristika a normované označení nástroje	Doporučené řezné podmínky
SN-H		<u>Vnější soustružnický nůž – nahrubo:</u> - NT: DDJNR 3232 P 15 - VBD: DNMG 150604E-NF	$f = (0,13 \div 0,24) \frac{mm}{ot}$ $a_p = (0,4 \div 3) mm$ [44]
SN-Č		<u>Vnější soustružnický nůž – načisto:</u> - NT: SDJCR 0808 D 07 - VBD: DCGT 070202F-AL	$f = (0,06 \div 0,12) \frac{mm}{ot}$ $a_p = (0,3 \div 2,1) mm$ [44]
SN-U		<u>Upichovací nůž:</u> - NT: XLCFR 1612 H 03 - VBD: LFUX 030800TL	$f = (0,1 \div 0,15) \frac{mm}{ot}$ [44]

F1		<u>Stopková fréza 3-břítá::</u> Ø16 mm, Tvrdokov + povlak TiAlN 16x26x92 DIN 6527 [45]
V 10,2		<u>Vrták Ø10,2 mm s válcovou stopkou:</u> Povlak ze slinutého karbidu TiAlN DIN 6535/1897, Prac. délka: 43 mm [46]
V5		<u>Vrták Ø5 mm s válcovou stopkou:</u> Povlak ze slinutého karbidu TiAlN DIN 6535/1897, Prac. délka: 26 mm [46]
V14		<u>Vrták Ø14 mm s válcovou stopkou:</u> Povlak ze slinutého karbidu TiAlN DIN 6535/1897, Prac. délka: 53 mm [46]
Z12		<u>Strojní závitník do průchozí díry:</u> M12 HSSE, délka řezné části 26 mm DIN 352/B [47]
Z6		<u>Strojní závitník do průchozí díry:</u> M6 HSSE DIN 371/B [47]
/		Digitální úchylkoměr Helios Preisser s magnetickým stojanem Dosahovaná přesnost: 0,005 mm [48]
TS 460		Dotyková sonda Heidenhain TS 460 pro standartní měření [49]
MK4		Pevný hrot MK4 60°, DIN 806 (Kužel Morse 4) [50]
/		Pilník dílenský plochý (30x6,5x300) [51]
RZ		Ruční záhlubník ke sražení hran otvorů NOGA NG3100 [52]

8.2. Výrobní postupy komponentů

8.2.1. Základna přípravku

Jelikož se základna přípravku upíná k pracovní desce stroje přes elektromagnet, musí její materiál disponovat feromagnetickými vlastnostmi, jak bylo vysvětlováno ve fázi návrhu. Za tímto účelem byl jako polotovar zvolen výpalek z běžné konstrukční oceli S235JR o rozměrech 202x202x25 mm, zahrnující přídavky na obrábění. Na základě výše zmíněných faktorů týkajících se magnetického upínání by zvolený polotovar měl zaručit pevné a bezpečné upnutí přípravku. Aby bylo docíleno ideální, geometricky přesné kontaktní plochy, byl polotovar v podobě čtvercové desky v první řadě obráběn na čelních stranách pro zajištění rovinnosti ploch a pro odstranění stop povrchové rzi. Tato operace byla provedena na konvenčním soustruhu typu SV 18 RA pomocí pravého ubíracího nože s vyměnitelnou břitovou destičkou. Deska byla upnuta do čtyřčelistového sklíčidla a přesně vyrovnána pomocí úchylkoměru pro minimalizaci čelního házení. Z bezpečnostních a částečně estetických důvodů byla pak základna frézována po svém obvodu na konvenční frézce FNGJ 40, pro odstranění viditelných stop po tepelném dělení. Po těchto operacích pak byly následně ještě ručně sraženy všechny ostré hrany pomocí dílenského pilníku.



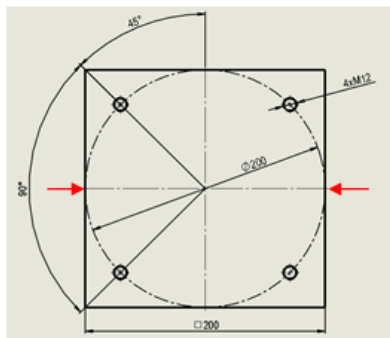
Obr. 41: Soustružení čelních ploch základny na konvenčním soustruhu SV 18 RA

ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ U12134		<h1>VÝROBNÍ POSTUP</h1>			List: 1 z 2			
Součást: ZÁKLADNA Číslo výkresu: 2020-09-01-01		Materiál: S235JR Polotovár: VÝPALEK (202x202x25)		Jméno: Bc. Jan Hušek				
Č. op.	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt / Popis práce	Nářadí	Řezné podmínky			
					v_c	f_{min}	a_p	i
5	Soustruh SV 18 RA							
		a	Upnout polotovár do čtyřčelistového skličidla s vnějšími čelistmi s opřením o čela čelistí.					
		b	Vyrovnat polotovár.					
		c	Zarovnat čelo s přísuvem 0,5 mm.	Digit. úchylkoměr SN-H	70	0,07	0,5	1
		d	Vyjmut polotovár.					
		e	Otočit polotovár a upnout do skličidla s dorazem obrobene plochy na čela čelistí.					
		f	Zarovnat druhé čelo s přísuvem 0,5 mm.	SN-H	70	0,07	0,5	1
		g	Vyjmut obrobek.					

Č. op.	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt / Popis práce	Nářadí	Řezné podmínky			
					v_c	f_z	a_e	i
10	Frézka FNGJ 40							
		a	Upnout polotovár do strojního svěráku.					
		b	Frézovat boční strany v délce 202 mm (osa Y), s přísuvem 24 mm a s hloubkou úběru 1 mm (osa X).	F1	80	0,05	1	1
		c	Vyjmut polotovár a pootočit o 90°.					
		d	Upnout polotovár do strojního svěráku.					
		e	Frézovat zbylé boční strany v délce 200 mm (osa Y), s přísuvem 24 mm a s hloubkou úběru 1 mm (osa X).	F1	80	0,05	1	1
		f	Vyjmut obrobek.					
15		a	Ručně srazit všechny ostré hrany pod úhlem 45° s upnutím ve strojním svěráku pracovního stolu.	Pilník dilenský plochý				

Posledním krokem bylo vyvrtání děr se závitem M12 pro upevnění závitových tyčí. Aby se docílilo snadnějšího a rychlejšího polohování byla tato operace provedena na CNC

frézce VMC 500. Pro stanovení středu obrobku a definování roztečné kružnice, na níž jsou díry polohovány, bylo využito dotykové sondy typu TS 460. Samotný vrtací cyklus byl pak ručně naprogramován pomocí jednoduchého několikařádkového NC programu, jehož struktura je popsána v následující kapitole 7.2.2. Jelikož daný CNC stroj nedisponuje vázanou synchronizací vřetene a osy Z, které je během řízeného procesu řezání vnitřních závitů zapotřebí, bylo pro tuto operaci využito radiální vrtačky VR 4. Zde se pomocí ocelového středícího trnu jednotlivě pro každou předvrtanou díru nastavila poloha vřetene s výsuvnou pinolou, do něhož byl po vystředění upnut strojní závitník M6 a následně vytvořen průchozí závit.

Č. op.	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt / Popis práce	Nářadí	Řezné podmínky			
					v_c	f_{ot}	a_p	i
20	CNC frézka VMC 500		 <p>a Upnout polotovár do strojního svěráku. b Definovat počátek souřadného systému ve středu součásti ve vzdálenosti 5 mm od čela. c Vrtat 4x průchozí díru $\varnothing 10,2$ mm na roztečné kružnici $\varnothing 200$ mm, s pravidelnou roztečí děr 90°. d Vymout obrobek.</p>	Sonda TS 460 V10,2	20	0,1	24	4
25	Radiální vrtačka VR 4		<p>a Upnout polotovár do strojního svěráku. b Vystředit vřeteno s předvrtaným otvorem $\varnothing 10,2$ mm. c Do předvrtaných děr $\varnothing 10,2$ mm řezat závit M12. d Vymout obrobek ze strojního svěráku.</p>	Pevný hrot MK 4 Z12	1,5			4

8.2.2. Svěrné příruby

Jako polotovary pro příruby byly navrženy rotační hrubé výpalky s přídávkem na obrábění na největším průměru. Příruby s průřezem mezikruží byly upnuty za vnitřní průměr 150 mm do čtyřčelistového sklíčidla na konvenčním soustruhu, kde byl v první řadě na čisto obráběn vnější průměr pro zajištění kruhovitosti. Následně se pak stranovým ubíracím nožem vytvořilo osazení do předepsané hloubky a srazily všechny

hrany pod úhlem 45°. Detailní výrobní postupy obou přírub s použitými reznými podmínkami jsou uvedeny níže.

ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ U12134		<h2 style="text-align: center;">VÝROBNÍ POSTUP</h2>			List: 1 z 2				
Součást: HORNÍ PŘÍRUBA Číslo výkresu: 2020-09-01-04		Materiál: S235JR Polotovár: VÝPALEK (ø278x10)			Jméno: Bc. Jan Hušek				
Č. op.	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt / Popis práce	Nářadí	Řezné podmínky				
					v_c	f	a_p	i	
5	Soustruh SV 18 RA								
		a	Upnout polotovár do čtyřčelistového sklíčidla za vnitřní průměr 150 mm s opřením o čela čelistí.						
		b	Soustružit nahrubo ø278 mm na ø276,5 mm po celé délce.	SN-H	120	0,07	0,5	3	
		c	Soustružit načisto ø276,5 mm na ø276 mm po celé délce.	SN-Č	120	0,1	0,5	1	
		d	Soustružit nahrubo ø276 mm na ø272 mm v délce 5 mm.	SN-H	120	0,07	2	2	
		e	Soustružit načisto ø272 mm na ø271 mm v délce 5 mm a zarovnat osazení k ø276 mm.	SN-Č	120	0,1	1	1	
		f	Srazit všechny hrany vnějších průměrů pod úhlem 45°.	SN-Č					
		g	Vyjmout obrobek.						

Jak vyplývá z návrhu, tak stěžejním prvkem při výrobě těchto přírub je přesné polohování pro díry se závitem M6 vůči čtyřem průchozím díram o průměru 14 mm. Vzhledem k celkovému množství vrtaných děr, kterých se na jedné přírubě nachází dvaadvacet, byla jejich výroba provedena opět na CNC řízené frézce, stejně jako tomu bylo při výrobě základny. Vzhledem k obecné nenáročnosti dané operace, vyžadující jednoduchý NC program, se stroj nastavil za pomoci dílenského programování. Pro stanovení souřadného systému ve středu příruby bylo opět využito dotykové sondy, kterou se stanovila poloha osy rotace polotovaru, a tím byl vytyčen nulový bod v ose X a Y. Pro kompletní definici se v bezpečné vzdálenosti od čela příruby ještě určila

souřadnice v ose Z. Definovaný nulový bod byl pomůckou pro následné určení roztečných kružnic. Příslušné NC kódy (systém Acramatic 2100) pro zmíněné dva typy vrtaných otvorů, založené na vrtacích cyklech, jsou uvedeny níže v tabulkách 6 a 7.

Tab. 6: Dílenské programování vrtacího cyklu 4x Ø14 mm v horní přírubě

G39	G90	P45	D200	K4	O360
G81	G90	Z16	R0	W50	f60
G37					

Tab. 7: Dílenské programování vrtacího cyklu 18x Ø5 mm v horní přírubě

G39	G90	P-11,98	D255	K17	O324,96
G81	G90	Z16	R0	W50	f60
G37					

- G39 ... Kruhová předloha. Vzorová funkce pro stanovení pozic vrtaných otvorů s pravidelnou úhlovou roztečí, na roztečné kružnici daného průměru.
- G90 ... Absolutní programování (programování od stanoveného nulového bodu).
- P ... První provozní úhel [°] (úhlová vzdálenost mezi první vrtaným otvorem a zvolenou osou určeného souřadného systému).
- D ... Průměr roztečné kružnice vrtaných otvorů [mm].
- K ... Počet vrtaných otvorů.
- O ... Úhel mezi prvním a posledním vrtaným otvorem [°].
- G81 ... Vrtací cyklus.
- Z ... Hloubka vrtaného otvoru [mm].
- R ... Hladina rychloposuvu vztahená k stanovenému souřadnému systému [mm].
- W ... Hloubka otvoru vrtaná najednou [mm]
- f ... Strojní posuv [mm/min].
- G37 ... Ukončení předlohy.

Následné řezání závitů pak bylo provedeno, stejně jako při výrobě základny, na uvedené radiální vrtačce VR 4 s využitím obdobného výrobního postupu (spočívající v postupném středění vřetena vůči jednotlivým předvrtaným otvorům), který je uveden níže.

Č. op.	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt / Popis práce	Nářadí	Řezné podmínky			
					v_c	f_{ot}	a_p	i
10	CNC frézka VMC 500							
10	CNC frézka VMC 500	a	Upnout do čtyřčelistového sklíčidla za vnitřní průměr 150 mm s opěním neosazené strany o čela čelistí.	TS 460	25	0,1	10	4
	b	Definovat počátek souřadného systému na ose rotace ve vzdálenosti 5 mm od čela.						
	c	Vrtat 4x průchozí díru o $\varnothing 14$ mm na roztečné kružnici $\varnothing 200$ mm s pravidelnou roztečí děr 90° .	V14					
	d	Vrtat 17x průchozí díru o $\varnothing 5$ mm na roztečné kružnici $\varnothing 255$ mm s pravidelnou roztečí $20,31^\circ$.	V5					
	e	Vrtat průchozí díru o $\varnothing 5$ mm na roztečné kružnici $\varnothing 255$ mm s pozicí $11,98^\circ$ od svislé osy (Y).	V5					
	f	Vyjmout obrobek.						
15	Radiální vrtačka VR 4	a	Upnout do tříčelistového sklíčidla za vnitřní průměr 150 mm s opěním osazené strany o čela čelistí.	MK4 Z6	1,5			18
	b	Vystředit vřeteno s předvrtaným otvorem $\varnothing 5$ mm.						
	c	Řezat 18x průchozí závit M6 do předvrtaných děr $\varnothing 5$ mm na roztečné kružnici $\varnothing 255$ mm.						
	d	Vyjmout obrobek.						



Obr. 42: Vrtání děr příruby ($\varnothing 13$ mm) na CNC frézce VMC 500



Obr. 43: Řezání závitů M6 do předvrtaných děr v přírubě na radiální vrtačce VR 4

Výrobní postup pro dolní svěrnou přírubu vyžadoval stejné technologické operace se stejnými nástroji, jako u výše uváděné horní příruby. Rozdíly jsou zde pouze rozměrové, s důrazem především na pozicování vrtaných děr se závitem M6.

ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ U12134		<h1>VÝROBNÍ POSTUP</h1>			List: 1 z 2											
Součást: DOLNÍ PŘÍRUBA		Materiál: S235JR			Jméno: Bc. Jan Hušek											
Číslo výkresu: 2020-09-01-03		Polotovar: VÝPALEK (ø278x10)														
Č. op.	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt / Popis práce	Nářadí	Řezné podmínky											
					v_c	f	a_p	i								
5		a	Upnout do čtyřčelistového sklíčidla za vnitřní průměr 150 mm s opřením o čela čelistí.													
		b	Soustružit nahrubo ø278 mm na ø276,5 mm po celé délce.	SN-H	120	0,07	0,5	3								
		c	Soustružit načisto ø276,5 mm na ø276 mm po celé délce.	SN-Č	120	0,1	0,5	1								
		d	Soustružit nahrubo ø276 mm na ø267 mm v délce 4 mm.	SN-H	120	0,07	1,5	6								
		e	Soustružit načisto ø267 mm na ø266 mm v délce 4 mm a zarovnat osazení k ø276 mm.	SN-Č	120	0,1	1	1								
		f	Vyjmout obrobek.													
Č. op.	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt / Popis práce	Nářadí	Řezné podmínky											
					v_c	f_{ot}	a_p	i								
10	CNC frézka VMC 500															
										a	Upnout do čtyřčelistového sklíčidla za vnitřní průměr 150 mm s opřením osazené strany o čela čelistí.					
										b	Definovat počátek souřadného systému na ose rotace ve vzdálenosti 5 mm od čela.	TS 460				
										c	Vrtat 4x průchozí díru o ø14 mm na roztečné kružnici ø200 mm s pravidelnou roztečí děr 90°.	V10,2	25	0,1	10	4
										d	Vrtat 17x průchozí díru o ø5 mm na roztečné kružnici ø255 mm s pravidelnou roztečí 20,31°.	V5	12	0,1	10	17
										e	Vrtat průchozí díru o ø5 mm na roztečné kružnici ø255 mm s pozicí -16,87° od svislé osy (Y).	V5	12	0,1	10	1
f	Vyjmout obrobek.															
15	Radiální vrtačka VR 4	a	Upnout do tříčelistového sklíčidla za vnitřní průměr 150 mm s opřením osazené strany o čela čelistí.	MK 4 Z6	1,5			18								
			b						Vystředit vřeteno s předvrtaným otvorem ø5 mm.							
			c						Řezat 18x průchozí závit M6 do předvrtaných děr ø5 mm na roztečné kružnici ø255 mm.							
			d						Vyjmout obrobek.							

8.2.3. Komponenty z normalizovaných polotovarů

Pro část přípravku spojující základnu s přírubami, tvořenou distančními trubkami a závitovými tyčemi, byly zvoleny normalizované polotovary. Ty byly objednány společně se spojovacím materiálem od firmy AKROS, distribuující výrobky z široké nabídky korozivzdorných ocelí. V případě zde použitých závitových tyčí se jedná o materiál ČSN 17 240 (1.4301). Pro zvolené tenkostěnné trubky byla pak k dostání ocel ČSN 17 248 (1.4541). Distanční trubky slouží pro vymezení výšky rozvaděče nad základnou a nesou celkovou zátěž těla přípravku. Pro tento díl byl využit hutní polotovar v podobě bezešvé, za studena tažené trubky ČSN EN 10305-1 s vnitřním průměrem 12 mm o tloušťce stěny 2 mm, která je z hlediska únosnosti postačující. Při sestavě jsou tyto komponenty nasunuty na závitové tyče M12, kde je vzhledem k mezním rozměrům velkého průměru závitu, které jsou menší než rozměr jmenovitý, zaručeno požadované uložení s vůlí. Normalizované polotovary v délce jednoho metru bylo potřeba pouze zarovnat na přesné délky (v případě trubek stanovenou na 80 mm) pro zachování rovnoběžnosti základny a dolní příruby. Dělení materiálu bylo provedeno na výše uvedeném konvenčním soustruhu pomocí upichovacího nože s VBD.

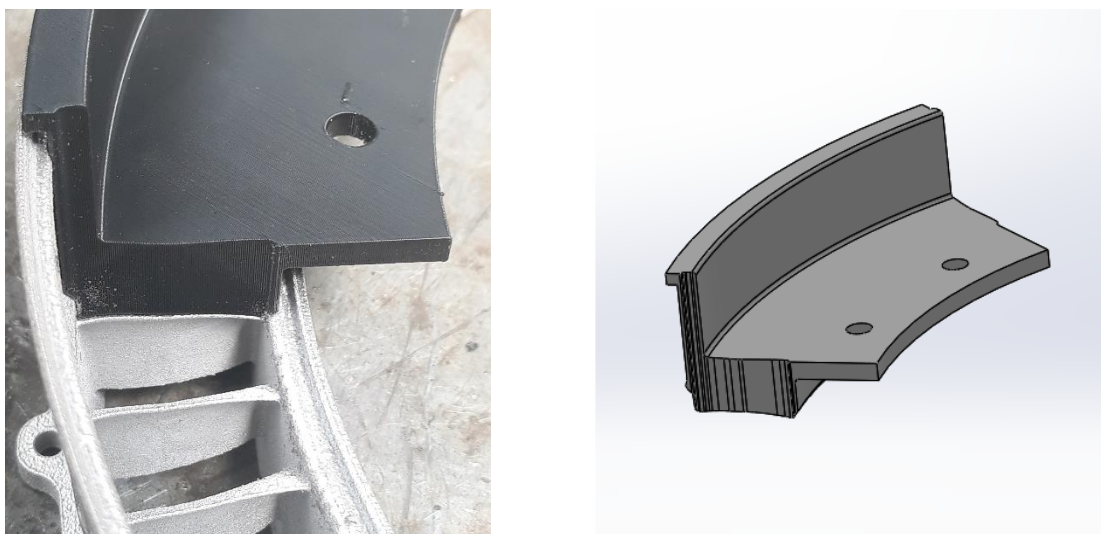
ČVUT v Praze FAKULTA STROJNÍ U12134		VÝROBNÍ POSTUP			List: 1 z 1			
Součást: DISTANČNÍ TRUBKA		Materiál: ČSN 17 248			Jméno: Bc. Jan Hušek			
Číslo výkresu: 2020-09-01-02		Polotovar: ø16x2-1000 EN 10305-1						
Č. op.	Pracoviště (stroj)	Úsek	Náčrt / Popis práce	Nářadí	Řezné podmínky			
					v_c	f	a_p	i
5	Soustruh SV 18 RA		<p>a Úpnout polotovar do čtyřčelistového sklíčidla za vnější průměr 16 mm se vzdáleností 90 mm od čela čelistí. b Zarovnat čelo. c Upíchnout ve vzdálenosti 80 mm od čela součásti. d Uvolnit polotovar. e Opakovat úseky (a až d) celkem 4x.</p>	SN-H SN-U	60 60	0,1	0,5	1
10		a	Ručně srazit vnitřní ostré hrany pod úhlem 45°.	RZ 90°				

8.2.4. Maskovací segmenty

Pro výrobu maskovacích segmentů bylo využito technologie FDM (Fused deposition modeling), která byla vyvinuta společností Stratysys již na konci minulého století. Technologie FDM patří společně s metodou SLA (Stereolitografie), založené na vytvrzování fotopolymerů, a s historicky mladší technologií PolyJet Matrix mezi nejužívanější technologie v odvětví 3D tisku plastových dílů. Princip FDM je založen na přeměně vstupního (modelovacího) materiálu, kterým je termoplastický polymer ve formě struny (tzv. filament), definovaného průměru a délky, navinutého na cívce. Přeměna materiálu, jenž má tvořit budoucí výrobek, je provedena skrze tavení této struny do polotekutého (kaučkovitého) stavu. Struna se postupně odvíjí z cívky a následně prochází pohybující se tiskovou (extruzní) hlavou, která po jednotlivých vrstvách definované tloušťky, mající tvar průřezu aktuální hladiny vyráběné součásti, modeluje budoucí výrobek. Technologie FDM je schopna vytvořit i geometricky velmi náročné díly. Aby však u těchto dílů nedocházelo k zborcení konstrukce modelu, využívá se zde tak zvaného podpůrného materiálu, který je nanášen skrze vlastní trysku, společně s modelovacím materiálem, a umožňuje stavbu pomocných podpor, jež jsou po skončení procesu odstraněny. Podpůrný materiál vykazuje obecně horší pevnostní vlastnosti než modelovací materiál, avšak musí být zaručena dostatečná vzájemná adheze. Jeho odstranění od výrobku se provádí buď mechanicky, anebo chemicky. Chemické odstraňování se uskutečňuje ponořením výrobku s podporami do lázně daného chemického složení dle typu materiálů, která je pro zvýšení rychlosti úběru podpůrného materiálu předeřívána.

Před finální výrobou kompletní sestavy krytů byla nejdříve vytisknuta zkušební dvojice protilehlých segmentů. Na následujícím obrázku je znázorněno usazení zkušebního vzorku dolního maskovacího segmentu (s příslušným modelem) k prstenci rozvaděče. V detailu nebyly patrné žádné kolize způsobující vznik nepřijatelné vůle mezi hranou lopatek a příslušnou dosedací plochou. Nepatrná mezera mezi horním lemlem rozvaděče a horní dosedací plochou dolního krytu, jenž je patrná z obrázku 44 vlevo, bude snadno řešitelná při konečné montáži skrze přitažení segmentu pomocí uvedených šroubů M6.

Pro vzorky byla zvolena, z přednastavených hodnot stroje STRATASYS F370, tloušťka vrstvy 0,2440 mm. Menší tloušťka vrstvy samozřejmě umožňuje vyšší tvarovou přesnost a hladší povrch, avšak na úkor toho se zásadně zvyšuje doba tisku. Z ekonomických důvodů a časové náročnosti nebyly segmenty tisknuty z plného materiálu, ale pro zachování tuhosti modelu byla zvolena vnitřní struktura o vysoké hustotě s výplňovým úhlem 45° s tloušťkou stěny 1 mm.

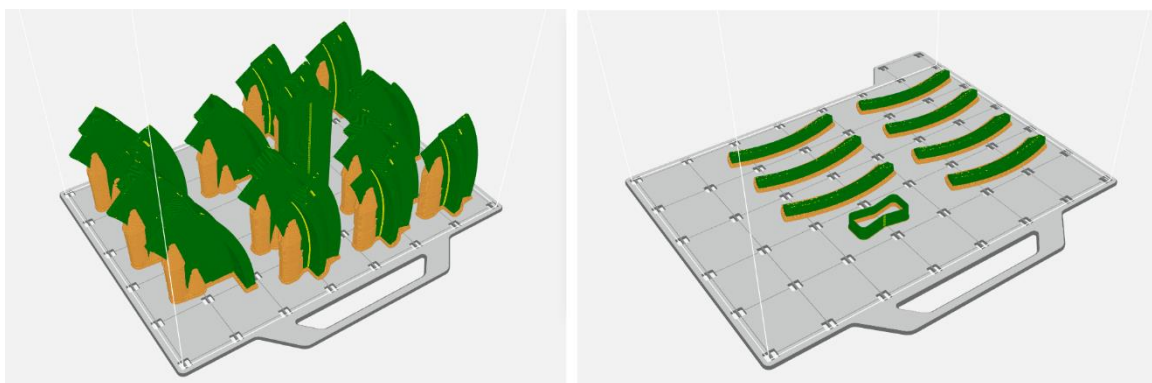


Obr. 44 vlevo: Usazení zkušební vzorku dolního segmentu na prstenec rozvaděče
vpravo: CAD model odpovídajícího dolního maskovacího segmentu

Na obrázku 45 je pak vygenerován výsledek již finální simulace, znázorňující návrh pro rozmístění všech zbylých maskovacích segmentů ze zvoleného materiálu ABS-M30 (zeleně vykresleny) na tiskové podložce. Díky softwaru GrabCAD Print byly automaticky vygenerovány podpěry z daného podpůrného materiálu QSR (oranžově vykresleny). Při polohování a určování orientace tisknutého dílu vzhledem k rovině podložky, od níž budou jednotlivé vrstvy nanášeny, bylo nezbytné dodržet několik základních pravidel.

Orientace dílu v prostoru o souřadném systému tiskárny by měla být taková, aby se minimalizovalo množství podpůrného materiálu, který pak může v případě následného mechanického oddělování způsobit drobné defekty na samotném výrobku. V případě převisů modelu, přesahujících kritickou hodnotu 45°, je však konstrukce podpor

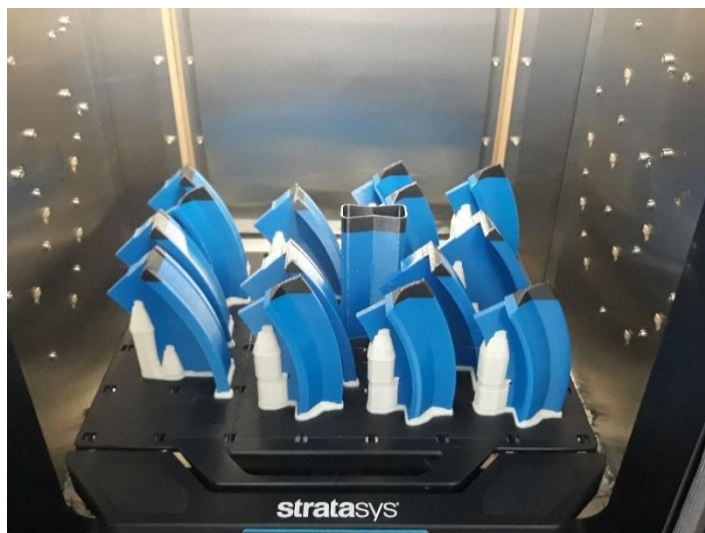
nevyhnutelná, neboť by došlo ke zborcení sestavy. Obecně větší převisy předurčují snížení přesnosti modelu, která je však závislá i na vlastnostech tisknutého materiálu. Model by zároveň neměl překrývat zámky podložky, pokud to není nezbytné, jako například v případech rozměrnějších dílů. Jelikož je přesnost výrobku často ovlivněna svou orientací při tisku, bylo nutné stanovit polohu krytů především s ohledem na jejich dosedací plochu k prstenci rozvaděče a na otvory, sloužící pro jejich upevnění k přírubám. Vzhledem ke kaskádovitému tvaru, zejména dolního segmentu, byla nakonec zvolena poloha dle obrázku 45 vlevo. Tato volba obnáší, že jednotlivé segmenty budou tvořit převis 40°, který by však měl být vzhledem k přesnosti bezpečný. U dolní části děleného segmentu (obrázek 45 vpravo) bylo pak orientování dílů, vzhledem k minimalizaci podpor a zachování přesnosti, již jednoznačné.



Obr. 45: Simulace stavby a rozmístění tisknutých dílů v softwaru GrabCAD Print

Ačkoli samotná výroba maskovacích segmentů probíhala samostatně bez jakýchkoliv zásahů do procesu, z časového hlediska byla nejnáročnější. Jak z pohledu samotné konstrukce návrhu, tak z pohledu celkového strojního času. Celková doba tisku všech segmentů, které musely být vzhledem ke svému počtu rozděleny na dvě tiskové jednotky, byla softwarem stanovena na 35 hodin a 19 minut. Ve skutečnosti však tato doba byla ještě navýšena z důvodu nutného procesu předehřívání pracovního prostoru tiskárny. Ihned po ukončení procesu tisku byla podložka se segmenty demontována z tiskárny a následně od ní byly ještě za tepla odděleny jednotlivé kryty. Vzhledem k tomu, že segmenty neobsahují žádná problematická místa v podobě malých a dlouhých dutin, či úzkých drážek, byl podpurný materiál snadno odstraněn mechanicky

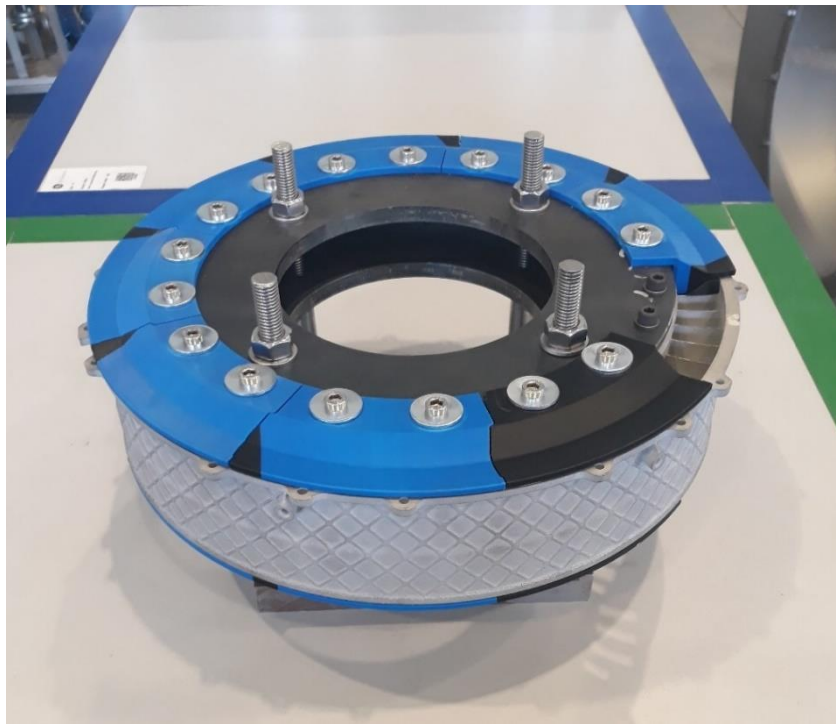
za pomoci ručního nářadí. V opačném případě by za dané kombinace modelovacího a podpůrného materiálu byla použita lázeň koncentrovaného hydroxidu sodného, přehřátá na teplotu 50 až 60 °C, ve které ABS nepodléhá degradačním procesům, zatímco podpůrné QSR je zde rozpouštěno.



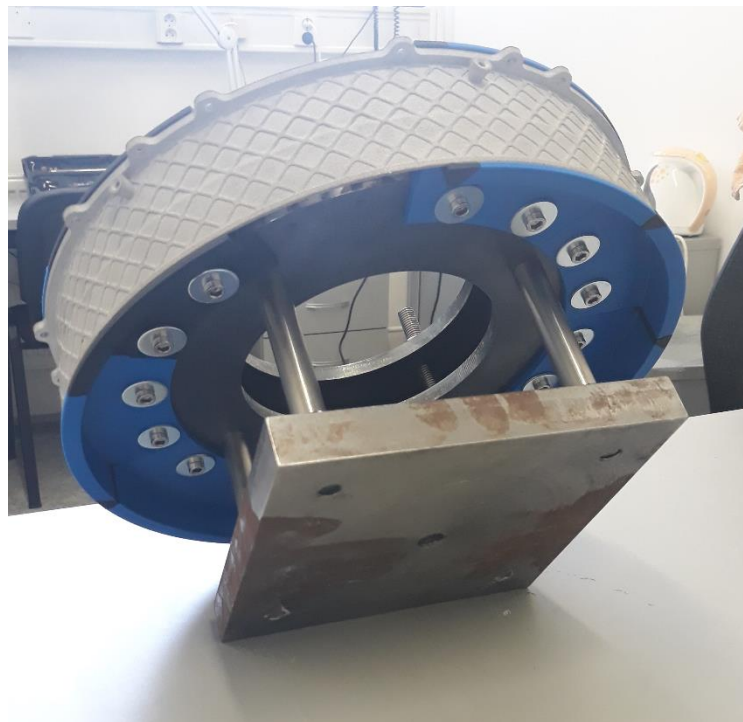
Obr. 46: Tisk navržených maskovacích segmentů

8.3. Montáž přípravku

Během montáže byly zjištěny drobné nepřesnosti způsobené při procesu 3D tisku. Mezi jednotlivými segmenty byly náhodně zpozorovány spáry, které přesahovaly kritickou hodnotu, danou průměrnou tloušťkou kovového tělíska procesního média. Na lokálních místech byla také zjištěna malá vůle v prostoru mezi částmi děleného segmentu. Z těchto důvodů byla lokalizovaná místa utěsněna pomocí pryžové pěny, a zajistila se tak návaznost sousedních krytů a pevné a nepropustné spojení dělených segmentů. U nemaskované části přípravku bylo dále důležité utěsnit (pomocí šroubů a podložek) příslušné díry se závitem M6 v přírubách. Pokud by nebyly tyto volné závity zakryty, byly by během omílacího procesu znehodnoceny (stržením závitu, nebo ucpáním otvoru) vlivem proudícího procesního média a část přípravku by tak již nemohla být v dalších cyklech použitelná pro zamaskování rozvaděče. Výsledná sestava přípravku je znázorněna na níže uvedených obrázcích.



Obr. 47: Sestava přípravku před prvním leštícím procesem



Obr. 48: Sestava přípravku s pohledem na dolní uchycení krytů

9. Aplikace do procesu strojního leštění

Stěžejní problematikou při leštění dílů z tisknutých kovových slitin, v případě zde řešeného rozvaděče z niklové slitiny inconel 718, je jejich velmi vysoká hodnota drsnosti povrchu v porovnání s obrobky frézovanými na CNC strojích. Z tohoto důvodu si omílací proces žádá daleko vyšší strojní čas, vzhledem k výchozí drsnosti povrchu lopatek rozvaděče, která se obecně pohybuje v rozmezí hodnot Ra 15 až 25. Jelikož nebyly známy použitelné nastavovací parametry stroje LPG1 s ohledem na specifický typ součásti, musely být určeny na základě výsledků dříve provedených leštících procesů, jenž byly aplikovány na různé typy lopatkových kol vyráběných však technologií třískového obrábění. Z tohoto důvodu slouží první proces omílání pouze k odladění parametrů pro nastavení stroje a k ověření funkčnosti a odolnosti přípravku, jenž bude vystaven společně s rozvaděčem provozním podmínkám stroje. Ku příkladu pro obráběná kompresorová lopatková kola vyrobená z titanových slitin je doporučená doba leštění v daném stroji 2 až 2,5 hodiny. Tato doba se samozřejmě mění v závislosti na použitém množství a typu abraziva. S uvážením tohoto strojního času v souvislosti s drsností povrchu obráběných dílů byla pro řešený aditivně vyráběný rozvaděč stanovena doba procesu na trojnásobek, tedy na 6 hodin.

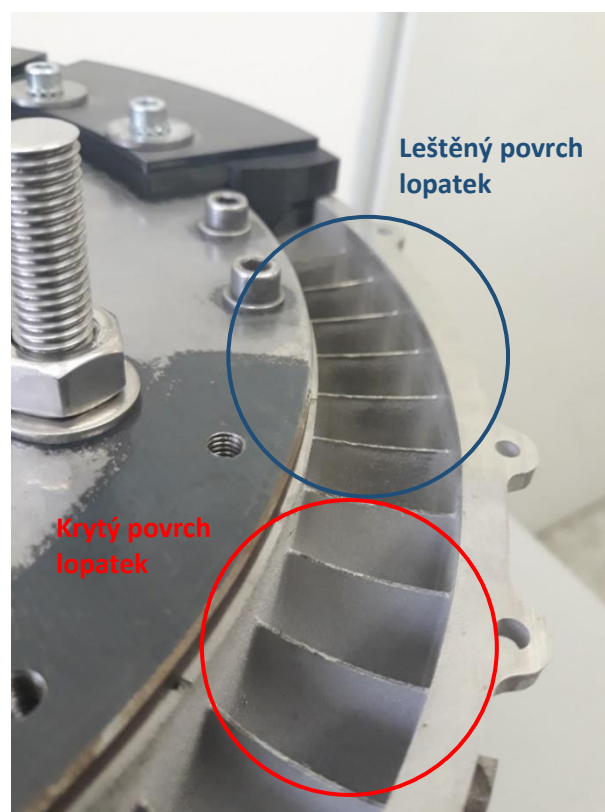


Obr. 49: Usazení přípravku do stroje LPG1 (pohled shora na magnetickou desku)

Po uložení a připevnění přípravku na magnetickou desku byl pracovní prostor shora zasypán měděnými třískami do výšky zhruba 150 mm nad přípravkem. Tato kovová tělíska pak byla smíchána s vodou a s kapalným médiem, zajišťujícím antikorozi odolnost sestavy. Poslední přidanou složkou procesního média pak byly samotné abrazivní částice v podobě korundového prášku. V konečném kroku se pak nastavilo cyklování procesu (popisované v kapitole 4.6.1.). Při zvolené patnácti minutové délce cyklu tak vychází celkový počet střídajících se cyklů na 24.

9.1. Vyhodnocení

Výsledky po prvním omílacím procesu byly bohužel neuspokojivé. Zjistilo se, že strojní čas ve velikosti šesti hodin není zdaleka dostačující pro dosažení požadované drsnosti povrchu lopatek Ra 0,1. Patrná byla i nežádoucí nerovnoměrnost úběru napříč povrchem leštěného dílu. Jedná se zejména o přechodové rádiusy nacházející se v místech styku lopatky s vnitřní a vnější stěnou prstence (tzv. pata lopatky).

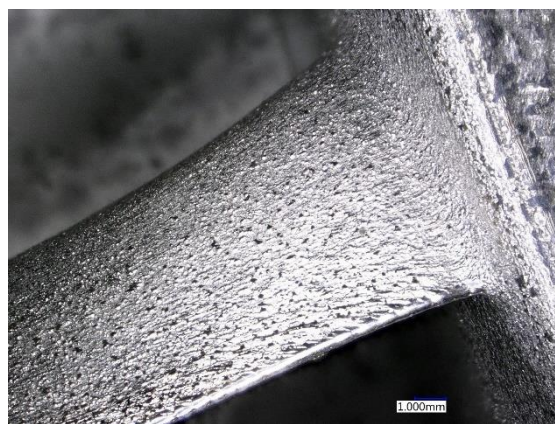


Obr. 50: Výsledek leštícího procesu po prvních cyklech

Na výše uvedeném obrázku jsou v modře ohraničeném prostoru znázorněny lopatky vystavené procesnímu médiu (odkrytá část prstence), na kterých je viditelné pouze velmi malé snížení drsnosti povrchu. V červeně ohraničeném prostoru jsou pak znázorněny lopatky s výchozí jakostí danou technologií výroby, tedy maskovaná část přípravku. Přesnější a názornější pohled však udávají obrázky níže, na kterých jsou zobrazeny snímky pořízené digitálním mikroskopem, zachycující plochu hřbetu lopatky při dvacetinásobném zvětšení.



Obr. 51: Jakost povrchu (hřbetu) lopatky rozvaděče po 3D tisku (výchozí stav)



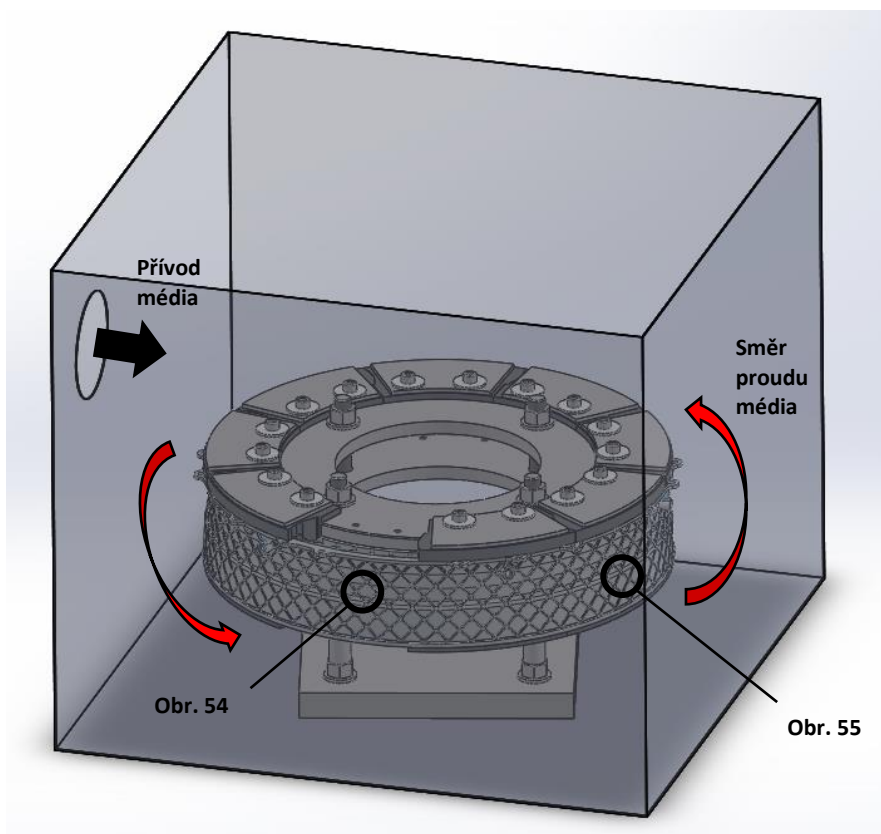
Obr. 52: Jakost povrchu (hřbetu) lopatky rozvaděče po 1. procesu leštění

Zásadní problém se však objevil i v samotném řešení přípravku. Konkrétně v konstrukci a upevnění maskovacích segmentů. Ačkoli segmenty splnily požadavek na utěsnění, neboť nebyl zpozorován průnik kovových tělísek do zakrytých prostorů, tak z hlediska pevnostních vlastností segmentů nebyly výsledky pozitivní. Během procesu, který je založen na vibracích pracovního boxu o určitém kmitočtu, jenž způsobuje proudění procesního média, došlo k uvolnění matic stahujících plastové kryty k přírubě. To pak mělo za následek vychýlení uvolněných segmentů ze své původní pozice, které pak umožnilo proudící hmotě kovových tělísek plasticky deformovat problematická místa těchto součástí, jako jsou zejména zúžené stěny o velké čelní ploše. Vzniklé tlakové a ohybové namáhání způsobené hmotou třísek společně s teplotou tak zcela zdeformovaly uvolněné segmenty. Teplota, která během procesu přesahovala hodnotu 80 °C, byla asi největším problémem pro plastové kryty přípravku.

9.2. Nutné úpravy a optimalizace

Z hlediska optimalizace pracovních podmínek bylo především nutné zvýšit množství cyklů, které však z důvodu trvanlivosti materiálu maskovacích segmentů nesmí přesáhnout celkový čas tří hodin. Během této doby se neočekává tak kritické zvýšení teploty, aby docházelo k urychlování degradace daného materiálu krytů. Po maximálně tříhodinových intervalech tak bude vždy nutné nechat celý pracovní prostor vychladnout, což bude příčinou velkého nárůstu celkového strojního času. Druhou variantou je využití možnosti integrovaného přečerpávajícího a filtračního zařízení. V tomto případě by se vždy po stanoveném čase (například po dvou cyklech) automaticky zastavil celý proces za účelem přečerpání kapalně složky procesního média, která bude nahrazena stejnou směsí v daném objemu, uchovávanou v zásobníku. Během přečerpávání kapalně směsi se postupně ochlazuje celý pracovní prostor, včetně kovových tělísek a komponentů přípravku. Po doplnění je pak opět automaticky spuštěn leštící proces. Nevýhodou této varianty je však nutnost postupného doplňování jemnozrnného abraziva, které je z části odplavováno během filtrace.

Již na základě prvního procesu byly z lokálních míst vnější stěny rozvaděče, ale i třeba některých komponentů přípravku, patrné výrazné změny jakosti povrchu, které jsou ovlivněny směrem proudu procesního média v závislosti na orientaci dané části rozvaděče v pracovním prostoru. Tyto rozdíly v intenzitě úběru se pak samozřejmě odráží i na povrchových plochách samotných lopatek. Bylo zjištěno, že v přímém směru proudu abraziva, které se točí ve smyčce znázorněné na obrázku 53 pomocí červených šipek, je intenzita úběru vůči daným plochám vnější obvodové stěny rozvaděče větší. U povrchu lopatek, které jsou orientovány ve směru kolmém vůči stěnám prstence, tomu však bude naopak a intenzita úběru bude největší při orientaci nekrytých lopatek dle obrázku 53 (případně při odkrytí protějšících maskovacích segmentů vůči výchozímu). V případě leštění všech lopatek současně se míra intenzity úběru dá do jisté míry vyřešit i zvýšením celkového času omílacího procesu, bez výrazného řešení orientace dílu v pracovním prostoru stroje.

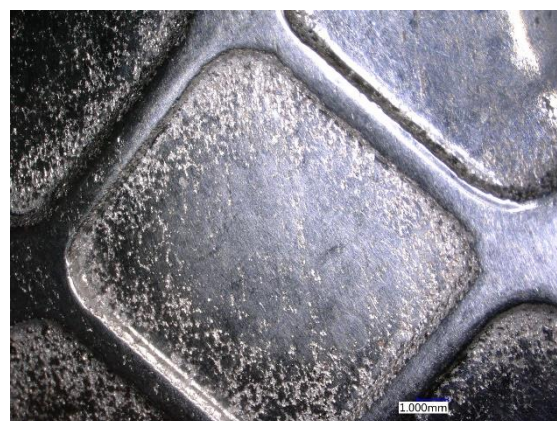


Obr. 53: Směr proudu média v pracovním prostoru stroje LPG1 a jeho vliv na jakost povrchu rozvaděče

Na níže uvedených obrázcích jsou znázorněny snímky pořízené digitálním mikroskopem znázorňující povrch vnější stěny rozvaděče (při dvacetinásobném zvětšení), jehož jakost je závislá na orientaci přípravku v pracovním prostoru stroje LPG1, jak je schematicky znázorněno na modelu v obrázku 53.

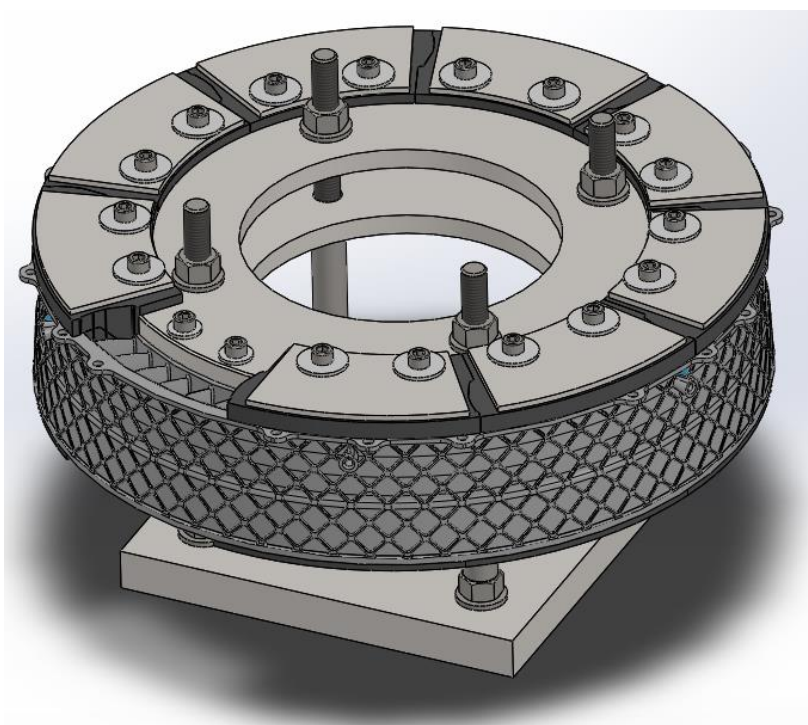


Obr. 54: Jakost povrchu hůře orientované vnější stěny rozvaděče



Obr. 55: Jakost povrchu ideálně orientované vnější stěny rozvaděče

Po optimalizaci procesních parametrů bylo nutné provést úpravy pro zvýšení životnosti maskovacích segmentů. Dle výše popsaných závěrů, zohledňujících provozní podmínky omílacího procesu, byl nalezen hlavní problém ve způsobu upevnění maskovacích segmentů, jejichž materiál není schopen snést tlakové napětí vyvozené skrze utahování šroubu M6 přes závit v ocelové přírubě. Jako řešení se tedy naskytlo zvětšení pevnější styčné plochy mezi plastovým krytem a hlavou šroubu ve formě ocelové vložky. To bylo realizováno pomocí přídavných výpalků o tloušťce 3 mm s tvarem kopírující půdorys maskovacího segmentu (tvar kruhové výseče). Styčná plocha v prvním případě užití velkoplošné podložky není dostačující proto, aby bylo vyvozeno požadovaného předpětí ve šroubovém spoji. Jelikož je ABS relativně měkký materiál, tlak šroubů způsobil jeho plastickou deformaci (vtlačení ocelové podložky do plastového segmentu), která za působení následných vibrací od pohonu omílacího stroje přispěla k uvolnění šroubového spoje. Pro zvýšení stykové plochy mezi ocelovou vložkou a plastovým krytem, a zároveň pro zvýšení tuhosti horního maskovacího segmentu byl dále upraven i tento segment. Tato úprava spočívala ve zvětšení tloušťky horní dosedací plochy krytu a jeho zarovnání do rovinné plochy. Na níže uvedeném obrázku je znázorněn optimalizovaný model sestavy přípravku s aplikovanými ocelovými vložkami, kde je patrné zvýšení tuhosti upnutí horních maskovacích krytů. Z ekonomických důvodů byly však pro druhou montáž využity i některé segmenty, které nepodlehly degradaci během prvního procesu omílání, jak je patrné na obrázku 57. Na straně 77 je pak znázorněn kusovník finální sestavy přípravku s odkazem na výrobní výkresy, které jsou k nahlédnutí v přílohách této práce.



Obr. 56: Optimalizace CAD modelu sestavy přípravku



Obr. 57: Sestava optimalizovaného přípravku před druhým procesem omílání



Tab. 8: Kusovník sestavy přípravku po optimalizaci

Položka	Název	Č. výkresu - č. normy	Hmotnost [kg]	Množství
	Polotovar		Materiál vchozí	
1	Rozvaděč	-		1
		Inconel 718		
2	Základna	2020-09-01-01	7,426	1
	Výpalek	S235JR		
3	Dolní Příruba	2020-09-01-03	3,083	1
	Výpalek	S235JR		
4	Horní Příruba	2020-09-01-04	3,213	1
	Výpalek	S235JR		
5	Vložka dolního krytu	2020-09-01-07	85,410	8
	Výpalek	S235JR	g	
6	Vložka horního krytu	2020-09-01-06	107,370	8
	Výpalek	S235JR	q	
7	Dolní Maskovací Segment	2020-09-01-08	77,620	8
	FDM tisková struna ϕ 1,75 mm	ABS-M30	g	
8	Horní Maskovací Segment - Část 1	2020-09-01-09	54,330	8
	FDM tisková struna ϕ 1,75 mm	ABS-M30	q	
9	Horní Maskovací segment - Část 2	2020-09-01-10	10,430	8
	FDM tisková struna ϕ 1,75 mm	ABS-M30	q	
10	Distanční trubka	2020-09-01-02	55,600	4
	16x2x82 ČSN EN 10305-1	ČSN 17 248 (1.4541)	q	
11	Závitová tyč	2020-09-01-05	178,400	4
	Závitová tyč M12x1000 DIN 976/A2	ČSN 17 240 (1.4301)	q	
12	Šroub M6x20 DIN 912/A2	-		32
		ČSN 17 248 (1.4541)		
13	Šroub M6x10 DIN 912/A2	-		4
		ČSN 17 248 (1.4541)		
14	Matice M12 DIN 934/A2	-		8
		ČSN 17 248 (1.4541)		
15	Podložka 13 DIN 125/A2	-		8
		ČSN 17 248 (1.4541)		
16	Podložka Velkoplošná 6,4 AN 9054/A2	-		32
		ČSN 17 248 (1.4541)		
17	Podložka 6,4 DIN 433/A2	-		4
		ČSN 17 248 (1.4541)		
18				
19				
20				

Index	Změna			Datum		Podpisy	
	Podpis	Datum	Norm. ref.	Podpis	Datum	Č. svítku:	
Vypracov:	Jan Hušek					Mikrofilm	
Skupině:			Přezk.			Sestava	2020-09-01-00
Technol:			Schválil			Hmotn. [kg]	

<p>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</p> <p>FAKULTA STROJNÍ</p>	NÁZEV:	Přípravek - Rozvaděč
	ČÍSLO KUSOVNIKU:	2020-09-01-00

LIST: 1/1

9.3. Vyhodnocení po optimalizaci

Po druhém leštícím procesu se již docílilo výrazně lepších výsledků. Díky optimalizaci vybraných konstrukčních prvků byl již přípravek odolný vůči provozním vlivům stroje LPG1, čímž byla zaručena jeho spolehlivost. Strojní čas druhého procesu, který se opět skládal ze součtu střídajících se patnáctiminutových cyklů, byl nyní stanoven na 10 hodin. S uvážením doby, po kterou byly vybrané lopatky vystaveny procesnímu médiu během prvního procesu, byla pak tedy skutečná celková doba leštění rovných 16 hodin. Na níže uvedených obrázcích je znázorněn rozdíl obdržené jakosti povrchu lopatek vzhledem k výchozímu stavu. Jak je patrné, po celkovém čase šestnácti hodin se již docílí požadovaného leštícího účinku. Problémem však stále zůstávají spojovací rádiusy lopatek s prstencem, které jsou těžko přístupné pro abrazivum. Kovová tělíška jsou očividně příliš velká na to, aby dokázala v přijatelném čase opracovat tato kritická místa. Řešením pro další optimalizaci procesu by tedy mohlo být například zmenšení velikosti těchto měděných tělíšek, umožňující transformaci abraziva i do zmíněných těžce přístupných míst.



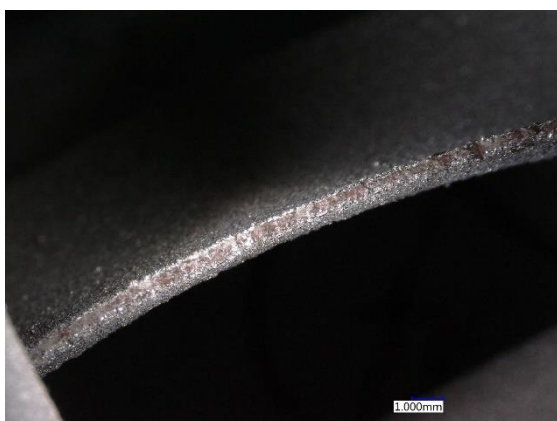
Obr. 58: Výchozí stav povrchu (hřbetu) lopatky rozvaděče



Obr. 59: Stav povrchu (hřbetu) lopatky rozvaděče po 2. leštícím procesu

Na levém obrázku znázorňujícím maskovaný prostor rozvaděče si lze dále povšimnout lokálně do červena zbarvených míst, jež znázorňují stopy po přítomnosti mědi. Ta je rozptýlena v kapalném složce v podobě malých částic, oddělených od kovových tělíšek, která se zde usadila při průchodu procesní kapaliny nezadržitelné pro krycí segmenty

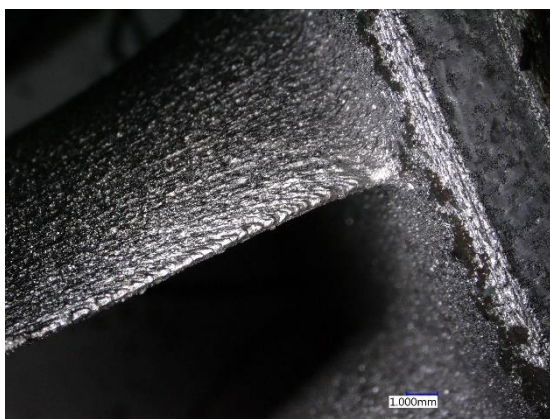
přípravku. Stopy mědi jsou patrné i na obrázcích níže. Ty však primárně slouží pro znázornění změny tvaru a jakosti náběžné a odtokové hrany lopatky. Jak bylo již popsáno v kapitole 6.2., tak na základě principu technologie SPM se obecně docílí výraznějšího ztenčení na hraně lopatky orientované níže vzhledem k upnutí rozvaděče (v tomto případě odtoková strana). Naproti tomu u hrany orientované výše vzhledem k upnutí (náběžná strana) se uskutečňuje zejména vyhlazení specifického rádiusu.



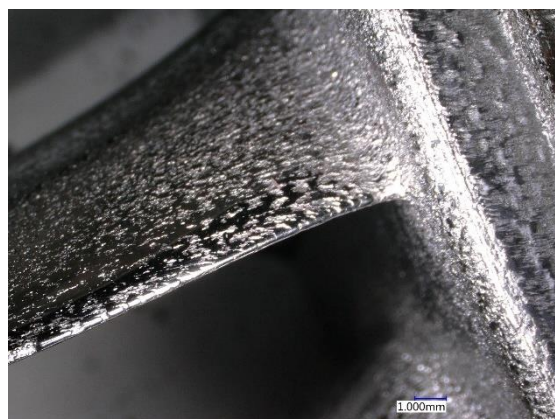
Obr. 60: Výchozí stav náběžné hrany lopatky rozvaděče



Obr. 62: Stav náběžné hrany lopatky rozvaděče po 2. leštícím procesu



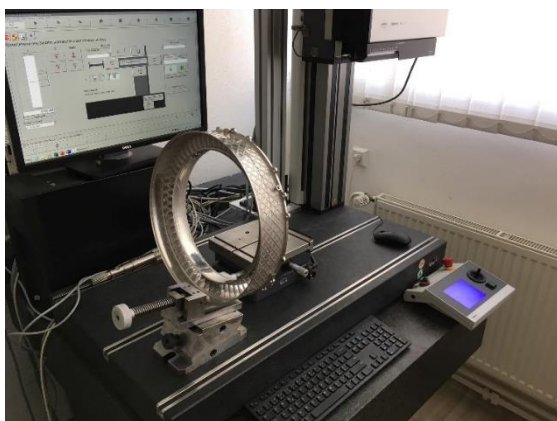
Obr. 61: Výchozí stav odtokové hrany lopatky rozvaděče



Obr. 63: Stav odtokové hrany lopatky rozvaděče po 2. leštícím procesu

Pro bližší představu o výsledku druhého leštícího procesu bylo v závěru ještě provedeno orientační měření drsnosti povrchu vybraných ploch rozvaděče. K tomu bylo využito přístroje MarSurf LD 120 (s integrovaným optickým měřicím systémem) od firmy Mahr určeného pro měření kontur a drsnosti. Pro věrohodnost výsledků bylo měření pro

danou plochu několikrát opakováno. Ze souboru naměřených údajů pak byly stanoveny referenční hodnoty udávající průměrné hodnoty vybraných parametrů drsnosti (R_a , R_v , R_z), jejichž souhrn je uveden v tabulce 9. Zvolenou vyhodnocovanou plochou byl vždy hřbet příslušné lopatky, což si vyžadovalo specifické ustavení rozvaděče vůči měřicímu stroji, jak je patrné na obrázku 64. Označení použitého snímače je LDC 2,2-10-2/60°.



Obr. 64: Měření drsnosti povrchu lopatek rozvaděče na přístroji MarSurf LD 120



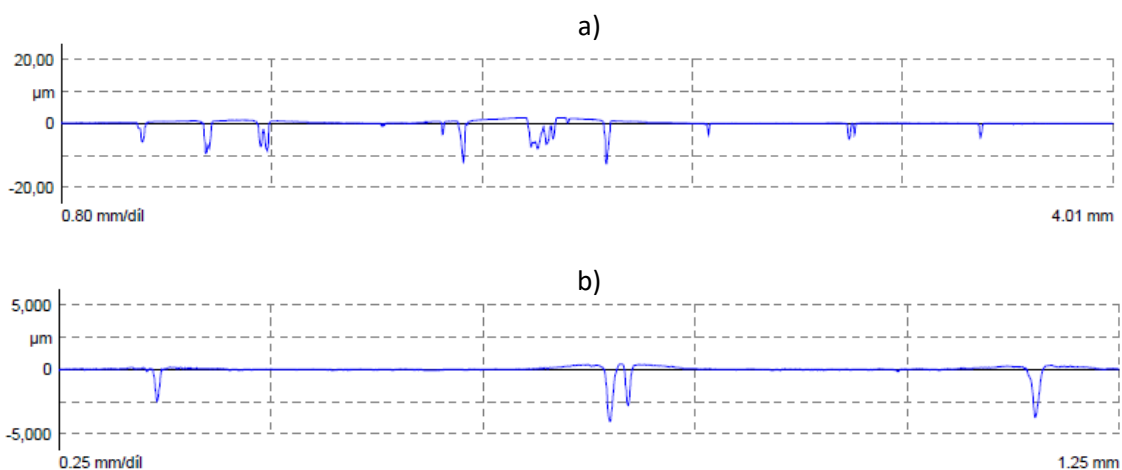
Obr. 65: Přibližný pohled na měřenou plochu lopatky

Před samotným měřením byla na základě tabulky (dle ISO 4288 a ISO 3274) o volbě mezní vlnové délky (λ_c) stanovena hodnota tohoto parametru (tzv. cut-off), podle které se následně určila odpovídající normalizovaná měřená délka (L_r) obecně sloužící k vyhodnocení profilu drsnosti povrchu. Pro porovnání byla nejdříve měřena drsnost výchozího stavu (po 3D tisku) s předpokládaným aperiodickým profilem o průměrné aritmetické hodnotě drsnosti v rozmezí 2 až 10 μm . Následně pak byla změřena leštěná plocha lopatky vykazující opět aperiodický profil s předpokládanou hodnotou R_a v rozmezí 0,1 až 2 μm . Pro stanovení reálných výsledků však zde muselo být zohledněno více parametrů. Jak je patrné z obrázku 66 tak výrazným činitelem ovlivňujícím hodnotu R_a leštěného povrchu jsou náhodně orientované prohlubně charakteristické pro součásti vyráběné 3D tiskem. Z tohoto důvodu byla leštěná plocha lopatky měřena v rozsahu dvou mezních vlnových délek. V případě, kdy je pro vyhodnocení využita délka celkové měřené dráhy 1,25 mm (obrázek 66-b), je patrné, že případný další úběr s hloubkou 2 μm (= hloubka největší prohlubně měřeného profilu) by zde na daném měřeném úseku umožnil snížit drsnost povrchu na hodnotu ještě nižší než požadované

Ra 0,1. Pokud však zvolíme celkovou měřenou délku větší (obrázek 66-a), začne se výrazně projevovat vliv zmíněných prohlubní, které zvyšují průměrnou aritmetickou hodnotu drsnosti, která je v případě tohoto měření zhruba pětinasobná vůči prvnímu nastavení.

Tab. 9: Vyhodnocení drsnosti povrchu lopatky rozvaděče

	$L_r (\lambda_c)$ [mm]	$L_n (5 \times L_r)$ [mm]	Rv [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]
Výchozí stav	2,5	10	53,29	142,06	21,41
Leštěný povrch	0,8	4	8,70	9,61	0,74
Leštěný povrch	0,25	1,25	2,08	2,29	0,15



**Obr. 66: Profil drsnosti povrchu hřbetu leštěné lopatky
a) $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$, b) $\lambda_c = 0,25 \text{ mm}$**

Pro vyhodnocení drsnosti povrchu leštěných ploch aditivně vyráběných lopatek je tedy klíčové stanovit vhodnou mezní vlnovou délku, ve které budou zmíněné charakteristické prohlubně rovnoměrně rozmístěny v rámci celého měřeného úseku.

10. Závěr

Hlavním úkolem maskovacích přípravků je pevné a přesné ustavení součásti v pracovním prostoru daného stroje. V případě zde řešených technologií strojního omílání a leštění je možné díky zmíněnému maskování postupně měnit procesní parametry procesu za účelem odvození ideálních podmínek pro rovnoměrný leštící účinek napříč opracovávanými plochami. Tato diplomová práce se především zabývá zhotovením návrhu tohoto typu přípravku, který je určený k leštění funkčních ploch lopatek prototypu turbínového rozvaděče. Na základě postupně optimalizovaných návrhů a z nich vytvořených výrobních postupů, přizpůsobených dostupným technologickým možnostem, byla posléze provedena i samotná výroba. Pro ověření funkčnosti přípravku bylo využito leštícího stroje LPG1 využívající technologie SPM, detailně popsané v teoretické části této práce, pro který je přípravek primárně určený.

Na základě studie řešené součásti, která je vyráběna aditivní technologií, bylo nutné již při první aplikaci přípravku přizpůsobit procesní parametry leštění vzhledem k její problematicky vysoké hodnotě drsnosti povrchu. Ta byla posléze na základě provedeného měření stanovena na Ra 21. Průměrná aritmetická odchylka profilu lopatek by přitom na konci leštícího procesu neměla přesahovat předepsanou hodnotu Ra 0,1. Z těchto důvodů si obecně proces žádá vysoké hodnoty strojního času, které však výrazně ovlivňují provozní podmínky (zejména pracovní teplotu), nepříznivě působící na maskovací segmenty přípravku, což muselo být zohledněno již v samotné fázi návrhu.

Ačkoliv nebylo ani po druhém zkušebním procesu dosaženo požadované jakosti, výsledky prokázaly, že navržený maskovací přípravek, po náležitých optimalizacích, splňuje požadovanou funkci a umožňuje další vývoj zde řešeného prototypu aditivně vyráběného rozvaděče z hlediska jeho dokončování pomocí technologie strojního leštění. V souladu s těmito výsledky byly nastíněny i návrhy pro další optimalizaci procesních parametrů v rámci stroje LPG1, zejména ve složení leštícího média, které tento proces nejvíce ovlivňuje.

11. Použitá literatura

- [1] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění (3. díl)*. České vysoké učení technické v Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [2] OTEC *Präzisionsfinish: Stroje pro procesy omílání* [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.otec.de/cz/produkty/omilani/>
- [3] Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 16.5.2002, 32-33 [cit. 2020-07-15]. ISSN 1212-2572.
- [4] *Walther Trowal: Aplikace* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <http://www.trowal.cz/aplikace>
- [5] *Rösler: Odstředivá zařízení* [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://cz.rosler.com/cz-cs/produkty/omilaci-stroje/odstrediva-zarizeni/>
- [6] BÁČOVÁ, Radka. Dokonalé povrchy řezných nástrojů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 10.5.2017, 72-73 [cit. 2020-07-15]. ISSN 1212-2572.
- [7] *OTEC-Tisková zpráva: Povrchy nejvyšší jakosti v leteckém průmyslu* [online]. In: [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://advantage-fl.cz/storage/files/309/CZ-Extremni-podminky-vyzaduji-perfektni-vysledky.pdf>
- [8] KOSMAČ, Alena. Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí. *Materiály a jejich použití (svazek 11)* [online]. Euro Inox, 2009, s. 20 [cit. 2020-04-25]. ISBN 978-2-87997-319-7.
- [9] OBR, Ladislav. Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí. *Tribo Technika* [online]. Vydavatelství TechPark, 2016 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62016/elektrolyticke-lesteni-korozivzdornych-oceli.html>
- [10] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Moderní technologie ve studiu aplikované fyziky: Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>. Studijní text.
- [11] OTEC *Präzisionsfinish: Procesní média* [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.otec.de/cz/produkty/procesni-media/>
- [12] *Flídr omílání: Prostředky pro omílání* [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <http://omilani.cz/prostredky-pro-omilani>
- [13] *Walther Trowal: CHIPS & COMPOUNDS* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://www.trowal.cz/chips-compounds>



- [14] *Pragochema-Broušení, leštění a omílání: Pasty pro broušení kovů a plastů* [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://www.pragochema.cz/produkty/brouseni-lesteni-omilani>
- [15] *SOKOFLOK: Teorie flokulantů* [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://www.sokoflok.cz/www/script/main.php?ac=stranka&id=5&menu=5>
- [16] *Walther Trowal: Recyklace procesních kapalin* [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <http://www.trowal.cz/stroje/recyklace-procesnich-kapalin>
- [17] *METALFINISH e-brochure: Isotropic Superfinishing* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://www.metalfinishsrl.com/index.php/en/processes/isotropic-superfinishing>
- [18] MICHAUD, Justin. Isotropic Superfinishing. *GEARSolution* [online]. 16.10.2015 [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://gearsolutions.com/departments/materials-matter-isotropic-superfinishing/>
- [19] NISKANEN, Paul. ISOTROPIC Superfinishing: Scuffing Resistance of Isotropic Superfinished Precision Gears. *GEARSolution* [online]. 2008 [cit. 2020-07-16]. ISSN 1933 - 7507.
- [20] *Rösler - Specialista pro úpravy povrchů* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://cz.rosler.com/cz-cs/>
- [21] Superfinishing Delicate Components Customer - Specific Finishing Solutions. *MFN International* [online]. 6.11.2005 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: https://www.mfn.li/archive/issue_view.php?id=319
- [22] *Rösler: Letecký průmysl - Zařízení Surf Finisher* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://cz.rosler.com/cz-cs/produkty/letecky-prumysl/zarizeni-surf-finisher/>
- [23] *MMP Technology: AEROSPACE & ENERGY* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://mmptechnology.com/site/aerospace/>
- [24] SRIVASTAVA, Anil. *CIRP Annals - Manufacturing Technology: Investigations on turning Ti-6Al-4V titanium alloy using super-finished tool edge geometry generated by micro-machining process (MMP)* [online]. TechSolve, Inc., Cincinnati, USA [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: http://mmptechnology.com/site/wp-content/uploads/2017/06/CIRP_Paper_2011_light.pdf
- [25] Polishing Process: Micro Machining Process. *MoldMaking Technology* [online]. 2.1.2009 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/polishing-process-micro-machining-process>

- [26] *Extrude Hone: FINISH3D SUPER-FINISHING FOR 3D PRINTING* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://extrudehone.com/finish3d>
- [27] *Advantage - OTEC: Lopatky motorů pro letecký průmysl* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://advantage-fl.cz/storage/files/339/Lopatky-turbin.pdf>
- [28] *One Industry - Ostatní operace: Pulsní omílání – Vysokorychlostní omílání citlivých a tvarově složitých obrobků* [online]. 1.9.2015 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://obrabeni.oneindustry.one/pulsni-omilani-vysokorychlostni-omilani-citlivych-a-tvarove-slozitych-obrobku/>
- [29] *SPM Mould Polishing System: LPG1 500/2310* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <http://www.spm-polish.com/products.php?id=5>
- [30] BRAND, Terrance, Andrew TRIMMER a Kevin SHATLEY. *Polishing method for turbine components*. United States. US 2017/0361422 A1. Zapsáno 21.7.2017.
- [31] ZEMČÍK, Oskar. *Nástroje a přípravky pro obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2336-6.
- [32] BUZKOVÁ, Eva. *Výroba otvorů v GT rozvaděči turbovrtulového motoru*. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2017 [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/vyroba-otvoru-v-gt-rozvadeci-turbovrtuloveho-motoru.html>
- [33] *Materialise: Inconel (IN718)* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.materialise.com/cs/manufacturing/materialy/inconel>
- [34] *NeoNickel: Slitina Alloy 718* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/alloys/slitiny-niklu/ally-718/>
- [35] *Bodycote: Rozpouštěcí žihání a stárnutí niklových slitin* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/rozpousteci-zihani-starnuti/rozpousteci-zihani-a-starnuti-niklovych-slitin/>
- [36] BENEŠ, Petr. *Vliv tepelných vlastností tenkých vrstev na třískové obrábění tvrdých těžkoobrobitelných ocelí. III. Mezinárodní konference: Strojírenská technologie* [online]. Plzeň, 2009, , 8 [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/295569715.pdf>
- [37] *Techlan Chudoba s.r.o.: Magnetické upínání obrobků* [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.techlan.cz/magneticke-upinani-obrobku-uvod>
- [38] *MATERIALPRO 3D: Materiálový slovník* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [39] *Sorte Trade s.r.o.: Soustruh SV18 R a soustruh SV18 RA* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <http://www.sortetrade.cz/servis-stroju/?lang=cz>

- [40] LIMETECH obráběcí a tvářecí stroje: Frézka nástrojářská FNGJ 40 [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.limetech.cz/frezka-nastrojarska-fngj-40/2254>
- [41] Megainzerce: Radiální vrtačka VR 4 [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://stroje.megainzerce.cz/kovoobrabeci-stroje/radialni-vrtacka-vr-4-244051.htm>
- [42] Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, FS ČVUT v Praze: Technologie obrábění: Používané CNC stroje [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <http://technologie.fs.cvut.cz/provide/obrabeni>
- [43] SYS: Stratasys F Series [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.sys-uk.com/3d-printers/stratasys-f123/>
- [44] Dormer Pramet: e-katalog [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cs-cz/productssite/pages/turning.aspx>
- [45] BO-IMPORT Nářadí-Nástroje: Frézy tvrdokovové [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.bo-import.cz/frezy-tvrdokovove/>
- [46] STIM ZET: Tvrdokovový vrták s válcovou stopkou [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: https://www.stimzet.cz/data/sk1897_cz.html
- [47] BO-IMPORT: Strojní závitníky-Metrický závit [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.bo-import.cz/zavitniky/>
- [48] Conrad: Digitální úchylkoměr Helios Preisser 1726 502, 0,001 mm [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/digitalni-uchylkomer-helios-preisser-1726-502-0-001-mm.k821508>
- [49] Heidenhain: Dotykové sondy pro obráběcí stroje [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: https://www.heidenhain.cz/cs_CZ/produkty/dotykove-sondy/
- [50] E-nářadí a nástroje: Upínací pevný hrot Format DIN 806 WS-MK4 [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.enaradinastroje.cz/upinaci-hroty/>
- [51] Boukal e-shop: Ruční nářadí: Pilník dílenský plochý [online]. [cit. 2020-07-16]. Dostupné z: <https://www.boukal.cz/pilnik-dilensky-plochy-pferd-300-2-s-rukojeti/11801/produkt>
- [52] Boukal e-shop: Ruční nářadí: Záhlubník ke srážení hran otvorů [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.boukal.cz/zahlubnik-ke-srazeni-hran-otvoru-noga-ng3100/10779/produkt>

12. Seznam obrázků

Obr. 1: Ukázka odstředivého omílacího zařízení firmy Rösler [5]	10
Obr. 2: Ukázka žlabového vibrátoru firmy OTEC [2]	11
Obr. 3: Ukázka vlečného omílacího zařízení firmy OTEC [2]	12
Obr. 4: Ukázka proudového omílacího zařízení firmy OTEC [7]	12
Obr. 5: Schéma principu elektrolytického leštění [10]	14
Obr. 6: Schéma postupu při elektrolytickém leštění [8, 9]	15
Obr. 7: Profilu drsnosti povrchu korozivzdorné oceli po leštění	16
Obr. 8: Keramická tělíska tvaru tříbokého jehlanu [11]	18
Obr. 9: Plastová tělíska (vlevo) a polyuretanová tělíska s povlakem SiC (vpravo) [11]..	18
Obr. 10: Jehlicovitá ocelová tělíska (vlevo) a zirkonové kuličky (vpravo) [11]	19
Obr. 11: Drcené ořechové skořápky (vlevo) a kukuřičný granulát (vpravo) [11]	19
Obr. 12: Tělíska z umělého korundu [11]	20
Obr. 13: Anizotropie povrchu součásti po technologii broušení [18]	25
Obr. 14: Jakost povrchu po dokončovací technologii ISF s viditelnou izotropií [18].....	26
Obr. 15: Leštění lopatek turbíny procesem Keramo-Finish [21]	28
Obr. 16: Zařízení Surf-Finisher využívané pro dokončování lopatkových kol [22]	28
Obr. 17: Obecná analýza mikrogeometrie povrchu součásti [24]	30
Obr. 18: Stroj řady Pulsfinish firmy OTEC Präzisionsfinish pro pulzní omílání [28].....	31
Obr. 19: Schéma stroje LPG1 [30]	33
Obr. 20: Zobrazení stroje LPG1 (SPM) [29]	34
Obr. 21: CAD model turbínového rozvodového kola	36
Obr. 22: Vyobrazení prstence turbínového rozvaděče (červeně vyznačeno)	38
Obr. 23: Zaoblení hran lopatek jako důsledek procesu strojního leštění [27]	41
Obr. 24 vlevo: Vyznačení náběžné (červená) a odtokové (modrá) hrany lopatek	41
Obr. 25: První návrh konstrukce v řezu (bez krycích segmentů)	44
Obr. 26: Kinematická obálka rozvaděče	45
Obr. 27: Ekvidistantní křivka kopírující hranu lopatky	45
Obr. 28: Maskovací segmenty v řezu s vyznačenými dosedacími plochami (červeně)..	48

Obr. 29: Půdorys sestavy 1. koncepce přípravku.....	49
Obr. 30: Poloha děr pro upevnění segmentů v horní přírubě	49
Obr. 31: Druhý návrh konstrukce v řezu (bez krycích segmentů)	50
Obr. 32: Vyznačení klínové drážky (červeně) vedoucí k dělenému segmentu.....	51
Obr. 33: Model děleného horního krycího segmentu	51
Obr. 34: CAD model finální verze sestavy přípravku	52
Obr. 35: CAD model finální verze sestavy přípravku bez rozvaděče	52
Obr. 36: Soustruh SV 18 RA [39]	53
Obr. 37: Frézka FNGJ 40 [40]	54
Obr. 38: Radiální vrtačka VR 4 [41]	54
Obr. 39: CNC frézka VMC 500 [42].....	54
Obr. 40: Tiskárna STRATASYS F370 [43]	55
Obr. 41: Soustružení čelních ploch základny na konvenčním soustruhu SV 18 RA.....	57
Obr. 42: Vrtání děr příruby (\varnothing 13 mm) na CNC frézce VMC 500	62
Obr. 43: Řezání závitů M6 do předvrtaných děr v přírubě na radiální vrtačce VR 4.....	62
Obr. 44 vlevo: Usazení zkušební vzorku dolního segmentu na prsteneček rozvaděče .	66
Obr. 45: Simulace stavby a rozmístění tisknutých dílů v softwaru GrabCAD Print	67
Obr. 46: Tisk navržených maskovacích segmentů	68
Obr. 47: Sestava přípravku před prvním leštícím procesem	69
Obr. 48: Sestava přípravku s pohledem na dolní uchycení krytů	69
Obr. 49: Usazení přípravku do stroje LPG1 (pohled shora na magnetickou desku).....	70
Obr. 50: Výsledek leštícího procesu po prvních cyklech.....	71
Obr. 51: Jakost povrchu (hřbetu) lopatky rozvaděče po 3D tisku (výchozí stav)	72
Obr. 52: Jakost povrchu (hřbetu) lopatky rozvaděče po 1. procesu leštění.....	72
Obr. 53: Směr proudu média v pracovním prostoru stroje LPG1 a jeho vliv na jakost povrchu rozvaděče.....	74
Obr. 54: Jakost povrchu hůře orientované vnější stěny rozvaděče.....	74
Obr. 55: Jakost povrchu ideálně orientované vnější stěny rozvaděče	74
Obr. 56: Optimalizace CAD modelu sestavy přípravku.....	76
Obr. 57: Sestava optimalizovaného přípravku před druhým procesem omílání	76



Obr. 58: Výchozí stav povrchu (hřbetu) lopatky rozvaděče	78
Obr. 59: Stav povrchu (hřbetu) lopatky rozvaděče po 2. leštícím procesu	78
Obr. 60: Výchozí stav náběžné hrany lopatky rozvaděče	79
Obr. 61: Výchozí stav odtokové hrany lopatky rozvaděče	79
Obr. 62: Stav náběžné hrany lopatky rozvaděče po 2. leštícím procesu	79
Obr. 63: Stav odtokové hrany lopatky rozvaděče po 2. leštícím procesu	79
Obr. 64: Měření drsnosti povrchu lopatek rozvaděče na přístroji MarSurf LD 120	80
Obr. 65: Přiblížený pohled na měřenou plochu lopatky	80
Obr. 66: Profil drsnosti povrchu hřbetu leštěné lopatky	81



13. Seznam tabulek

Tab. 1: Technické parametry stroje LPG1 [29]	32
Tab. 2: Porovnání tepelné vodivosti slitiny inconel 718 [36]	39
Tab. 3: Chemické složení [hm%] slitiny inconel 718 [34].....	40
Tab. 4: Porovnání parametrů vybraných materiálů pro FDM tisk krytů přípravku [38].	47
Tab. 5: Využité nástroje a zařízení při výrobě.....	55
Tab. 6: Dílenské programování vrtacího cyklu 4x Ø 14 mm v horní přírubě	61
Tab. 7: Dílenské programování vrtacího cyklu 18x Ø 5 mm v horní přírubě	61
Tab. 8: Kusovník sestavy přípravku po optimalizaci	77
Tab. 9: Vyhodnocení drsnosti povrchu lopatky rozvaděče.....	81

14. Seznam příloh

Příloha 1: Výkres A4 – Základna – (2020-09-01-01)

Příloha 2: Výkres A4 – Distanční trubka – (2020-09-01-02)

Příloha 3: Výkres A4 – Dolní Příruba – (2020-09-01-03)

Příloha 4: Výkres A4 – Horní Příruba – (2020-09-01-04)

Příloha 5: Výkres A4 – Závitová tyč – (2020-09-01-05)

Příloha 6: Výkres A4 – Vložka horního krytu – (2020-09-01-06)

Příloha 7: Výkres A4 – Vložka dolního krytu – (2020-09-01-07)

Příloha 8: Výkres A3 – Dolní Maskovací Segment – (2020-09-01-08)

Příloha 9: Výkres A3 – Horní Maskovací Segment – Část 1 – (2020-09-01-09)

Příloha 10: Výkres A4 – Horní Maskovací Segment – Část 2 – (2020-09-01-10)

Příloha 11: Výkres A2 – Sestava přípravku – (2020-09-01-00)