



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA KOMPRESORU MALÉHO PROUDOVÉHO MOTORU

MANUFACTURING TECHNOLOGY OF CENTRIFUGAL COMPRESSOR FOR SMALL JET ENGINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radim Remer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Radim Remer
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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

Výroba kompresoru malého proudového motoru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je návrh technologie výroby kompresorového kola z hliníkové slitiny určeného pro malý proudový motor společnosti PBS Velká Bíteš a.s. V rámci práce je třeba navrhnout technologii výroby, která povede ke zjednodušení stávajícího pracovního postupu. Výstupem práce bude navrhutá a zhodnocená technologie výroby, která bude implementovatelná do sériové výroby.

Cíle diplomové práce:

Teoretická část – rozbor současného stavu problematiky.

Analýza možných řešení.

Technologická příprava výroby, návrh, evaluace.

Technicko–ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-8-214-4025-8.

KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: CERM, 2002. 270 s. ISBN 80-21-1996-2.

LEINVEBER, J., ŘASA, J., VÁVRA, P. Strojnické tabulky. 3. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 2000. 986 s. ISBN 80-7183-164-6.

ŠTULPA, M. CNC obráběcí stroje. 2. dotisk 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 128 s. ISBN 978-80-7300-207-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem na zjednodušení stávajícího technologického postupu a následným ověřením vyrobiteľnosti kompresorového kola malého proudového motoru. Práce je rozdělena na několik hlavních částí. V první části je zpracována rešerše týkající se proudových motorů a samotného kompresorového kola. Následující část navazuje samotným návrhem technologie výroby tohoto dílce za pomoci obráběcích metod. V závěru práce dojde k zhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova

obrábění, kompresorové kolo, strojírenská technologie

ABSTRACT

This thesis deals with redesigning of the current technological manufacturing process and subsequent production of a centrifugal impeller of a small turbojet engine. Thesis is divided into three main parts. First part deals with the theoretical background of the turbojet engines and the centrifugal impeller. Next part is focused on the proposed manufacturing technology of the centrifugal impeller using machining. Final part of the thesis deals with evaluation of the achieved goals.

Key words

machining, centrifugal impeller, technology

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

REMER, Radim. *Výroba kompresoru malého proudového motoru* [online]. Brno, 2022 [cit. 2021-08-13]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137164>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Zouhar.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Výroba kompresoru malého proudového motoru** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

13.08.2021

.....
Datum

.....
Bc. Radim Remer

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Janu Dvořáčkovi Ph.D. ze společnosti PBS Velká Bíteš a vedoucímu práce panu Ing. Janu Zouharovi Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl také poděkovat společnosti PBS Velká Bíteš a.s., za poskytnutí prostředků a umožnění uskutečnění této diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD.....	8
1 O společnosti PBS Velká Bíteš.....	9
1.1 Letecká divize	9
1.2 Stručný popis a základní parametry proudového motoru TJ40	9
2 Turbínové motory	11
2.1 Rozdělení turbínových motorů.....	11
2.1.1 Jedn proudové	11
2.1.2 Dvouproudové	12
2.1.3 Turbovrtulové	13
2.2 Kompresory v turbínových motorech	14
2.2.1 Radiální kompresory	14
2.2.2 Axiální kompresory	16
3 Řešená součást proudového motoru	17
3.1 Výkres součásti	18
3.2 Popis součásti a výroby	18
3.3 Materiál kompresorového kola	19
3.4 Volba polotovaru.....	22
3.4.1 Využívané typy polotovarů.....	22
3.4.2 Stanovení rozměrů polotovaru.....	23
4 Analýza možných řešení a problematika výroby lopatek.....	24
4.1 Výroba kompresorového kola pomocí technologie obrábění	24
4.2 Problematika výroby lopatek	25
4.2.1 Vliv dokončovacích strategií na jakost povrchu.....	25
4.2.2 Obrábění tenkostěnných součástí.....	26
4.2.3 Kinematika víceosých obráběcích strojů	27
4.2.4 CAM software a post-processing.....	29
4.3 Popis stávajícího technologického postupu výroby	30
4.4 Návrh možných řešení inovovaného technologického postupu.....	31
4.4.1 Varianta TP č. 1	31
4.4.2 Varianta TP č. 2	31
4.4.3 Varianta TP č. 3	32
5 Návrh nového technologického postupu a technologická příprava výroby.....	33
5.1 Volba strojů.....	33
5.2 Volba nástrojů	34

5.3	Navržený technologický postup.....	36
6	Ověření zvoleného technologického postupu.....	38
6.1	Příprava programu pro soustružení tvaru KK.....	38
6.2	Příprava programu pro výrobu lopatek a obrábění lopatek KK.....	39
6.2.1	Hrubování mezi-lopatkového prostoru.....	40
6.2.2	Sjednocení přídavku na dokončovací obrábění lopatek.....	42
6.2.3	Dokončování lopatek.....	44
6.2.4	Dokončování lopatkového kanálu.....	46
6.2.5	Nespojitost ploch na výstupní hraně lopatek.....	48
6.3	Dynamické vyvažování.....	55
6.4	Povrchová úprava.....	56
6.5	Závěrečná kontrola kompresorového kola.....	57
6.5.1	Vyhodnocení odchylek lopatkování od CAD modelu.....	57
7	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	59
7.1	Náklady na zavedenou výrobní technologii.....	59
7.2	Náklady na nově navrženou výrobní technologii.....	61
7.3	Porovnání jednotlivých technologií.....	63
7.4	Důsledky aplikace lokalizovaného zpomalení posuvové rychlosti při dokončování lopatek.....	65
	ZÁVĚR.....	67
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	70
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	74
	SEZNAM PŘÍLOH.....	76

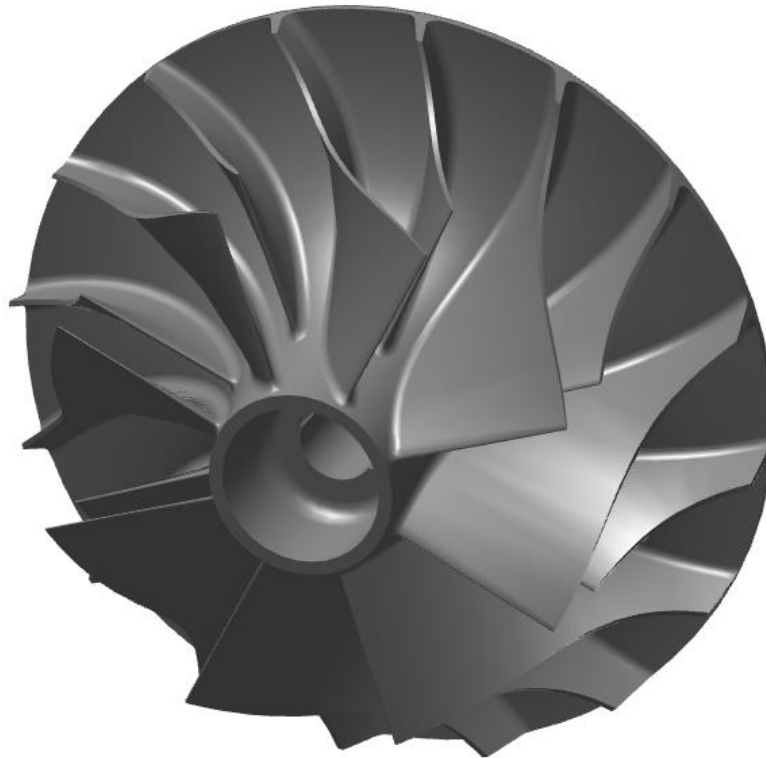
ÚVOD

Proudové motory v dnešní době patří mezi nejvyužívanější typy letadlových motorů a jejich vznik významně ovlivnil vývoj leteckého průmyslu. S tímto rozvojem leteckého průmyslu dochází ke snaze k zefektivnění a zdokonalení výrobních technologií a zavedených výrobních postupů použitých při výrobě jednotlivých součástí.

Diplomová práce je zaměřena na výrobu kompresorového kola malého proudového motoru (Obr. 1) ve společnosti PBS Velká Bíteš. Jejím předmětem je vypracování nového technologického postupu, k již stávající výrobě s následným ověřením výroby a zhodnocením využitelnosti této navržené technologie ve výrobě.

Kompresory jsou klíčovou součástí všech proudových motorů a slouží k převodu mechanické energie kompresorového kola na energii proudícího vzduchu. Výroba lopatek kompresorového kola je komplexní záležitostí.

PBS (První brněnská strojírna) je průkopnická strojírenská společnost s více jak 200letou tradicí. Skupinu PBS GROUP a.s. tvoří tři výrobní společnosti: PBS Velká Bíteš, PBS ENERGO a PBS BRNO. PBS Velká Bíteš se především zabývá výrobou pohonných jednotek a zařízení pro oblast letecké techniky, slévárenskou technologií přesného lití a galvanickou povrchovou úpravou.



Obr. 1: Radiální kompresorové kolo.

1 O SPOLEČNOSTI PBS VELKÁ BÍTEŠ

Diplomová práce byla vypracována ve spolupráci se společností PBS Velká Bíteš. Společnost PBS Velká Bíteš se převážně zabývá leteckou technikou, slévárnictvím, galvanickými úpravami, vysoce přesným obráběním a lze ji řadit mezi celosvětově věhlasné výrobce zařízení a pohonných jednotek pro leteckou techniku. PBS Velká Bíteš je také známá díky své slévárně přesného lití, která patří mezi přední evropské slévárny. Základy společnosti vznikly v roce 1950, kdy došlo k první výstavbě výrobních hal a již v roce 1969 došlo k zprovoznění slévárny přesného lití. Společnost PBS Velká Bíteš se v současné době skládá z několika divizí, divize centrum (DCE), divize letecké techniky (DLT), divize přesného lití (DPL) a povrchové úpravy (galvanovna) [1].

1.1 Letecká divize

Letecká divize se zabývá vývojem a výrobou zařízení pro mezinárodní leteckou techniku, mezi která patří turbínové motory, pomocné energetické jednotky, letecké přístroje, komponenty nebo klimatizační systémy. Mimo jiné se DLT zaměřuje i na výrobu heliových expanzních turbín navržených primárně pro expanzi inertních plynů, kompresory pro stlačování inertních plynů a kryogenních čerpadel pro transport těchto plynů. Dále se zabývá kooperační výrobou v oblasti broušení ozubení, povlakování lopatek turbín a turbinových kol metodou „out of pack“, při které dochází k depozici povlaku na bázi hliníku $Al/AlF_3/Al_2O_3$. Další oblastí nabízených služeb je tepelné zpracování nerezových ocelí, niklových slitin, superslitin a také žíhání všech druhů ocelí, neželezných kovů a kalení nástrojových materiálů dle vlastních tepelných postupů a norem nebo tepelných postupů dodaných zákazníkem. Vývoj, výroba a testování produktů je přibližně z 90 % plněno z vlastních kapacit. Letecká divize se řadí mezi vysoce úspěšné ve svém oboru, a to především díky inovaci a investicím do moderních technologií, spolehlivosti a kvalitě, dlouholeté spolupráci s předními výrobci letecké techniky a vysoce rozsáhlé certifikované letecké výrobě [2].

Letecká divize vyvíjí a vyrábí rozsáhlou škálu leteckých motorů. Nejvyšší zastoupení mají proudové motory (PBS TJ40, PBS TJ180, PBS TJ100, PBS TJ150) a jejich různé modifikace, které jsou využívány u malých pilotovaných letounů a u „cvičných terčů“, které lze nalézt u pozemních a námořních jednotek po celém světě. DLT dále vyrábí také motory turbo-hřídelové (PBS TS100), které nachází uplatnění v malých vrtulnicích a turbo-vrtulové (PBS TP100), které se používají u malých osobních letounů [2].

1.2 Stručný popis a základní parametry proudového motoru TJ40

Malé proudové motory TJ40 (Obr. 2) nachází uplatnění u malých letounů, kterými jsou kluzáky, ale i u některých větších leteckých modelů. Mezi přednosti těchto motorů patří výtečný poměr mezi tahem a váhou motoru, kompaktní design, nízká spotřeba paliva, vysoký elektrický výkon, elektrické startování nebo například mimo jiné možnost zákaznické modifikace. V současné době jsou vyráběny tři modifikace motoru PBS TJ40-G1, PBS TJ40-G1NS a PBS TJ40-G2 [2, 3].



Obr. 2: Proudový motor PBS TJ40-G1 [3].

Tab.1: Základní parametry proudového motoru PBS TJ40 – G1.

Technické parametry		
Tah motoru	395	[N]
Zdrojové napětí	14	[V]
Elektrický výkon	150	[W]
Specifická spotřeba paliva	0,147	[kg·N ⁻¹ ·h ⁻¹]
Rozměry a hmotnost		
Vnější průměr	147	[mm]
Délka	304	[mm]
Hmotnost	3,4	[kg]
Operační podmínky povolené za chodu		
Maximální povolená nadmořská výška	9000	[m]
Povolený rozsah okolních teplot	-50/+50	[° C]

2 TURBÍNOVÉ MOTORY

Proudové motory patří mezi nepoužívanější typy motorů v letectví. Proudový motor pracuje na základě zákona principu akce a reakce, který byl zformulován anglickým fyzikem a matematikem Isaacem Newtonem. Urychlený proud spalin a vzduchu o vysoké rychlosti vycházející z výstupní trysky motoru působí silou v opačném směru a reakce pohání letadlo vpřed. Mnohé letadlové motory využívající pohonu letadla v podobě urychleného proudu vzduchu využívají kompresor a plynovou turbínu, avšak použití nacházejí i letadlové motory pracující na stejném principu, které kompresor a turbínu nevyužívají. Výsledný tah motoru je především výsledkem rychlosti a hmotnostního průtoku výstupních plynů [4, 5].

První motorová letadla využívala k pohonu letadla převážně pístových motorů a pohonu dosáhli za pomoci roztočení vrtule. Nahrazení těchto původních pístových motorů, motory využívajícími urychleného proudu vzduchu bylo v zájmu mnohých leteckých návrhářů velmi dlouhou dobu. Avšak počáteční velmi nízké rychlosti letadel a nemožnost využití pístového motoru k vytvoření velkého hmotnostního průtoku vzduchu o vysoké rychlosti, potřebného k vytvoření pohonu letadla v podobě urychleného proudu vzduchu, bylo překážkou. První koncepce k vytvoření motoru poháněného urychleným proudem vzduchu byly navrženy již v roce 1913 Francouzským inženýrem Reném Lorinem, avšak jeho koncept nebylo možné v této době zhotovit a byl pro tehdejší rychlosti letadel velice neefektivní. Jednalo se o podobu konceptu s názvem „ram-jet“, který k urychlení proudu vzduchu nevyužíval rotujících prvků, ale speciálně tvarované „spalovací komory“, která měla divergentní vstup a konvergentní nebo konvergentně-divergentní výstup. V roce 1930 přišel anglický inženýr Frank Whittle se svým prvním patentem na turbínový motor, ale trvalo dalších 11 let, než vzletlo první letadlo s jeho modelem motoru. Tento motor vytvořil základ pro moderní turbínové motory [5, 6].

2.1 Rozdělení turbínových motorů

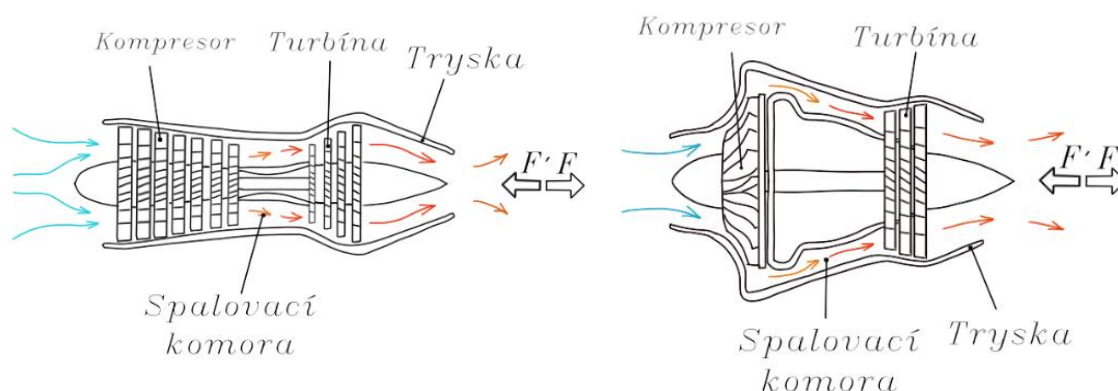
Turbínové motory lze rozdělit na jednoproudové, dvouproudové a turbovrtulové.

2.1.1 Jednoproudové

První návrhy jednoproudových motorů se začaly objevovat již v 30. letech 20. století, kdy na jejich vývoji nezávisle na sobě pracovali konstruktéři z Německa a Velké Británie. V počátku se používaly především motory s radiálními kompresory, avšak nároky na vyšší výkon začaly upřednostňovat použití víceúrovňových axiálních kompresorů. Letadla s proudovými motory umožňují dosažení nadzvukové rychlosti a dosahují nízkých účinností při nižších rychlostech, a proto se často využívají pro vysoce rychlá vojenská letadla pracující ve velkých nadmořských výškách. V současné době jsou částečně nahrazovány dvouproudovými motory z důvodu vyšší spotřeby paliva [6, 7, 8].

Proudový motor se skládá z několika základních prvků (Obr. 3), které utváří celý funkční celek. V přední části do motoru vstupuje vzduch, který je nasáván za pomoci kompresoru. V kompresoru se následně tento vzduch stlačuje a dochází ke zvýšení tlaku a teploty tohoto vzduchu. Za kompresní částí se nachází spalovací komora, ve které se do takto

stlačeného a zahřátého vzduch vstřikuje palivo, které se následně zažehne. Zažehnutím paliva se uvolní tepelná energie a výsledná směs spalin a vzduchu expanduje a prochází turbínou. Při průchodu této směsi vzduchu a spalin turbínou dojde k přeměně energie vzduchu na energii mechanickou, která turbínu pohání. Turbína je zpětně propojena s kompresorem, který pohání. V zadní části proudového motoru směs plynů vystupuje z výstupní trysky, kde se zbývající energie promění na energii kinetickou, čímž vzniká samotný tah motoru [6, 7].

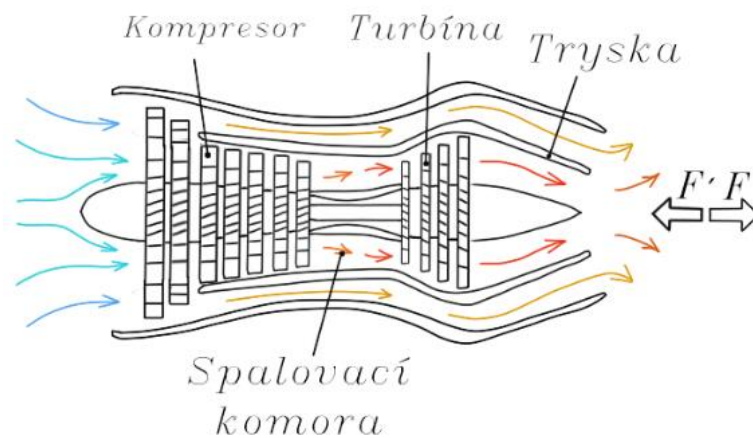


Obr. 3: Proudový motor s axiálním (a) a radiálním (b) kompresorem – podle [9].

2.1.2 Dvouproudové

Počátky využití dvouproudových motorů jsou počátky 40. let 20. století. Dvouproudými motory proudí značně větší množství vzduchu a na výstupu je nižší rychlost plynů než u motorů jednoproudových. Z těchto důvodů jsou motory méně hlučné a mají nižší spotřebu paliva, a proto se využívají u velké řady letounů jak vojenských, tak převážně těch dopravních. Využití dvouproudových motorů lze rozdělit podle obtokového poměru (poměr množství obtékajícího vzduchu ku množství vzduchu proudícího vysokotlakou částí). Stíhací letadla mívají nižší obtokový poměr a dopravní letadla jej mívají vyšší [5, 7, 8].

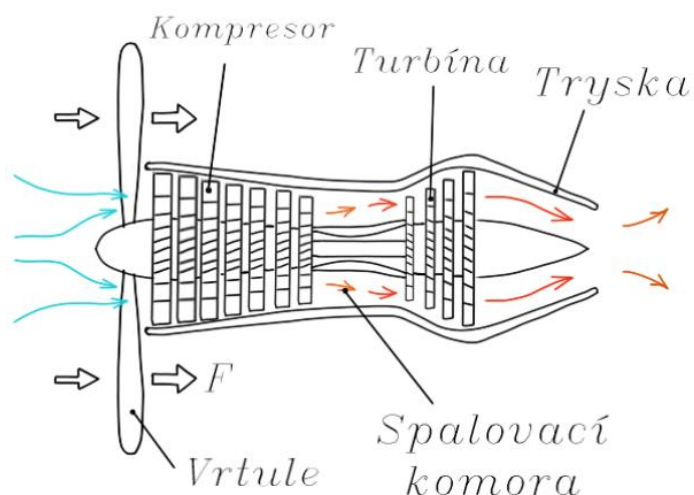
U dvouproudových motorů (Obr. 4) je vstupující vzduch nejdříve stlačen dmychadlem a rozdělen na dva proudy. Část vzduchu proudí vysokotlakou částí a zbylá část ji pouze obtéká. Po vstupu vzduchu do vysokotlaké části se vzduch stlačuje za pomoci nízko a vysokotlakého kompresoru. Následuje spalovací komora, ve které se stlačený vzduch mísí s palivem, které je následně zažehnuto. Směs vzduchu a spalin prochází přes turbínu, kde dochází k předání značné části energie této směsi na mechanickou energii v podobě roztočení turbín. Následně se směs spalin a vzduchu z vysokotlaké části mísí s obtékajícím vzduchem. Výsledný tah motoru je složen z obou částí proudícího vzduchu [5, 6, 7].



Obr. 4: Dvouproudový motor – podle [10].

2.1.3 Turbovrtulové

Turbovrtulové motory (Obr. 5) využívají k vytvoření tahu převážně vrtule umístěné před vstupem do motoru na místo samotného proudu urychleného vzduchu. Turbovrtulové motory stejně jako předešlé typy motorů využívají turbíny k pohonu vrtule. Tato vrtule je propojena s hlavní hřídelí proudového motoru, a to buď přímo nebo za pomoci převodů. Turbovrtulové motory jsou vhodné pro letadla s nižšími rychlostmi. Do této kategorie lze zařadit i modifikaci turbovrtulového motoru s upravenou výstupní částí tzv. turbohřídelový motor, využívající propojení vrtule nepřímo přes převodovku na hlavní hřídel motoru. Tento typ motorů se používá zejména pro vrtulníky [6, 8].



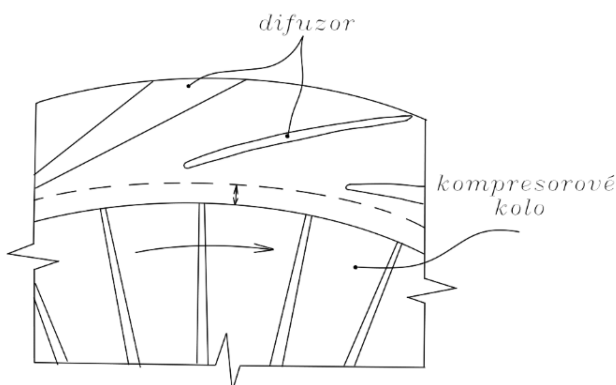
Obr. 5: Turbovrtulový motor – podle [11].

2.2 Kompresory v turbínových motorech

V přední části na vstupu do turbínového motoru se nachází kompresor. Kompresor se skládá z rotoru a statoru a slouží k nasávání vzduchu na vstupu do motoru a jeho následnému urychlení a stlačení. Mechanická energie rotoru osazeného lopatkami se mění na tlakovou, kinetickou a tepelnou energii proudícího vzduchu. Vzduch na výstupu z kompresoru má zvýšenou rychlost, tlak a teplotu. Výstupní teplota z kompresoru se pohybuje v rozmezí 200–550 °C [5].

2.2.1 Radiální kompresory

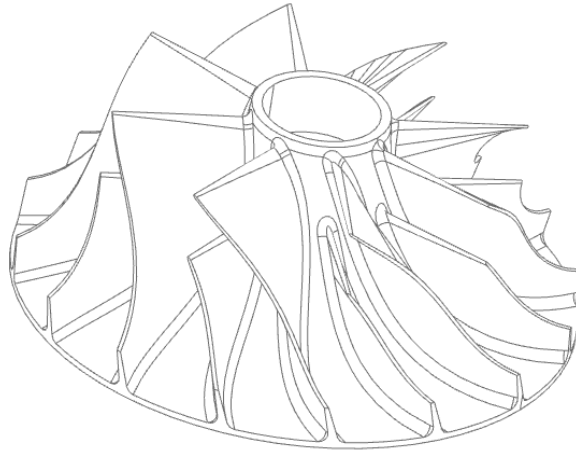
Radiální (odstředivé) kompresory se skládají z dvou hlavních částí, kompresorového kola a difuzoru (Obr. 6). U radiálních kompresorů vzduch vstupuje do oběžného kola ve směru osy rotace (axiálně), a vystupuje kolmo k ose rotace (radiálně). Radiální kompresory jsou turbínou roztočeny na vysokou frekvenci otáčení a dochází k nasávání vzduchu ve středu kompresorového kola. Odstředivá síla způsobí proudění vzduchu podél lopatek až na jejich horní hranu. Tímto principem se vzduch urychlí, ale také se zvýší jeho tlak. Vzduch při opuštění lopatek kompresorového kola prochází skrz difuzor, který přemění značnou část kinetické energie na tlakovou energii [5, 12].



Obr. 6: Kompresorové kolo s difuzorem – podle [5, str. 22].

Radiální kompresorová kola lze dělit na otevřená, polootevřená a uzavřená [13].

- Otevřená kompresorová kola nemají uzavírací kryt ani z jedné strany a využívají se především pro velké průtoky vzduchu u jednostupňových kompresorů. Tento typ kompresoru nenachází velkého využití.
- Polootevřená kompresorová kola jsou uzavřená z jedné strany a z druhé strany jsou otevřená (Obr. 7). Z důvodu, že jsou z jedné strany uzavřená dochází k zvýšení jejich robustnosti a tuhosti. Stejně jako otevřená kompresorová kola se využívají pro vyšší průtoky vzduchu a nachází se u jednostupňových nebo vícestupňových kompresorů. V leteckém průmyslu se využívá především tento typ radiálního kompresorového kola.
- Uzavřená kompresorová kola mají lopatky uzavřené mezi dvěma disky. Využití nacházejí u vícestupňových kompresorů.



Obr. 7: Polootevřený radiální kompresor s mezi – lopatkami.

Polootevřená radiální kompresorová kola lze dále dělit podle směru zakřivení lopatek nebo podle využití mezi-lopatky. Mnohá základní kompresorová kola využívají návrh s radiálními lopatkami z důvodu snazší vyrobitelnosti. Avšak snaha zvýšit účinnost a provozní rozsah kompresorových kol vedla k nárůstu adopce lopatek zakřivených opačně ke směru rotace („backswept blades“). Tato kompresorová kola mají proměnný náklon lopatky od vstupní hrany k hraně výstupní. Nevýhodami tohoto typu zakřivení lopatek je dosažení nižších kompresních poměrů ve srovnání s radiálními lopatkami. Dalším způsobem navýšení účinnosti a provozního rozsahu kompresorových kol lze dosáhnout přidáním mezi-lopatky. Mezi-lopatky jsou kratší lopatky, které se nachází mezi dvěma běžnými lopatkami [14, 15].

K prvnímu využívání radiálních kompresorových kol došlo v 30. letech 20. století, kde byli nezbytnou součástí v počátcích rozvoje turbínových motorů. Avšak jejich význam výrazně poklesl s nástupem axiálních kompresorů. V posledních deseti-letí jejich využitelnost znovu stoupá, a to v provedení kombinace radiálního i axiálního kompresoru. Radiální kompresory lze také mimo jiné najít u malých letadlových motorů [16].

Výhody radiálního kompresoru oproti axiálnímu kompresoru [5, 12, 14]:

- vyšší kompresní poměr na jeden stupeň,
- robustnost a spolehlivost,
- rychlejší a snazší vývoj a výroba,
- vysoká energická účinnost.

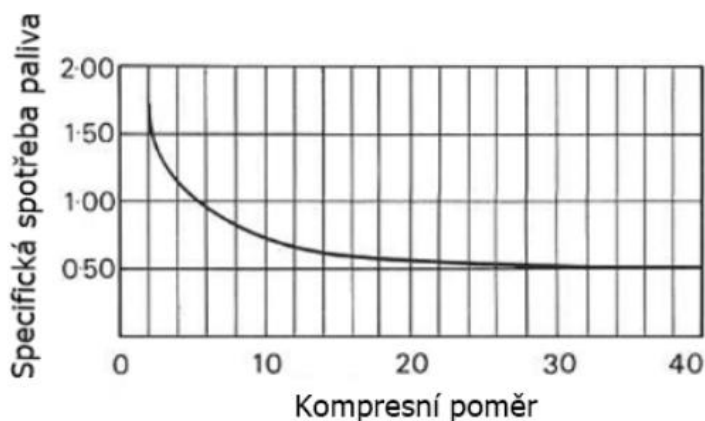
Nevýhody radiálního kompresoru oproti axiálnímu kompresoru:

- omezené množství kompresního poměru,
- pracují za vysokých otáček,
- jsou náchylné na problémy jako „stalling“ a „choking“.

2.2.2 Axiální kompresory

Axiální kompresory se skládají z více rotorových řad za sebou, kdy každá rotorová řada lopatek je následovaná statorovou řadou lopatek. Vzduch vstupuje i vystupuje ve směru osy rotace (v axiálním směru). Rotorové seskupení je turbínou roztočeno na vysokou frekvenci otáčení tak, aby byl vzduch nasáván do kompresoru. Vzduch je následně rotujícími lopatkami urychlen k přilehlé řadě statorových lopatek, kde dochází k jeho zpomalení a část kinetické energie je přeměněna v navýšení tlaku. Statorové lopatky také slouží k usměrnění proudu vzduchu pro další stupeň kompresoru. Důvodem využití více řad rotorů a statorů je relativně nízký kompresní poměr jednoho stupně. Je tedy potřeba využití vícestupňových axiálních kompresorů [5, 6].

Axiální kompresory díky schopnosti nasávat větší množství vzduchu na stejné čelní ploše, a dosáhnou vyšších kompresních poměrů s využitím více řad rotorů a statorů než kompresory radiální, nachází častějšího využití v turbínových motorech. Axiální kompresory umožní dosáhnout vyšších tahů motoru. S dosažením vyšších kompresních poměrů dochází k zvýšení žádané účinnosti, a tedy i výhodnější specifické spotřebě paliva pro určitý tah (Obr. 8) [12].

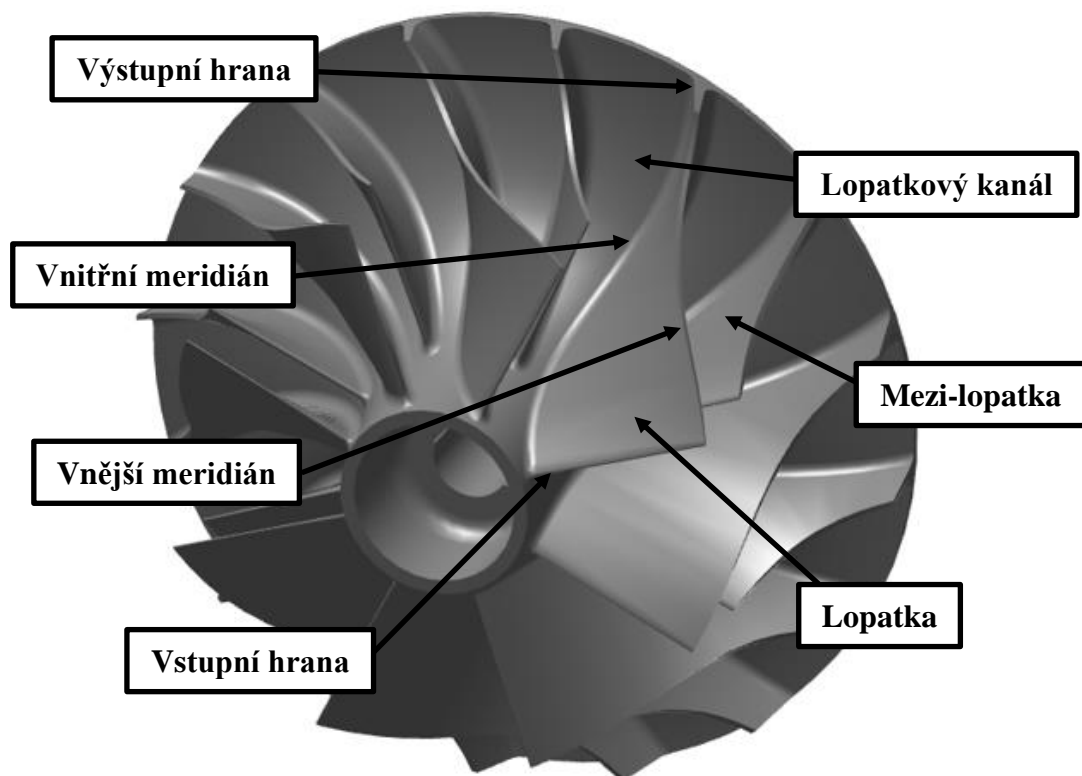


Obr. 8: Závislost efektivní spotřeby paliva na kompresním poměru [5, str. 20].

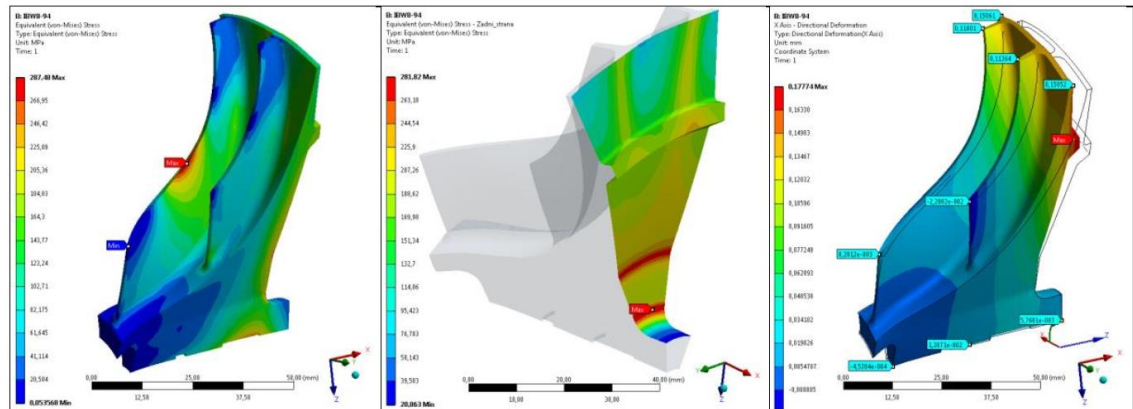
3 ŘEŠENÁ SOUČÁST PROUDOVÉHO MOTORU

Předmětem této práce je řešení výroby součásti radiální kompresorové kolo, které je součástí sestavy malého proudového motoru PBS TJ40-G1. Kolo kompresoru se řadí mezi základní části zmíněného proudového motoru. V roce 2020 bylo ve firmě PBS Velká Bíteš vyrobeno celkem 50ks kol kompresoru v obou modifikacích, tj. IBW1, IBW2.

Kompresorové kolo je možné rozdělit na několik základních částí dle Obr. 9. Zcela zjednodušeně se geometrie lopatek a mezi-lopatek kompresorového kola stanovuje na základě aerodynamických výpočtů, ve kterých se vychází zejména z požadovaného poměru stlačení a potřebného průtoku vzduchu. Takto určená geometrie lopatky je následně konstrukčně dopracována do podoby viz Obr. 9 a následně řešena pomocí pevnostních výpočtů. Zejména se provádí kontrola na pevnost, dynamiku a únavové vlastnosti kompresorového kola. Příklad vyhodnocení výpočtů ekvivalentního napětí a vyhodnocení radiální deformace je znázorněno na Obr. 10. Poměr stlačení vstupní/výstupní hrana kompresorového kola pro TJ 40 má přibližně $p_s = 3$.



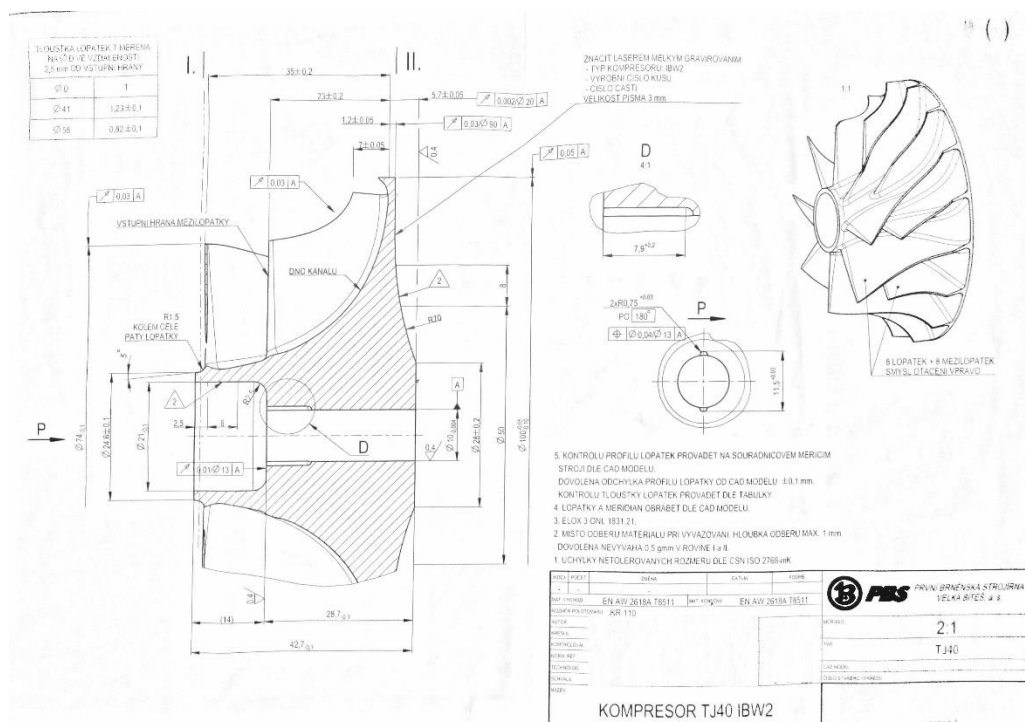
Obr. 9: Popis radiálního kompresorového kola.



Obr. 10: Pevnostní kontrola KK. Vlevo a uprostřed: vyhodnocení ekvivalentního napětí, vpravo: vyhodnocení radiální deformace [17].

3.1 Výkres součásti

Výrobní výkres je znázorněn na Obr. 11.



Obr. 11: Náhled výkresu KK.

3.2 Popis součásti a výroby

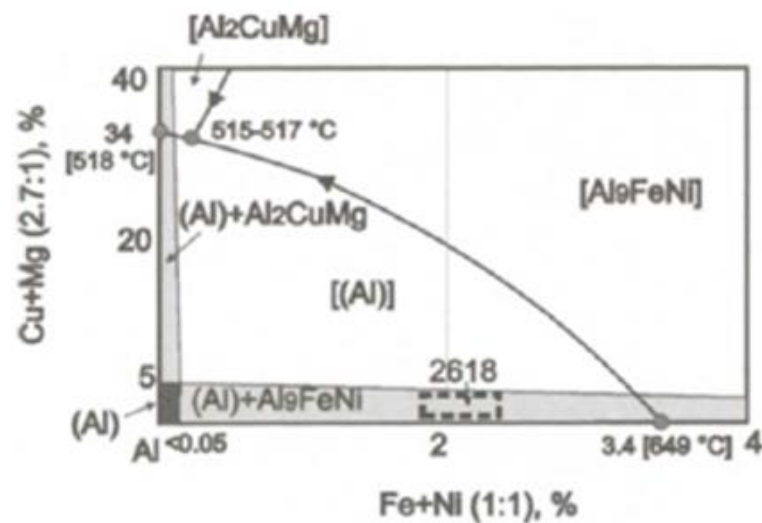
Největší průměr součásti je $\varnothing 100$ mm a délka součásti je 42,7 mm. Na rotační součásti se nacházejí komplexní tvarové prvky, kterými jsou lopatky tohoto kompresoru. Pro výrobu této součásti bude zapotřebí technologie soustružení pro vytvoření rotačního tvaru, technologie vrtání pro vytvoření středového otvoru a 2 dalších unašecích děr a také technologie frézování pro vytvoření lopatek. Pro vylepšení povrchových vlastností a odolnosti vůči okolnímu prostředí budou součásti povrchově upraveny pomocí eloxování.

K výrobě lopatek je zapotřebí stroje, který umožňuje souvislé CNC řízení v pěti osách. Součást obsahuje velice přesné rozměry, kdy nejpřesnějším stupněm je IT4 pro středový otvor, to naznačuje zvolení přesné výrobní technologie jako jemné soustružení nebo vyvrtávání. Nejpřesnější plochy součásti mají předepsanou střední aritmetickou odchylku profilu jako $R_a = 0,4$. Těchto hodnot je možné dosáhnout za pomoci jemného soustružení při snížení posuvové rychlosti. Kompresorové kolo je nutné dynamicky vyvážit pro redukci vibrační a navýšení životnosti jednotlivých prvků sestavy. Na výkrese součásti jsou předepsány různé geometrické tolerance (viz Obr. 11), které se vztahují především ke středovému otvoru a je tedy vhodné zvolit otvor jako technologickou základnu.

3.3 Materiál kompresorového kola

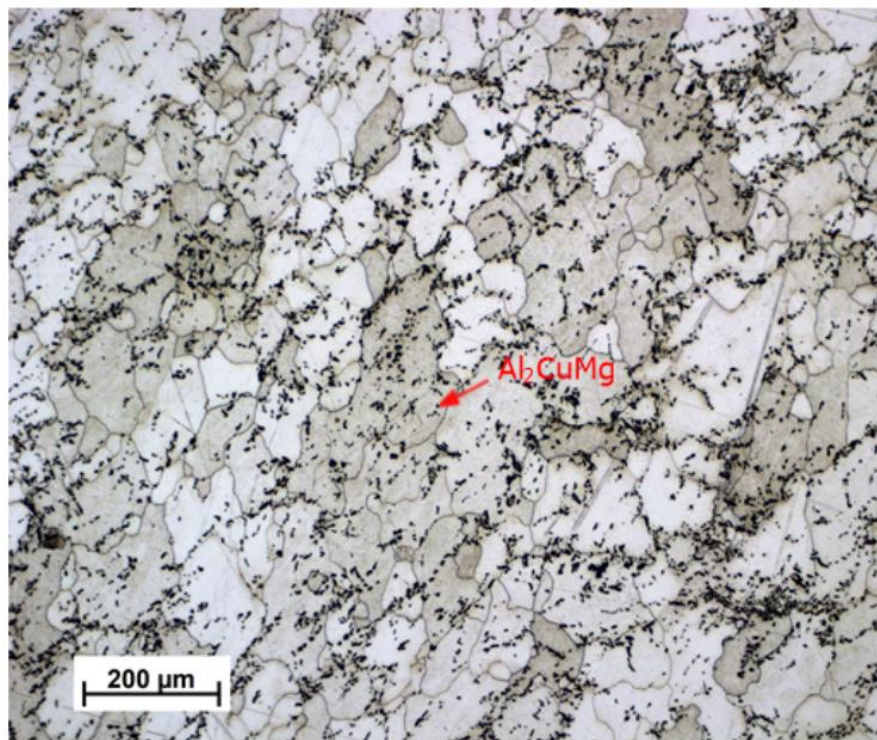
Materiál kompresorových kol musí být navržen jako nákladově nejefektivnější varianta, která je schopna dodržet požadované mechanické vlastnosti za pracovních teplot. Mechanické vlastnosti musí být voleny s ohledem na namáhání součásti při provozním zatížení. Při návrhu součástí pro letecký průmysl je také nutné zvážit poměr mechanických vlastností na hmotnost výsledné součásti pro daný materiál. Jelikož na vstupu do proudového motoru, kde se nachází kompresorové kolo, nedochází k vysokému ohřevu proudícího vzduchu, je často využívána slitina hliníku, a to především pro méně namáhané součásti. Pro aplikace, kde dochází k vysokému namáhání kompresorového kola je nutné zvážit volbu titanových slitin [18].

Jako materiál byla konstruktérem zvolena precipitačně vytvrzená hliníková slitina EN AW 2618 T8511. Jedná se o vysoko pevnostní hliníkovou slitinu s dobrou obrobiteľností a odolností proti atmosférickým podmínkám. Mechanické vlastnosti této slitiny získané z materiálového atestu jsou uvedeny v tab. 3. Tato slitina se využívá v leteckém průmyslu pro rotační součásti, které jsou tepelně namáhány. Má dobrou obrobiteľnost, mechanické vlastnosti a dostatečnou korozivzdornost. Struktura slitiny je z pohledu fyzikální metalurgie a příslušných fázových diagramů tvořena maticí s FCC mřížkou a vytvrzujícími částicemi, které jsou z pohledu matrice s ní koherentní (částice intermediárních fází na bázi prvků Cu) a Mg v GPB zónách, semi-koherentní (intermediární fáze Al_2CuMg , převážně ve stavu po odlití) a nekoherentní (intermediární fáze Al_9FeNi), viz Obr. 12. Rozdíl ve stárnutí slitiny do stavu .71 a T6 se projeví v rozdílném množství koherentních částic. Z materiálu EN AW 2618A byl připraven vzorek pro metalografický výbrus a mikrostruktura je znázorněna na Obr. 13. Popis struktury je pouze odhad, pro zjištění složení jednotlivých částic by bylo zapotřebí provést EDS analýzu v SEM [18, 19].



Obr. 12: Kvazi-ternární oblast Al-Al₉FeNi-Al₂CuMg fázového diagramu Al-Cu-Fe-Mg-Ni [19].

Tepelné zpracování hliníkových slitin je jejich velmi důležitou součástí, avšak tepelně lze zpracovat jen určité hliníkové slitiny. Tepelným zpracováním lze dosáhnout výrazně lepších mechanických vlastností. Nejvyužívanější způsob tepelného zpracování hliníkových slitin je za pomoci mechanismu vytvrzování. Podstata vytvrzování hliníkových slitin spočívá v úvodním rozpouštěcím žíhání, kdy součást ohřejeme na žíhací teplotu a udržíme jí na této teplotě po dobu několika hodin. Teplota ohřevu závisí na chemickém složení hliníkové slitiny a lze jí určit z fázových diagramů. Následuje rychlé ochlazení součásti (např. do vody pro menší součásti), kterým docílíme vzniku přesyceného roztoku. Poslední fází je samotné vytvrzování hliníkové slitiny. Při zvýšení teploty, a u některých slitin hliníku i za pokojové teploty, dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku a vytvrzení hliníkové slitiny. Tepelné zpracování s označením T8511 označuje stav po rozpouštěcím žíhání, uvolnění vnitřního pnutí a umělým stárnutím [20, 21].



Obr. 13: Mikrostruktura vzorku z hliníkové slitiny EN AW 2618A (leptáno HF+HCl+HNO₃+H₂O, zvětšeno 100x) [22].

K dodané tavně materiálu byl dodán materiálový atest, který byl porovnán s materiálovou normou a vyhodnocen. Materiálové složení získané z tohoto atestu viz tab. 2 je v souladu s materiálovým složením předepsaným normou pro materiál EN AW 2618.

Tab.2: Materiálové složení hliníkové slitiny EN AW 2618 – podle materiálového atestu [příloha 1].

Prvek	Hmotnostní obsah [%]
Al	Zbytek
Si	0,18
Fe	1,1
Cu	2,6
Mn	0,04
Mg	1,6
Ni	1,0
Zn	0,07
Ti	0,05
Zr + Ti	0,06
Ostatní prvky	≤ 0,15

Tab.3: Mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 2618 podle dodaného materiálového atestu.

Mechanické vlastnosti hliníkové slitiny EN AW 2618		
Mez pevnosti R_m min.	[MPa]	452,9
Mez kluzu R_e min.	[MPa]	423,8
Tvrdość dle Brynela	[HBW 2,5/62,5]	136,0
Prodloužení A5	[%]	8,9

3.4 Volba polotovaru

Při volbě polotovaru pro následné obrábění je nutné znát rozdíly mezi jednotlivými technologiemi výroby polotovarů a zohlednit mnoho faktorů, mezi které se řadí ekonomické hledisko a mechanické vlastnosti náležící příslušným metodám. Dále je potřeba stanovit potřebné přídavky k obrábění.

3.4.1 Využívané typy polotovarů

Výchozí polotovar může být v mnoha formách, kdy každá volba má svoje výhody a nevýhody. Mezi tyto volby lze řadit mimo jiné polotovary ve formě válcovaných tyčí nebo profilů, předkované polotovary nebo odlitky. K výrobě kompresorových kol obráběním bývá využito polotovarů předkovaných nebo z válcovaných tyčí.

Mezi využívané typy polotovarů lze řadit válcované tyče, výkovky, odlitky [23, 24].

- Válcované tyče patří mezi nejvyužívanější polotovar ve strojírenské výrobě. Jejich značnou výhodou je bezprostřední dostupnost a hodí se především pro nižší výrobní série. Válcované tyče jsou dodávány tvářené za tepla nebo za studena v předem normalizovaných rozměrech. Válcované tyče za tepla se především používají pro větší průměry tyčí, z důvodu lepší tvařitelnosti jsou méně nákladné. Narozdíl od tyčí válcovaných za studena nedosahují takové jakosti povrchu, tvarové přesnosti a jsou předepsány vyšší toleranční stupně. Nevýhodou válcovaných tyčí za studena může být jejich anizotropie, kdy jsou zrna orientována ve směru válcování těchto tyčí, a tedy i lepší mechanické vlastnosti v tomto směru.
- Výkovky patří mezi využívané polotovary, a to jak z hlediska ekonomického, tak především z hlediska materiálových vlastností. Za pomoci předkování tvaru součásti lze dosáhnout nižších spotřeb materiálu, které se mohou projevit na ceně výrobku především při vyšších sériovostech výroby. Při kování součásti také dochází k zjemnění zrn a jejich usměrnění ve směru tvaru součásti a dochází k vylepšení celkových mechanických a únavových vlastností materiálu.
- Odlitky jsou metodou výroby součásti nebo polotovaru pro obrábění, která je vhodná především pro středně velké a velké součásti, kde by mohlo dojít k velké materiálové úspoře. Odlévání lze využít i pro výrobu složitých součástí, které by jinými technologiemi bylo velmi obtížné získat. Odlévání je náchylné ke vzniku porozity a dutin.

3.4.2 Stanovení rozměrů polotovaru

Polotovarem pro vytvoření kompresorového kola budou tyče válcované za studena z hliníkové slitiny EN AW 2618 T8511, navržené konstruktérem. Tyče budou dováženy v délkách 3 m.

Teoretický průměr těchto tyčí byl stanoven empirickým vztahem následovně:

$$p_d = 0,05 \cdot d_{smax} + 2 = 0,05 \cdot 100 + 2 = 7mm, \quad (1)$$
$$d_{pt} = p_d + d_{smax} = 7 + 100 = 107mm.$$

Kde:

p_d ... přídavek pro obrábění na průměr [mm],

d_{smax} ... maximální průměr součásti [mm],

d_{pt} ... teoretický průměr polotovaru [mm].

Za pomoci norem a dostupnosti materiálu jsou voleny normalizované tyče s průměrem nejbližším vyšším tomu teoretickému. Průměr dodávaných tyčí je $d_p = 110$ mm.

Délky jednotlivých přířezů z tyčí byly voleny s ohledem na použítou variantu výrobní technologie. K první navržené variantě technologie je nutné přidat pouze přídavky na obrobení obou čel. Přídavek na jednu plochu byl navržen jako $p_l = 2,5mm$.

Teoretická délka přířezu z válcovaných tyčí pro variantu č. 1:

$$l_{p1} = 2 \cdot p_l + l_{max} = 2 \cdot 2,5 + 42,7 = 47,7mm. \quad (2)$$

Kde:

p_l ... přídavek na obrábění ploch [mm],

l_{max} ... maximální délka součásti [mm],

l_p ... délka přířezu polotovaru [mm].

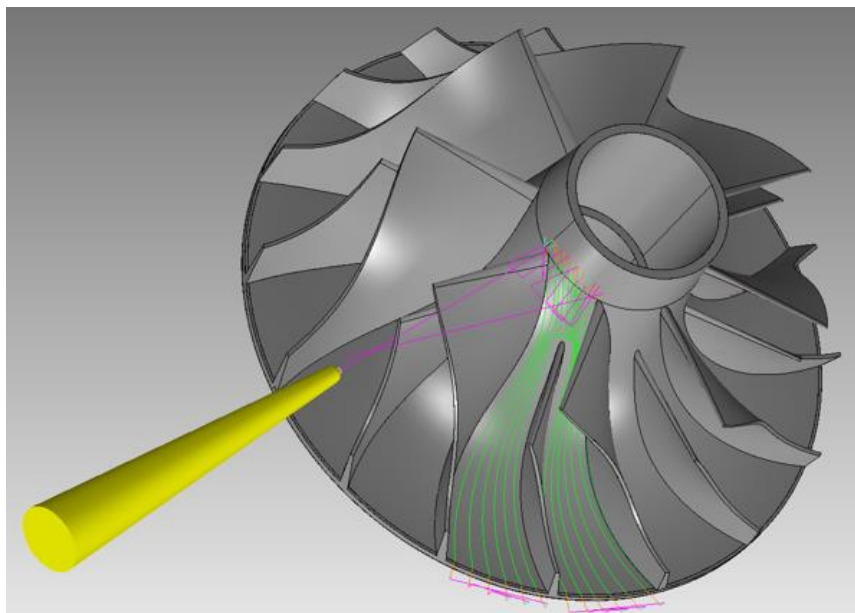
U délky přířezu pro variantu č. 2 se musí k přídavkům na obrábění ještě uvažovat šířka upichovacího nože a také přídavná délka polotovaru pro upnutí součásti. Celkový navržený přídavek uvažující obě části byl přičten k délce přířezu pro variantu č. 1, která již zahrnuje přídavky na obrábění. Celková délka přířezu byla stanovena jako $l_{p2} = 70mm$.

4 ANALÝZA MOŽNÝCH ŘEŠENÍ A PROBLEMATIKA VÝROBY LOPATEK

Pro výrobu radiálního kompresorového kola se využívá více výrobních technologií. Mezi tyto technologie mimo jiné patří odlévání, 5osé obrábění nebo rapid prototyping. Všechny technologie mají své výhody a nevýhody, které především spočívají na velikosti výrobních zakázek, integritě povrchu kompresorového kola a potřebných mechanických vlastnostech [25].

4.1 Výroba kompresorového kola pomocí technologie obrábění

U mnoha moderních kompresorových kol je k výrobě využito technologie obrábění, kdy za pomoci CNC řídicí techniky, CAM softwarů a 5osých obráběcích strojů lze vytvořit komplexní tvary, kterými jsou lopatky kompresorového kola (Obr. 14). Výroba kompresorových kol technologií obrábění je výhodná díky své flexibilitě, výsledné integritě povrchu a možnosti dosažení vysoce přesných výrobních tolerancí. CNC obrábění nabízí možnosti minimalizace výrobních nákladů za současného vylepšení výkonnosti kompresorových kol. Těchto vlastností lze dosáhnout přizpůsobením nástrojových drah pro co nejvyšší úběr materiálu a nejméně nástrojových průchodů s ohledem na výslednou drsnost povrchu lopatek a náboje, která přímo ovlivňuje výkonnost daného kompresorového kola. CNC obrábění kompresorových kol se hodí především pro menší výrobní série nebo prototypovou výrobu, v některých případech lze využít i pro výrobu vyšších sérií. Obrábění lze využít pro výrobu vysoce výkonných kompresorových kol z předkovaných polotovarů s vyššími požadavky na strukturní integritu, která zahrnuje pevnost, únavové vlastnosti a frekvenční odezvu materiálu [26, 27].



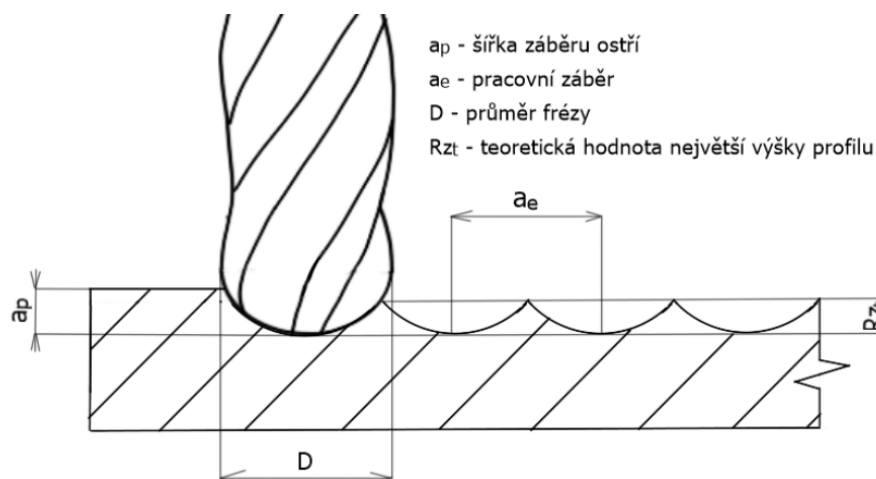
Obr. 14: Obrábění lopatek kompresorového kola.

4.2 Problematika výroby lopatek

Výroba lopatek KK je komplexní záležitost, která zahrnuje mnoho faktorů ovlivňujících výslednou přesnost a jakost povrchu.

4.2.1 Vliv dokončovacích strategií na jakost povrchu

Při využití bodového frézování (tj. obrábění špičkou nástroje s kulovým čelem) vzniká na obráběné součásti charakteristický profil (struktura) povrchu, který má vliv na samotnou účinnost KK (ztráty vzniklé třením). Tento charakteristický profil se skládá z dvou částí, zbytkové výšky po obrábění („cusp height“) a drsnosti povrchu, který vytvoří řezný nástroj. Zbytková výška profilu, kterou vytvoří kulové čelo nástroje závisí na průměru řezného nástroje D a pracovním záběru a_e (Obr. 15). Při dokončování KK bodovým frézováním je nutné zvolit vhodné parametry strategie obrábění (jako šířka pracovního záběru) pro minimalizaci strojního času, ale také tak, aby zbytková výška profilu neovlivňovala výkonnost KK a vyhovovala předepsané drsnosti povrchu. Průměr frézy se volí s ohledem na šířku mezi-lopátkového prostoru. Bodové frézování se využívá převážně pro dokončení dna kanálu, ale lze jej využít i pro dokončení lopatek [26, 27].

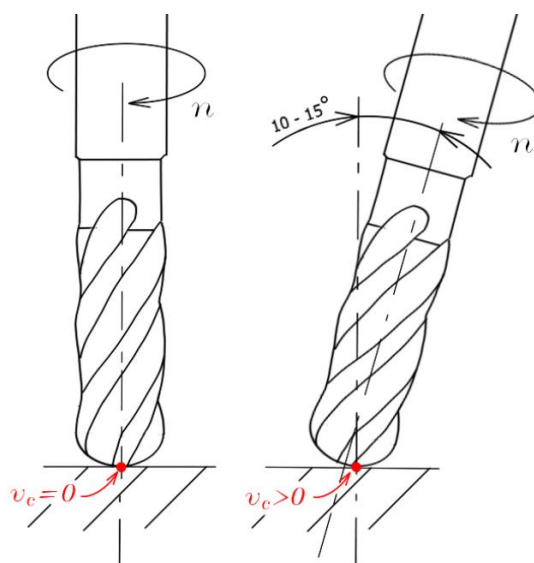


Obr. 15: Charakteristika povrchu vzniklého po frézování frézou s kulovým čelem [28].

K dokončování lopatek KK se využívá bodového frézování nebo frézování bokem. Frézování bokem umožňuje obrobít lopatky na jeden nebo několik průjezdů a umožňuje značné snížení výrobních časů a dosažení lepší jakosti povrchu lopatek. Nevýhodou bočního frézování je vznik odchylek tvaru obrobených lopatek od CAD geometrie lopatek, zejména v závislosti na počtu axiálních záběrů. Důvodem jsou natočené lopatky a jejich proměnná geometrie v obou směrech, jak axiálním, tak v radiálním. Frézování bokem také neumožňuje obrábět všechny druhy lopatek, ale především tvary ploch, které k tomu byly navrženy (přímková plocha). Při využití bočního frézování je obtížnější volba řezných podmínek než u bodového frézování, pro vytvoření kvalitního povrchu. Další nevýhoda strategie frézování bokem spočívá v kinematice stroje. Když je osa obrobku paralelní s osou nástroje (u výstupní hrany), tak i malé změny v orientaci nástroje mohou

způsobit velké, nečekané rotační pohyby. Tyto pohyby mohou poškodit obrobek nebo i řezný nástroj [26, 29, 30].

Při využití fréz s kulovým čelem je nutné brát v potaz, že v ose nástroje se řezná rychlost blíží nulovým hodnotám (Obr. 16) a díky této skutečnosti dochází k nežádoucím jevům jako je pěchování třísky a zhoršení drsnosti obrobeneho povrchu. Je tedy žádoucí udržovat stálý odklon nástroje vůči obrobku zhruba v rozmezí 10 až 15°, čímž dojde k zvýšení minimální řezné rychlosti, prodloužení životnosti nástroje, zlepšení utváření třísky a zlepšení jakosti obrobene plochy [31].



Obr. 16: Náklon frézy s kulovým čelem.

4.2.2 Obrábění tenkostěnných součástí

Lopatky patří mezi tenkostěnné dílce, u kterých při jejich obrábění dochází k nežádoucím vlivům, které ovlivňují zejména jejich rozměrovou přesnost a jakost výsledného povrchu. Tyto problémy s přesností a jakostí povrchu výroby tenkostěnných dílců se mohou dále promítnout i na samotné produktivitě v důsledku změny řezných parametrů a nástrojových drah. Důsledkem snížení přesnosti jejich výroby je nízká tuhost, z které následně plyne statické vychýlení nebo vibrace. Nejzásadnější vliv na jejich rozměrovou přesnost má právě statické vychýlení, které je způsobeno působením řezných sil na tyto lopatky [32, 33].

V průběhu obrábění tenko-stěnných součástí mohou vznikat vibrace, které mají zásadní vliv na povrch součásti, opotřebení nástroje nebo také na produktivitu. Vznik vibrační soustavy obrobek – nástroj – stroj může mít více původů jako nevyváženost nástroje, zrychlení pohybů nebo řezný proces a může zapříčinit i poškození povrchu. Vibrace s velkou amplitudou nejčastěji vznikají při rezonanci vlastních frekvencí obráběné součásti a frekvenčního spektra řezných sil, které se skládá z frekvence otáčení nástroje a vzniklých rázů ze záběru řezného nástroje. Pro eliminaci vibrací v oblasti rezonance je nutné zvolit vhodné řezné podmínky (otáčky, šířku, hloubku záběru), které

zajistí stabilní obrábění a vysokou produktivitu. Volbu vhodných a stabilních řezných podmínek lze určit např. s pomocí metody „trial-and-error“, která sleduje vliv jednotlivých řezných parametrů na průběh obrábění nebo sestrojením „lobe diagramů stability“, které znázorňují, pro jaké řezné podmínky je obráběcí proces stabilní. Pro sestrojení těchto diagramů lze využít speciální software a zařízení pro měření frekvenční odezvy nástroje, obrobku a stroje nebo numerické metody jako MKP (metoda konečných prvků). V případě tenkostěnných součástí je využití lobe digramů obtížnější a je nutná jejich modifikace z důvodu dynamické změny v průběhu obrábění. Vlastní frekvence součásti se mění v průběhu obrábění při úběru materiálu, který snižuje tuhost a hmotnost lopatek [33, 34, 35].

Byly sestrojeny různé strategie, které umožňují efektivně řešit vychýlení tenkostěnných součástí při bočním frézování, pro zajištění výrobních tolerancí. Mezi tyto strategie lze řadit kompenzaci vychýlení nástroje pomocí modifikovaných nástrojových drah nebo optimalizaci na základě řezných parametrů (radiálního záběru frézy). U strategií využívajících kompenzace nástrojových drah lze využít analytického/početního modelu, který využívá MKP k určení vychýlení v závislosti na řezné síle [32].

4.2.3 Kinematika víceosých obráběcích strojů

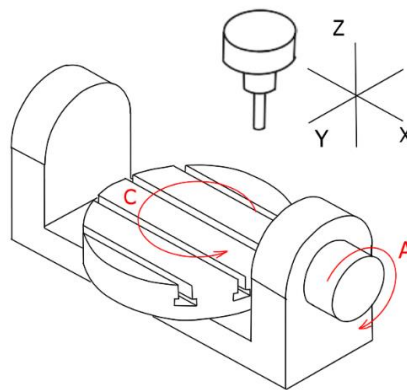
Pětiosá obráběcí centra v kombinaci s CAM softwary se stala nezbytnou součástí leteckého průmyslu a výroby tvarově složitých součástí, které obsahují obecné tvarové plochy. Jejich hlavní výhodou je možnost libovolně řídit nastavení pozice a orientace řezného nástroje s využitím počítačové techniky. Díky tomuto lze efektivně vytvářet tvarově složité součásti a zabránit kolizím nástroje s obrobkem a upínačem [36].

V porovnání s 3osými obráběcími stroji mají 5osá obráběcí centra značně složitější kinematiku. Je zapotřebí inverzních kinematických modulů, které umožní převést data z CAM softwaru obsahující pozice nástrojů na jednotlivé lineární a rotační pohyby stroje. Pohyby jednotlivých lineárních os jde snadno ovlivnit rotačními. V průběhu generování drah z CAM softwaru a převodu přes post-processor se mohou vyskytnout různé problémy související s kinematikou stroje, které mohou ovlivnit povrch součásti. Jeden z těchto jevů nastává v okolí bodu singularity, tj. bod vyskytující se, když je hlavní rotační osa paralelní s osou nástroje. Jedná se o rozmezí, kdy jsou možná dvě řešení v rámci inverzní kinematiky. V důsledku toho se pohyb rotační osy stane nepředvídatelný a může nastat otočení až o 180°. Náhlé změny v rotačních osách mohou zapříčinit velké množství kompenzačních pohybů lineárních os, které způsobí otřes servo motorů a vibrace obráběcího stroje, které mohou poškodit obráběnou plochu nebo zhoršit kvalitu obrobeného povrchu. Z těchto důvodů je nutné se bodu singularity vyhnout nebo jej eliminovat. Toho lze docílit pomocí metod, které se zaměřují na práci s CAM softwary nebo post-processorů viz [29, 36, 37].

Pro vytvoření kompresorového kola je nutné využití více obráběcích technologií. V dnešní době v důsledku rozšíření počítačem řízených víceosých obráběcích center je možná integrace více technologií do jednoho strojního zařízení a není nutné využití

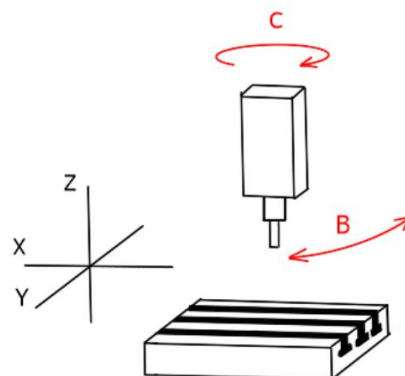
univerzálních strojů sloužících pouze pro jednotlivé technologie obrábění. Víceosá obráběcí stroje se nachází v různých kinematických uspořádáních, kdy každá kinematická konfigurace má své omezení [38].

- Nejjednodušší konstrukce víceosých obráběcích strojů lze dosáhnout doplněním 3osého frézovacího stroje o přídatnou osu, nebo více os. Toto řešení je velice univerzální a instalace zařízení je velmi jednoduchá, avšak stroj není konstruován s úmyslem víceosého frézování a mohou se vyskytnout problémy v kinematice stroje.
- Další konfigurací u frézovacích obráběcích center je konfigurace stůl-stůl neboli konfigurace s „kolébkovým stolem“ (Obr. 17), kdy dvě rotační osy jsou zabudovány do spodního lože. Tato konfigurace je navržena s úmyslem pravého 5osého obrábění a je určena především pro výrobu menších skříňových obrobků.



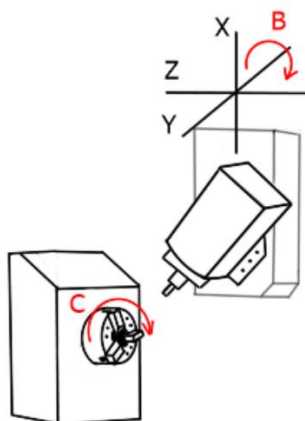
Obr. 17: Konfigurace stůl-stůl.

- Další konfigurace určená pro 5osé obrábění je konfigurace stroje pro velké obrobky, kdy dvě přídatné rotační osy jsou zabudovány přímo do frézovacího vřetená (Obr. 18), a není tedy nutné polohovat těžké součásti, ale pouze nástroj.



Obr. 18: Konfigurace hlava-hlava.

- Pro obrábění rotačních součástí, na kterých je potřeba využití frézovací technologie, lze využít soustružnicko-frézovací centrum. Mezi takovéto obráběcí centra lze zařadit provedení s horizontální polohou vřetene, které lze využít především pro obrobení menších rotačních součástí. Mezi tyto stroje lze zařadit Mazak integrex i300, kinematika tohoto zařízení je znázorněna na Obr. 19.



Obr. 19: Konfigurace soustružnicko-frézovacího obráběcího centra.

Volba konkrétního stroje ve společnosti PBS Velká Bíteš bude dána stávajícím strojovým parkem, který je v rámci DLT k dispozici. V případě nevyrobitelnosti dané součásti bude formulováno doporučení stroje pro danou aplikaci.

4.2.4 CAM software a post-processing

Mezi klíčové prvky pro výrobu lopatek kompresorového kola patří CAM (*Computer aided manufacturing*) softwaru. CAM softwaru umožňují počítačem řízenou automatizaci výrobního procesu. Jejich využití lze mimo jiné přiřadit k tvorbě NC programů, zejména z importovaných dat CAD (*Computer aided design*) modelů, k řízení CNC a DNC strojů. Tvorba NC programů zahrnuje vytvoření optimalizovaných nástrojových drah, a k nim přidružených operací (přívod procesní kapaliny, zapnutí otáček nástroje). Pro odhalení a zamezení kolizí lze sestavit sestavy, které zahrnují nástroje, upínací prvky, části stroje a následnou simulací ověřit sestavený NC program a jeho nástrojové dráhy před samotným zahájením výroby. Mezi výhody využívání CAM softwarů lze řadit zvýšení produktivity, propojení a navázání na data z CAD modelu, úplná kontrola kolizí. Jejich využití lze především uplatnit pro tvorbu nástrojových drah pro 5osé obrábění a obrábění tvarově složitých součástí jako jsou formy, zápustky nebo lopatky KK. Využití ale nacházejí v celém rozsahu strojírenské výroby. Jako CAM software byl zvolen PowerMill Ultimate verze 2021.1.1.2021109 [39, 40].

Většina CAM softwarů je navržena tak, aby vytvářela data s nástrojovými drahami nezávisle na výrobním zařízení a jeho řídicím systému. Soubor s těmito daty je potřeba převést do formátu, který je řídicí systém stroje schopen zpracovat pro následné vytvoření pohybů stroje dle programu. K tomuto úkolu je využíván post-processor, který je určen

ke specifickému řídicímu systému, strojnímu zařízení a jeho kinematice. Post-processor musí zohlednit kinematiku stroje, a to především pokud se jedná o 5osé obráběcí stroje a pohyb jejich jednotlivých rotačních os. Kinematika stroje má zásadní vliv na tom, jak by měla být data z CAM softwaru převedena. Řídicí systém soustružnicko-frézovacího centra je od společnosti Mazak jako součást jejich zařízení Mazak integrex i300 [41].

4.3 Popis stávajícího technologického postupu výroby

V současné době se k výrobě kompresorových kol ve firmě PBS Velká Bíteš využívá výrobní technologie, která je složena z celkového počtu 15 operací (technologický postup viz příloha 2). V tabulce č. 4 lze pozorovat, že stávající proces výroby KK se skládá z šesti soustružnických operací, dvou operací, které využívají frézovacího obráběcího centra a dalších potřebných operací k zajištění výroby kompresorového kola. Lopatky KK jsou vyráběny na obráběcím centru Hermle C20U. Pro upnutí součásti jsou nutné dva frézovací, jeden soustružnický přípravek a trn pro dynamické vyvažování KK.

Tab.4: Strojní zařízení použitá pro jednotlivé operace v současné technologii výroby.

Číslo operace	Strojní zařízení
0/0	Pásová pila (TMJ PP360)
10/10	Soustruh automatický produkční (SP280Y)
20/20	Soustruh automatický produkční (SP280Y)
30/30	Obráběcí centrum (Hermle C20U)
40/40	Soustruh hrotový (SV18R)
50/50	Obráběcí centrum (Hermle C20U)
60/60	Soustruh hrotový (SV18R)
70/70	Soustruh automatický produkční (SP280Y)
80/80	Soustruh automatický produkční (SP280Y)
90/90	Zámečnické práce
100/100	Laserové značení (TrueMark 5000)
110/110	Vyvažovačka (Schenk Passio 5)
120/120	Mezi-operační kontrola
130/130	Povrchová úprava (Elox)
140/140	Výstupní kontrola

4.4 Návrh možných řešení inovovaného technologického postupu

Před samotným zpracováním výrobní technologie je vhodné vytvořit více variantních řešení. Následně jednotlivá řešení zhodnotit a vybrat z nich to nejvhodnější, které by mohlo co nejvíce zefektivnit výrobu kompresorového kola a snížit výrobní náklady.

4.4.1 Varianta TP č. 1

První návrh technologie je zaměřen na lokalizaci co největšího počtu operací na jedno strojní zařízení a k omezení počtu pracovišť a s tím související manipulace s materiálem. Navržený technologický postup viz příloha 3 se skládá z jedenácti operací a vyžaduje 2 ustavovacích přípravků. Tyto přípravky viz příloha 4 byly navrženy s ohledem na výkresem požadované rozměrové a geometrické tolerance. Převážné množství obráběcích operací je vykonáváno na soustružnicko-frézovacím centru Mazak integrex i300, včetně samotného obrábění lopatek kompresorového kola. Tato varianta byla podrobně rozpracována včetně návrhu potřebných nástrojů. V průběhu zpracování výrobní dokumentace byla varianta č. 1 inovována a na jejím základě vznikla varianta řešení technologického postupu č. 2.

Tab. 5: Seznam obráběcích operací technologického postupu – varianta č. 1.

Číslo operace	Strojní zařízení	Popis práce
10/10	Mazak integrex i300	Upnout do sklíčidla Vrtat středový otvor Soustružit válcovou plochu Soustružit vnitřní zahloubení Vrtat a frézovat unašecí otvory
20/20	Mazak integrex i300	Upnout do měkkých čelistí Soustružit válcovou plochu Vyfrézovat 2 pomocné drážky Vrtat středový otvor na hotovo
30/30	Mazak integrex i300	Upnout do přípravku Soustružit vnější meridián Frézovat lopatky
40/40	Mazak integrex i300	Upnout na trn do přípravku Soustružit levý rádius R70

4.4.2 Varianta TP č. 2

Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, tato varianta vznikla v průběhu prací na inovovaném výrobním postupu a nezaměřuje se již na minimalizaci počtu pracovišť a omezení nutné manipulace s materiálem, ale pouze na redukci nutného počtu výrobních přípravků a nutnosti přepínání dílce v průběhu výroby. Pro obrobení celého KK je opět využito soustružnicko-frézovací centrum Mazak integrex i300. Celý technologický postup se skládá z devíti operací. Redukce počtu operací se projevila na nutnosti využití delších přířezů v porovnání s variantou č. 1. Celý technologický postup se nachází v příloze 5.

Tab. 6: Seznam obráběcích operací technologického postupu – varianta č.2.

Číslo operace	Strojní zařízení	Popis práce
10/10	Mazak integrex i300	Upnout do sklíčidla Vrtat středový otvor Soustružit vnější meridián Soustružit vnitřní zahloubení Frézovat lopatky Vrtat a frézovat unašecí otvory Soustružit levý rádius R70 Upíchnout
20/20	SV18RA	Upnout na soustružnický trn Soustružit válcovou plochu Zarovnat čelo

4.4.3 Varianta TP č. 3

Na rozdíl od dvou předchozích variant, je využito pro výrobu lopatek KK frézovacího centra Hermle C20U. Tato varianta vznikla jako záložní, a to na základě úvahy, že soustružnicko-frézovací centrum Mazak integrex i300 nebude vzhledem ke konstrukci stroje schopno lopatky KK zhotovit v požadované kvalitě a přijatelné rychlosti. Tato varianta bude podrobně rozpracována pouze v případě, že se nepotvrdí předpoklad možnosti výroby lopatkování na soustružnicko-frézovacím centru.

5 NÁVRH NOVÉHO TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU A TECHNOLOGICKÁ PŘÍPRAVA VÝROBY

Návrh nového technologického postupu je zaměřen na výrobu kompresorového kola na co nejméně strojních zařízení za účelem minimalizace ztrát vzniklých s manipulací materiálu.

V přechozí kapitole byly navrženy tři variantní řešení výrobní technologie radiálního kompresorového kola vedoucí k případné inovaci a zefektivnění současné výrobní technologie a možnému snížení výrobních nákladů. Z těchto variant byla vybrána k následnému zpracování a zhodnocení varianta č. 2. Důvodem volby této varianty byla nejvyšší možná redukce počtu pracovišť a nutného přepínání obrobku. Varianta č. 3 nebyla podrobně rozpracována a je ponechána jako záložní pro případ, že se neprokáže vyrobitelnost dílce pomocí varianty č. 2. Varianta č. 1 je rozdělena do více operací na obráběcím centru a využívá upínacích přípravků. Kvůli vysokým nárokům na geometrické tolerance je možnost vzniku nepřesností, které mohou vést k delším ustavovacím časům součástí. U varianty č. 2 tento problém nevzniká, jelikož pracuje především s jedním upnutím pro většinu obráběcích operací. Varianta č. 2 jako jediná také nevyžaduje upínacích přípravků. Nevýhodou varianty č. 2 je vyšší spotřeba materiálu oproti variantě č. 1 a č. 3.

5.1 Volba strojů

Hlavním strojním zařízením zvoleným pro vykonání většiny potřebných soustružnických a frézovacích operací je 5osé soustružnicko-frézovací centrum Mazak integrex i300 (Obr. 20). Parametry stroje jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7: Parametry stroje Mazak integrex i300.

Název stroje	Mazak integrex i300
Typ stroje	Soustružnicko – frézovací centrum
Maximální soustružený průměr	658 mm
Maximální pracovní délka	1011 mm
Maximální otáčky hlavního vřetene	4000 min ⁻¹
Výkon motoru (40% ED rating)	30 kW
Maximální otáčky vedlejšího vřetene	12000 min ⁻¹
Výkon motoru (20% ED rating)	22 kW
Pohyb osy X	615 mm
Pohyb osy Y	1077 mm
Pohyb osy Z	260 mm
Pohyb osy W	1026 mm



Obr. 20: Soustružnicko-frézovací centrum Mazak integrex i300 [42].

Další využitá strojní zařízení jsou uvedena v tab. 8.

Tab.8: Seznam dalších použitých strojních zařízení.

Navržené strojní zařízení
Pásová pila – TMJ PP360
Soustružnicko-frézovací centrum – Mazak integrex i300
Hrotový soustruh – SV18RA
Laserové značení (TrueMark 5000)
Vyvažovačka (Schenk Passio 5)

5.2 Volba nástrojů

Kompresorové kolo je tvarově složitá součást a vyžaduje užití běžných i speciálních obráběcích nástrojů speciálně určených pro obrábění lopatek kompresorového kola. Je zapotřebí nástrojů pro technologii soustružení, frézování a vrtání.

Pro obrábění kompresorového kola byly voleny nástrojové materiály především ze slinutého karbidu (SK). SK patří mezi nejvyužívanější materiály pro řezné nástroje a umožňují dosahovat vysoké produktivity výroby. Dostupnost řezných nástrojů z SK je bohatá a lze si vybrat z nástrojů mnoha různých tvarů z katalogů spousty předních výrobců. Z důvodu velkého množství vyráběných nástrojů z SK je jejich pořizovací cena výhodná. SK se řadí do několika tříd (P, M, K, N, S, H), kdy pro neželezné kovy jsou určeny SK třídy N. Pro vyšší produktivitu lze volit povlakované řezné nástroje, jelikož je ale materiálem kompresorového kola hliníková slitina je nutné využít nástrojů, které nejsou povlakované nebo jejichž povlak nereaguje s povrchem hliníku.

Pro soustružení vnějšího tvaru, otvoru, jeho zahloubení a zapichování byly voleny soustružnické nástroje s VBD. Pro vytvoření přesného rozměru otvoru byl zvolen soustružnický nůž řady PICCO. Všechny řezné materiály byly voleny z SK.

Tab.9: Použité soustružnické nástroje.

Označení držáku	Označení VBD
S32U SCLCR 12	CCGT120404-N-AS
A10K SWLCR 04	WCGT040204-PM2-WK1
PICCO 7-50	-
A16Q – SDUCR 07	DCGT070202FN
SDJCR2020K11	DCGT11T302 ISCAR
KM63XMZBSR4Y	EVBSN26J0540

Pro vytvoření potřebných otvorů na součásti byly voleny vrtáky celistvé, s vyměnitelnou korunkou nebo VBD. Všechny řezné nástroje byly voleny z SK.

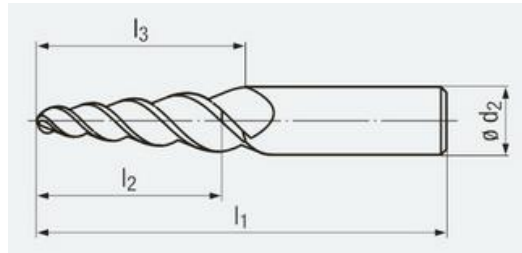
Tab.10: Použité frézovací a vrtací nástroje.

Název nástroje	VBD, korunka
Středící vrták Ø8/90°	-
Vrták s VBD Ø16, Ø24	SCGX050204
Vrták s korunkou KTFS Ø8	Korunka HPML KCMS15
Vrták Ø1,4 (5D)	-
Fréza Ø1,5	-

Nástroje pro frézování lopatek byly voleny s ohledem na rozměry kompresorového kola a mezi-lopátkového prostoru. Pro hrubování mezi-lopátkového prostoru, dokončení povrchu lopatek i dokončení náboje byly navrženy monolitní stopkové kuželové frézy s kulovým čelem (Obr. 21), frézy jsou vyrobeny z SK. Nástroje byly dodány firmou ROTANA.

Tab.11: Použité nástroje na frézování lopatek.

Použití nástroje	Průměr stopky d_2 [mm]	Délka řezné části l_1 [mm]	Celková délka l_2 [mm]	Počet zubů z [-]	r [mm]	α [°]
Hrubování mezi-lopátkového prostoru	16	74	140	3	3	8
Zbytkové hrubování, dokončení lopatek, náboje	12	65	120	3	1,5	8



Obr. 21: Kuželová fréza s kulovým čelem [43].

Nástroje pro frézování lopatek byly upnuty do tepelných upínačů (Obr. 22). Tepelné upínače přispívají k bezkoliznímu obrábění velmi přesných a kvalitních ploch a jsou vhodné pro 5osé obrábění. Mezi jejich přednosti patří velmi nízké obvodového házení, vysoká tuhost, stabilita a štíhlá konstrukce upínače. Nevýhodou těchto upínačů je potřeba odlišných upínačů pro každý průměr stopky nástroje. Nástroje jsou upnuty za pomoci tepelné roztažnosti, kdy po ohřátí upínače dojde k zvětšení vnitřního průměru otvoru tohoto upínače a po následném vložení nástroje a vychladnutí dojde k bezpečnému a přesnému upnutí nástroje [44].



Obr. 22: Tepelné upínání [45].

5.3 Navržený technologický postup

Návrh technologického postupu byl zpracován se zaměřením na výrobu kompresorového kola se všemi potřebnými náležitostmi. V tabulce č.12 je uveden popis činnosti a strojních pracovišť jednotlivých operací TP. Celý technologický postup je uveden v příloze č.3.

Tab.12: Zkrácený technologický postup.

číslo operace	název pracoviště, třídící číslo	popis práce
0/0	pásová pila – TMJ PP360, 05967	řezat tyče na polotovary
10/10	obráběcí centrum Mazak integrex i300, 44456	upnout do sklíčidla vrtat středový otvor – hrubovat, dokončit vnější soustružení z leva – hrubovat, dokončit vnitřní soustružení z leva – hrubovat, dokončit frézovat lopatky – hrubovat, dokončit vrtat, frézovat unašecí otvory soustružit rádius z prava srazit hrany upíchnout
20/20	Soustruh hrotový SV18RA, 04124	upnout na soustružnický trn soustružit válcovou plochu zarovnat čelo
30/30	Zámečnické pracoviště, 09421	celkově srazit hrany
40/40	pračka	odmastit a očistit
50/50	Laserové značení – TruMark Station 5000, 95823	značit dle výkresu
60/60	Vyvažovačka, 28922	dynamicky vyvážit
70/70	Mezi-operační kontrola, 09860	kontrola profilu lopatek na 3D souřadnicovém přístroji, kontrola rozměrů
80/80	Povrchová úprava (ELOX), 09635	povrchová úprava
90/90	Výstupní kontrola, 09860	kontrola profilu lopatek na 3D souřadnicovém přístroji, kontrola rozměrů

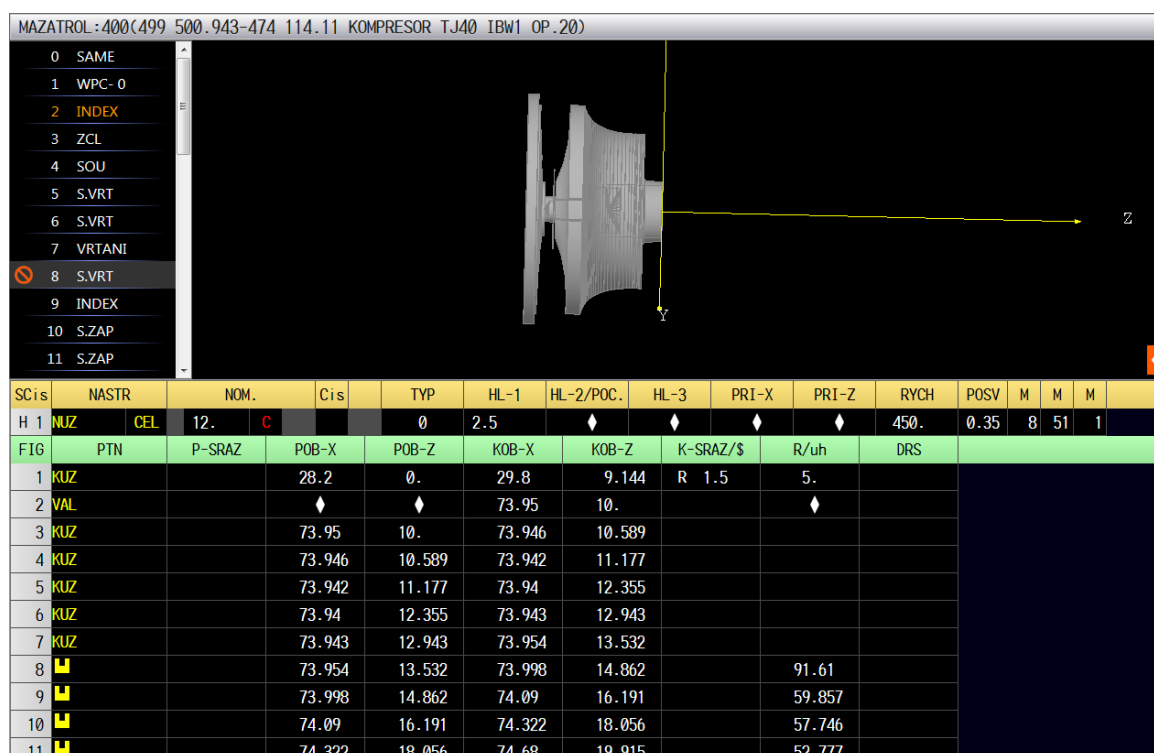
6 OVĚŘENÍ ZVOLENÉHO TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU

Primárním úkolem ověření zvoleného technologického postupu bude zjistit, zda lze sloučit soustružnické a frézovací operace stávajícího postupu a v daných výrobních tolerancích zhotovit kompresorové kolo. Proto bude následující část zaměřena převážně na soustružnicko-frézovací operace. Ostatní operace zůstávají převážně beze změny ve srovnání se stávajícím postupem výroby.

6.1 Příprava programu pro soustružení tvaru KK

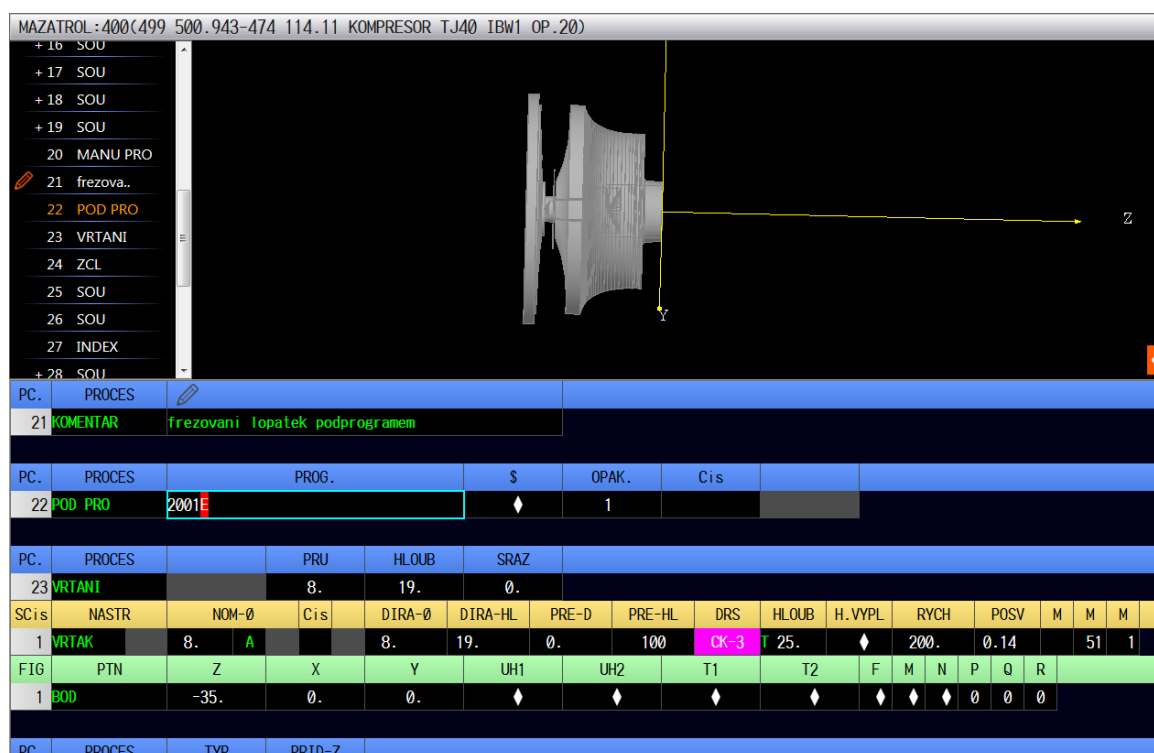
Pro přípravu programu pro stroj Mazak integrex i300 se používá softwaru společnosti Mazak s názvem Mazatrol Smooth X. Samotná tvorba programu je zaměřena na postupné zhotovení vnějšího tvaru, vnějšího meridiánu KK (část programu je znázorněna na Obr. 23) a vnitřního otvoru v postupných krocích s ohledem na postupné odebrání materiálu a s tím souvisejícího uvolňování vnitřního napětí. Z tohoto důvodu je program rozdělen na hrubování tvaru KK, následné dokončení tvarových ploch. Protože naprogramování tvaru lopatek v samotném softwaru Mazatrol Smooth X není v praxi zcela reálně proveditelné, bylo využito jiného softwaru pro generování dat ve formátu ISO a následné vyvolání takto získaného podprogramu určeného pro samotnou část procesu frézování lopatek KK (viz Obr. 24).

MAZATROL:400(499 500.943-474 114.11 KOMPRESOR TJ40 IBW1 OP.20)



SCi s	NASTR	NOM.	Ci s	TYP	HL-1	HL-2/POC.	HL-3	PRI-X	PRI-Z	RYCH	POSV	M	M	M
H 1	NJZ	CEL	12.	C	0	2.5	♦	♦	♦	450.	0.35	8	51	1
FIG	PTN	P-SRAZ	POB-X	POB-Z	KOB-X	KOB-Z	K-SRAZ/\$	R/uh	DRS					
1	KJZ		28.2	0.	29.8	9.144	R 1.5	5.						
2	VAL		♦	♦	73.95	10.		♦						
3	KJZ		73.95	10.	73.946	10.589								
4	KJZ		73.946	10.589	73.942	11.177								
5	KJZ		73.942	11.177	73.94	12.355								
6	KJZ		73.94	12.355	73.943	12.943								
7	KJZ		73.943	12.943	73.954	13.532								
8	U		73.954	13.532	73.998	14.862		91.61						
9	U		73.998	14.862	74.09	16.191		59.857						
10	U		74.09	16.191	74.322	18.056		57.746						
11	U		74.322	18.056	74.68	19.915		52.777						

Obr. 23: Část programu pro zhotovení vnějšího meridiánu KK.



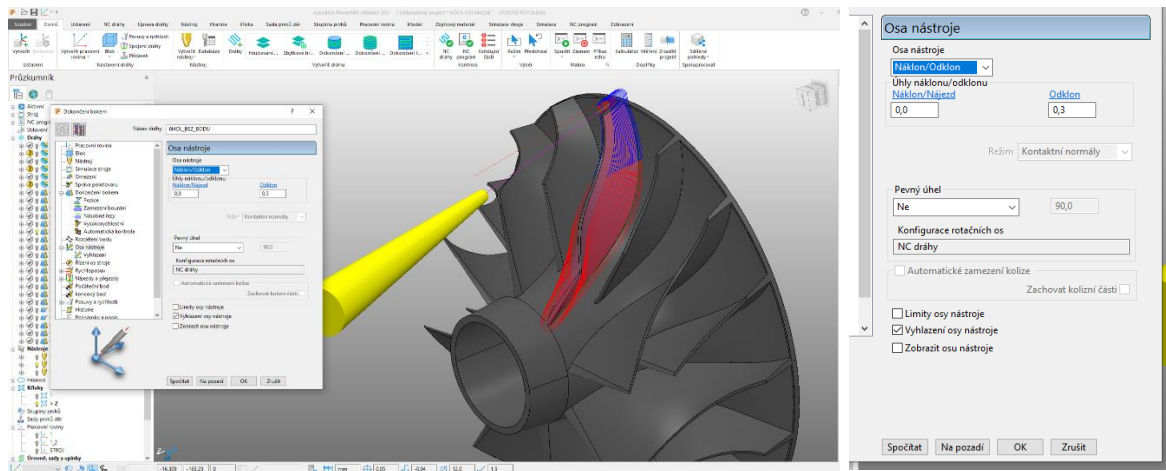
Obr. 24: Znáornění odkazu na podprogram ve formátu iso v prostředí mazatrol.

6.2 Příprava programu pro výrobu lopatek a obrábění lopatek KK

Výroba lopatek patří mezi nejdůležitější částí celého výrobního procesu kompresorového kola. Jedná se o časově nejnáročnější technologickou operaci a patří tedy mezi nejnákladnější výrobní položku. Je tedy potřebné se na tuto výrobní část co nejvíce zaměřit pro získání co nejkratšího výrobního času a dosažení potřebné integrity povrchu. K vytvoření drah pro hrubování a dokončení lopatek bylo využito CAM softwaru PowerMill Ultimate verze 2021.1.1.2021109.

Výroba lopatkování je u každého typu a velikost KK specifická a každé KK vyžaduje jiné nastavení při přípravě programu v CAM softwaru. Nedá se tedy jednoduše popsat univerzální postup výroby KK a následně aplikovat na všechny typy KK.

Jak bylo již uvedeno je vhodné udržovat stálý odklon nástroje v rozsahu 10 až 15°. Při uvažované aplikaci, tj. výroby KK existují ovšem omezující parametry v podobě velikosti mezi-lopatkového prostoru, které neumožňují v mnoha případech využít tento doporučený rozsah odklonu. Při přípravě programu v CAM softwaru PowerMill Ultimate verze 2021.1.1.2021109 bylo zjištěno, že tvar lopatek a velikost mezi-lopatkového prostoru umožní držení stálého odklonu 0,3° (Obr. 25).



Obr. 25: Nastavení odklonu frézy při frézování lopatek.

Důležitým krokem vedoucím k úspěšné výrobě KK je postupné hrubování lopatek vedoucí k uvolnění vnitřního napětí materiálu a následné sjednocení velikosti přídavku na plochách lopatek a v poslední řadě dokončení finálního tvaru jednotlivých lopatek a lopatkového kanálu. Postup tvorby programu je popsán v následujícím textu.

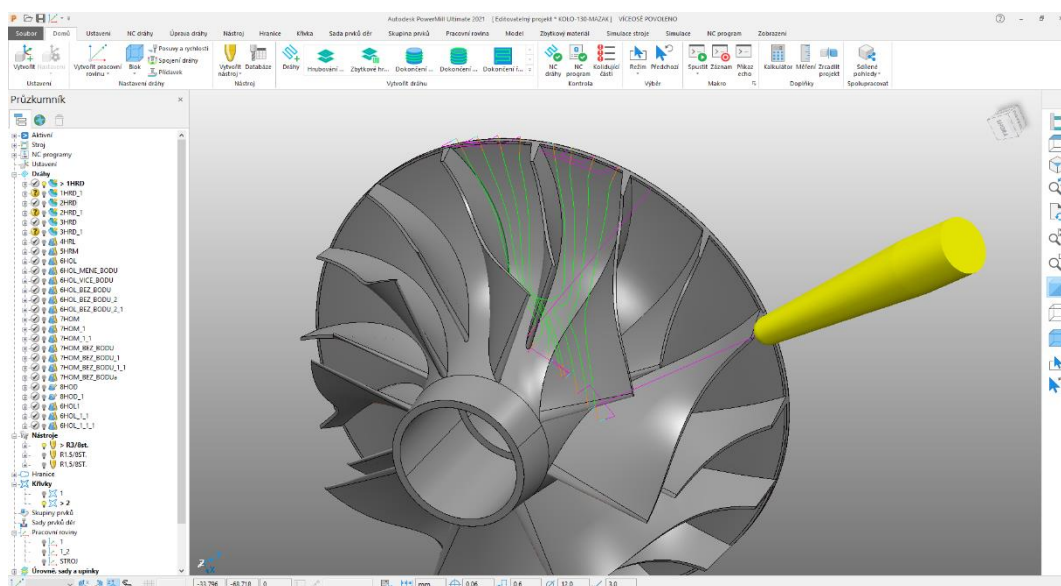
6.2.1 Hrubování mezi-lopatkového prostoru

Hrubování lopatek patří mezi nejdůležitější operace, které se podílí na výsledné produktivitě obrábění kompresorových kol. Při hrubování mezi-lopatkových prostorů je nutné se zaměřit na co nejefektivnější odstranění materiálu z mezi-lopatkového prostoru [46].

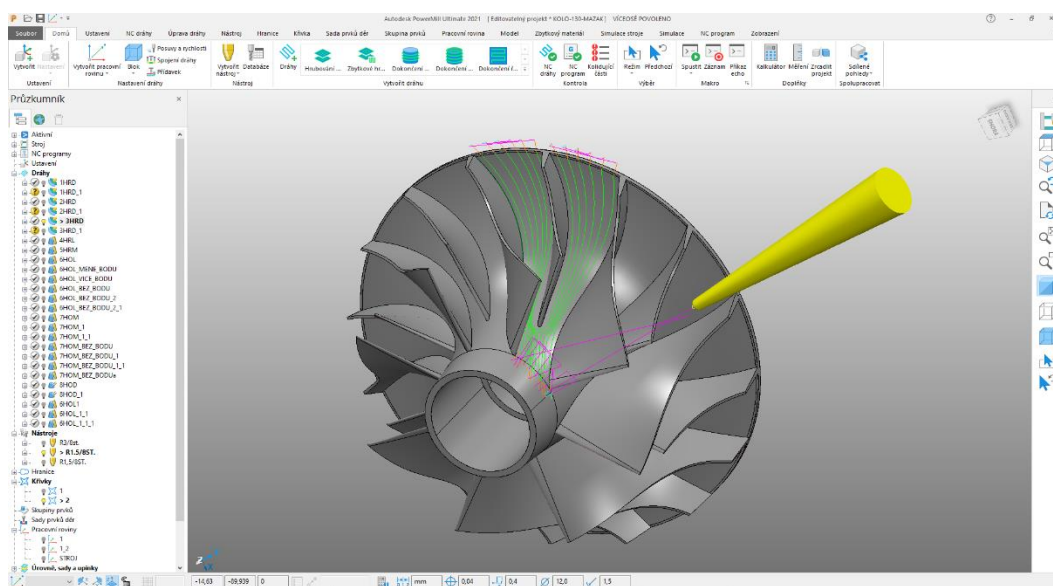
Hrubování patří mezi první operace výroby lopatek, kdy s ohledem na zatížení nástroje byly hrubovací dráhy rozděleny na tři hloubky záběrů. K hrubování mezi-lopatkového prostoru byla zvolena obráběcí strategie k tomu speciálně určena ze softwaru Autodesk PowerMill s názvem „hrubování lopatky“ (Obr. 26, Obr. 27), jako nástroj byla zvolena kuželová fréza 8° se zaoblením R3. Hrubování lopatek bylo rozděleno na tři hloubky záběru frézy a použité řezné podmínky pro hrubování jsou uvedeny v tab. 13. Vzhled lopatek po prvním hrubování je znázorněn na Obr. 28, po první hloubce záběru – hrubování lopatkového kanálu je rozděleno na osm drah (označeno růžovou barvou), po druhé hloubce záběru je hrubování rozděleno také na osm drah (označeno zelenou barvou) a po třetí hloubce záběru je hrubování rozděleno na 12 drah (označeno oranžovou barvou).

Tab.13: Řezné podmínky hrubování mezi-lopatkového prostoru.

Řezné podmínky hrubování mezi-lopatkového prostoru		
n [min^{-1}]	f [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]	t [min]
8000	700	26



Obr. 26: První hloubka záběru při hrubování.



Obr. 27: Třetí hloubka záběru při hrubování.



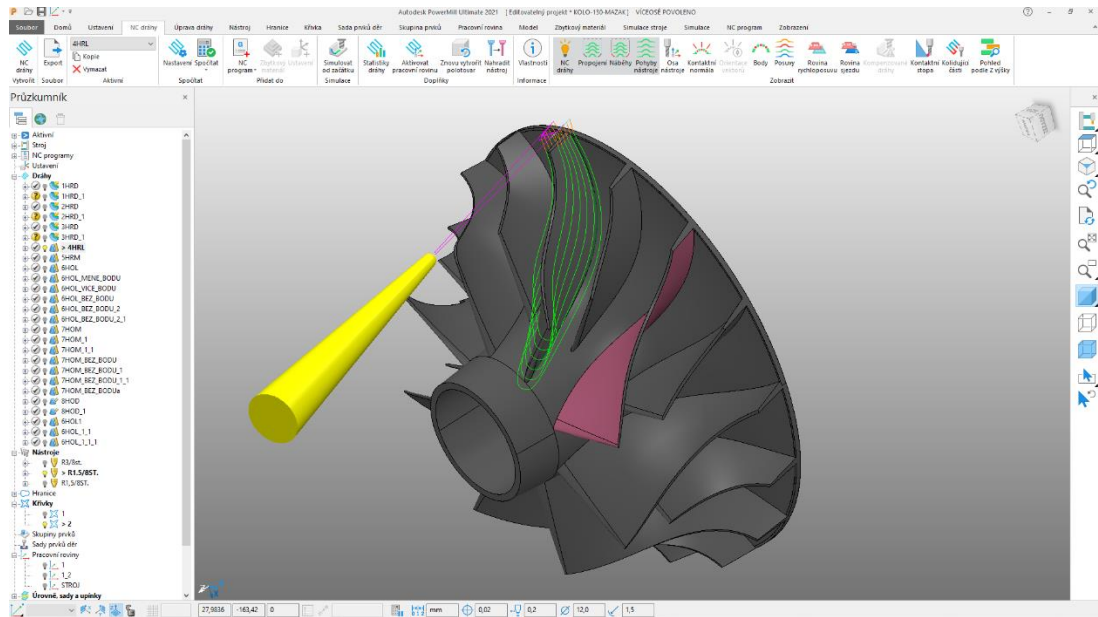
Obr. 28: Znázornění jednotlivých hrubovacích průjezdů.

6.2.2 Sjednocení přídavku na dokončovací obrábění lopatek

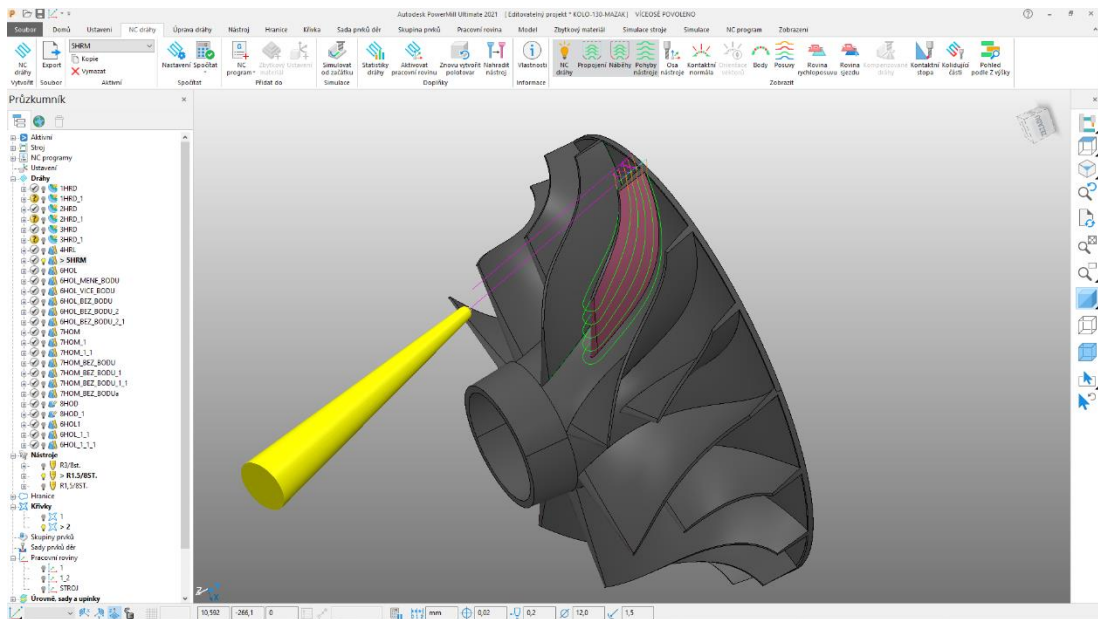
Následující fáze obrábění lopatek je sjednocení velikosti jednotlivých přídavků na obrábění pro dosažení správné geometrie lopatky a požadovaných parametrů drsnosti povrchu při dokončování lopatek a náboje. Sjednocením velikosti přídavků se dosáhne rovnoměrnějšího zatížení frézy při dokončování, kterým dosáhneme rovnoměrnější drsnosti povrchu na celé ploše lopatek. K sjednocení velikosti přídavků je využita kuželová fréza z předchozího hrubování a dráhy jsou složeny z pěti drah s axiálním krokem po 5 mm (Obr. 29, Obr. 30). Pro lopatky i mezi-lopatky bylo použito stejné nastavení strategie obrábění.

Tab.14: Řezné podmínky zbytkového hrubování.

Řezné podmínky sjednocování přídavku na obrábění lopatek		
n [min ⁻¹]	f [mm· min ⁻¹]	t [min]
9000	900	15



Obr. 29: Sjednocení přídávku na obrábění u lopatek.



Obr. 30: Sjednocení přídávku na obrábění u mezi-lopatek.

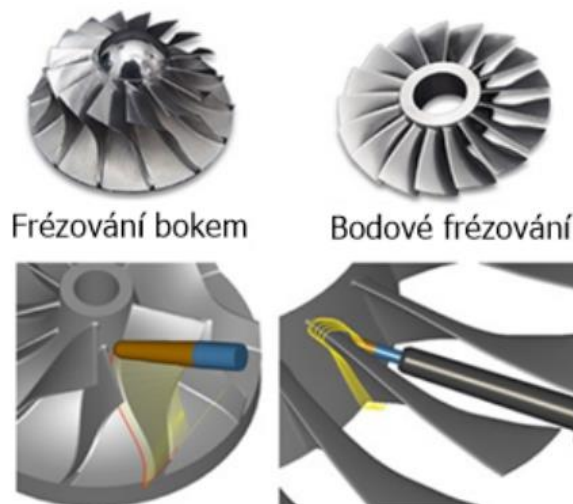


Obr. 31: Snímek lopatek po druhém hrubování pro sjednocení přídavku lopatek.

V průběhu hrubování nebyly pozorovány žádné nepříznivé jevy, tvorba třísky probíhala plynule a obrobený povrch byl ve srovnatelné podobě jako při výrobě KK pomocí frézovacího centra Hermle C20U.

6.2.3 Dokončování lopatek

Dokončování lopatek patří mezi zásadní operace z hlediska jakosti povrchu, ale také efektivity obrábění kompresorových kol. Bok lopatek lze vytvořit bodovým nebo bočním frézováním. Bodové frézování se využívá především pro obtížněji přístupné geometrie. Preferovaným způsobem dokončování boků lopatek je mnohdy boční frézování, které využívá vyšší axiální záběr a malé radiální záběry frézy, kvůli dosažení vyšší produktivity výroby (Obr. 32). Při tomto způsobu frézování boků lopatek se využívá kuželových fréz s kulovým čelem a lze dokončit bok lopatky na menší počet průchodů [47, 48].

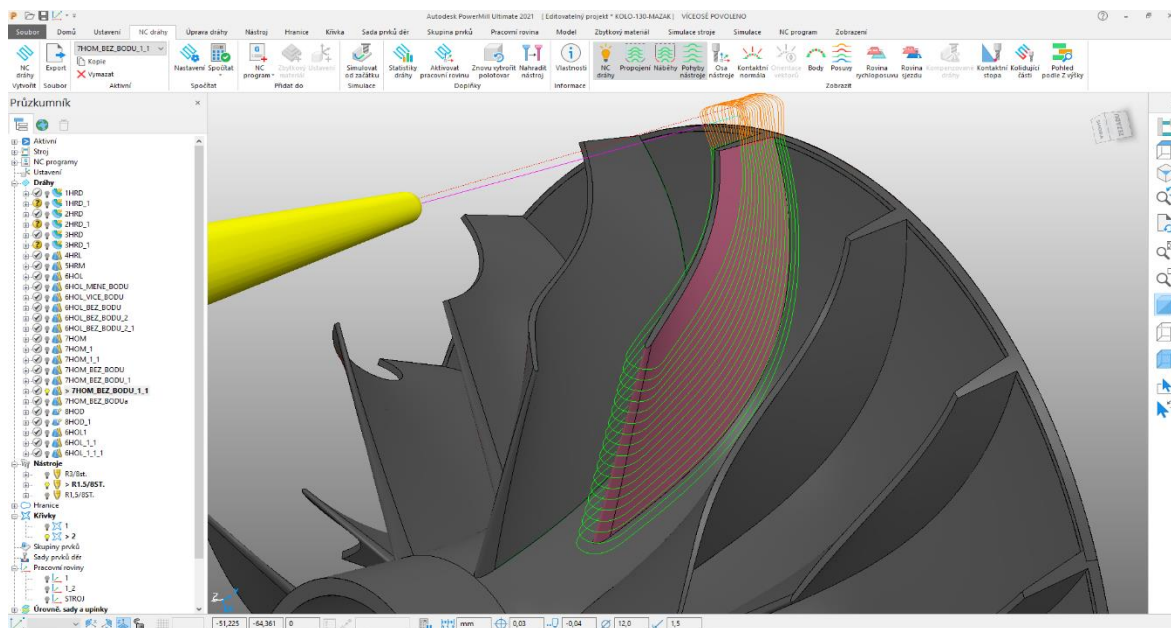


Obr. 32: způsoby frézování lopatek [48].

Při nastavení dokončování lopatek v CAM softwaru PowerMill bylo využito zkušeností zaměstnanců DLT s obráběním kompresorových kol na stroji Hermle C20U. Předpokladem bylo, že bude přenesena technologie včetně řezných podmínek na jiný stroj a v případě potřeby budou provedeny drobné korekce programu a řezných podmínek. Výchozí řezné podmínky jsou uvedeny v tab. 15. Pro dokončovací dráhy lopatek byla použita strategie „dokončování bokem“, která se skládala z devatenácti drah s axiálním záběrem 1,2mm (Obr. 33). Dokončování mezi-lopatek probíhalo obdobně jako obrábění lopatek s rozdílem, že se strategie skládala z osmnácti drah s axiálním záběrem 1,2mm. Znázornění lopatek po dokončovacím obrábění je na Obr. 34.

Tab.15: Řezné podmínky dokončování lopatek.

Řezné podmínky dokončování lopatek		
n [min ⁻¹]	f [mm· min ⁻¹]	t [min]
11000	1000	37



Obr. 33: Dráhy dokončování lopatek a mezi-lopatek kompresorového kola.



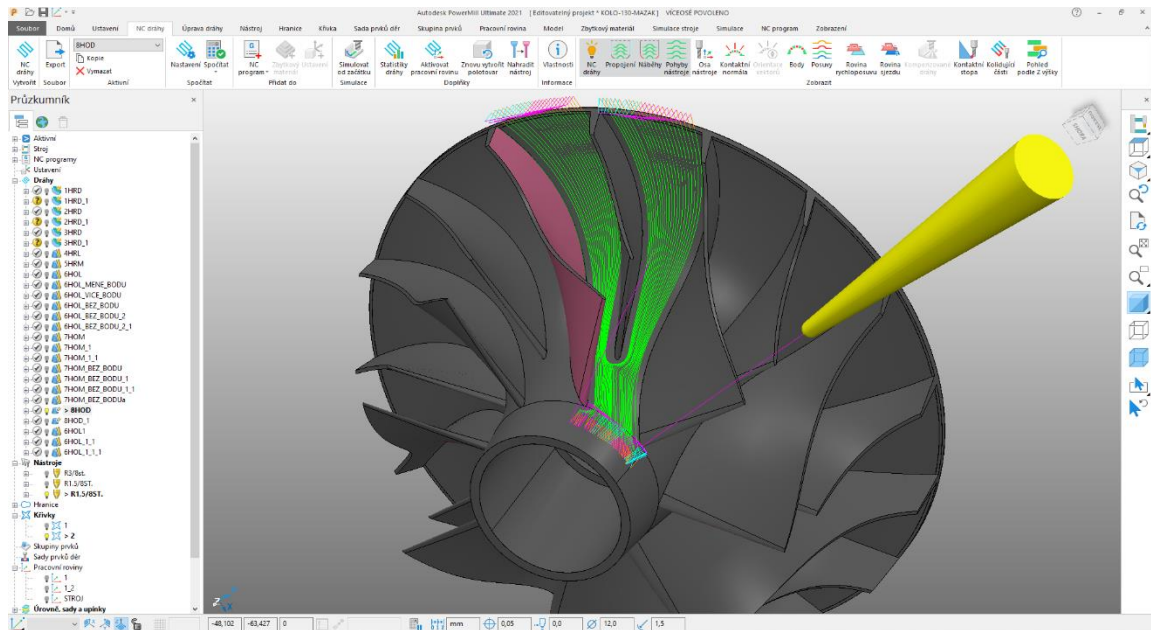
Obr. 34: Znárodnění povrchu po dokončení lopatek a mezi-lopatek.

6.2.4 Dokončování lopatkového kanálu

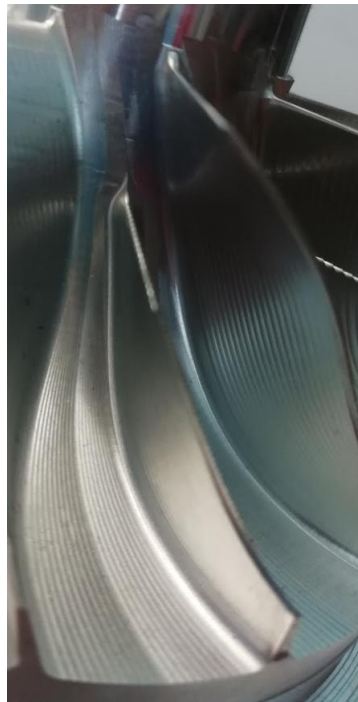
Poslední částí obrábění lopatek je dokončení lopatkového kanálu KK (tzv. vnitřního meridiánu). K této operaci se využívá bodového frézování pomocí válcové nebo kuželové frézy s kulovým čelem, která kopíruje povrch dna a po každém průjezdu se posune o určený inkrement, který vytvoří výsledný povrch. Pro dokončovací dráhy lopatek byla použita strategie speciálně určena k obrábění lopatkového kanálu ze SW PowerMill „dokončování středu“. Obráběcí strategie se skládala z 44 drah s radiálním záběrem 0,7mm (Obr. 35). Použitý nástroj byla kuželová fréza s úhlem 8° a zaoblením R1,5 a povrch dna lopatkového kanálu je znázorněn na Obr. 36 [47].

Tab.16: Řezné podmínky dokončení kanálu kompresoru.

Řezné podmínky dokončování lopatkového kanálu		
n [min ⁻¹]	f [mm· min ⁻¹]	t [min]
11000	1500	26



Obr. 35: Dráhy dokončování lopatkového kanálu kompresorového kola.

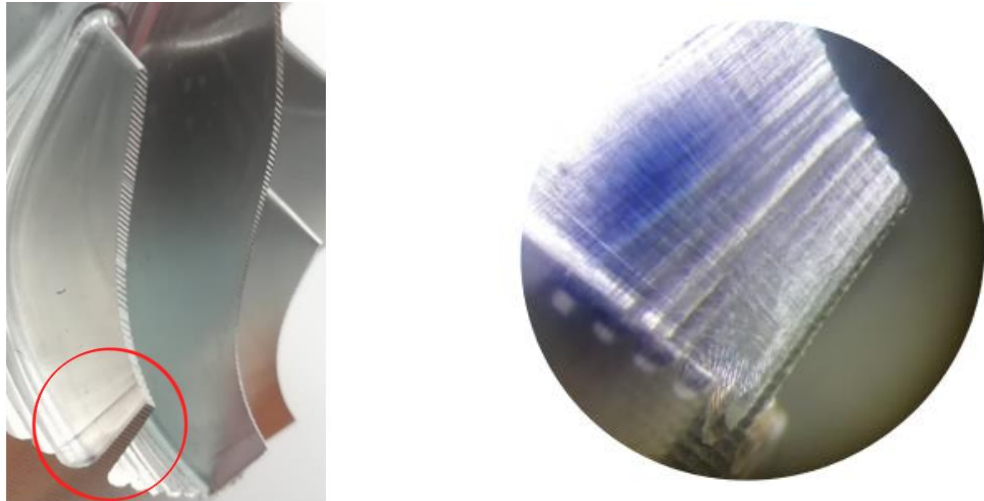


Obr. 36: Znárodnění povrchu po dokončení lopatkového kanálu.

Obrobení lopatkového kanálu, tj. tvaru vnitřního meridiánu, probíhalo bez problému a výsledek obrábění je shodný s výsledkem dosaženým při obrábění na stroji Hermle C20U. Rozměrová a geometrická přesnost součásti byla ověřena při kontrole na 3D souřadnicovém stroji Wenzel LH87. Na základě naměřených hodnot lze konstatovat, že výroba kompresorového kola touto metodou je možná.

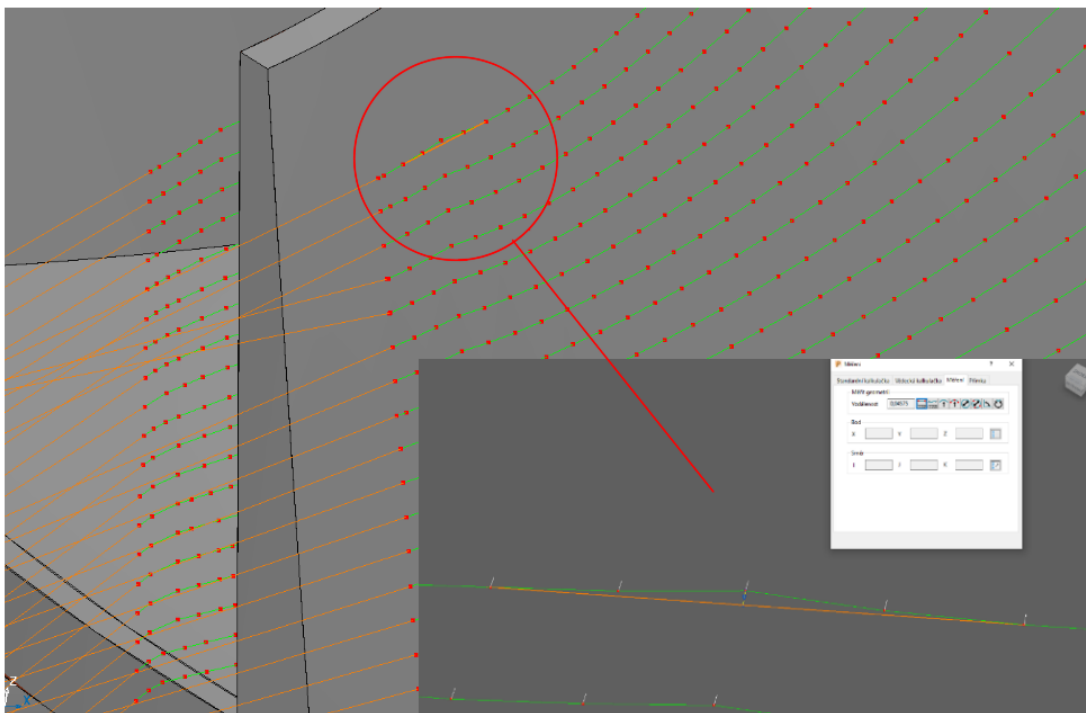
6.2.5 Nespojitosť ploch na výstupní hraně lopatek

Integrita povrchu lopatek je jedním z důležitých hledisek výroby kompresorového kola, a proto je zapotřebí ověřit stav povrchu lopatek po jejich obrobení. Po dokončovacím obrábění lopatek se na výstupní hraně lopatky kompresorového kola vyskytovala stopa po obrábění (Obr. 37). Tato stopa je nepřijatelná z hlediska předepsaných vlastností povrchu lopatek, a proto bylo nutné se zaměřit na vyřešení vzniklého problému.

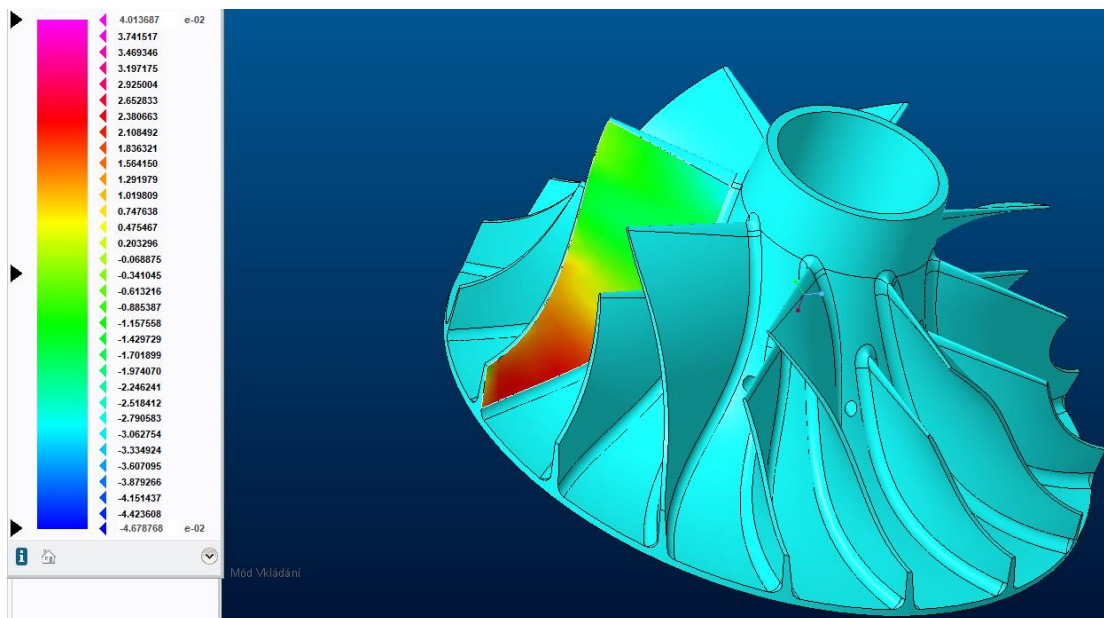


Obr. 37: Stopa na lopatce po dokončování.

Jedná se o místo na výstupní hraně lopatky KK, které lze označit jako nespojitosť ploch v daném místě. Tato nespojitosť je zřetelně viditelná stopa vzniklá při obrábění lopatek. Příčina vzniku této nespojivosti mohla pramenit z nedostatků v polohování stroje nebo jiným překážkami spojenými s kinematikou. Další možnou příčinou může být samotný software, a to jak na straně stroje, tak na straně CAM softwaru a post-procesoru. I přes to, že lze příčinu odhadovat, důvod vzniku stopy je neznámý. Na Obr. 38 jsou znázorněny dráhy vytvořené CAM softwarem v místě vzniklé nespojivosti. V tomto místě lze pozorovat mírnou odchylku dráhy. Na Obr. 39 je znázorněna analýza křivosti pomocí barevné škály. Z této analýzy lze také pozorovat mírnou odchylku křivosti ve zkoumané oblasti. I přes tato zjištění z nich není možné vyvodit vypovídající závěry.



Obr. 38: Znáznornění dráhy v místě výskytu stopy na lopatce.



Obr. 39: Analýza křivost s barevnou škálou.

Jako možná řešení pro eliminaci vzniklé nespojitosti ploch byly zvoleny různé přístupy, kdy každý jednotlivý přístup byl zaměřen na různou oblast možného vzniku této nespojitosti povrchu. Tato řešení zahrnovala:

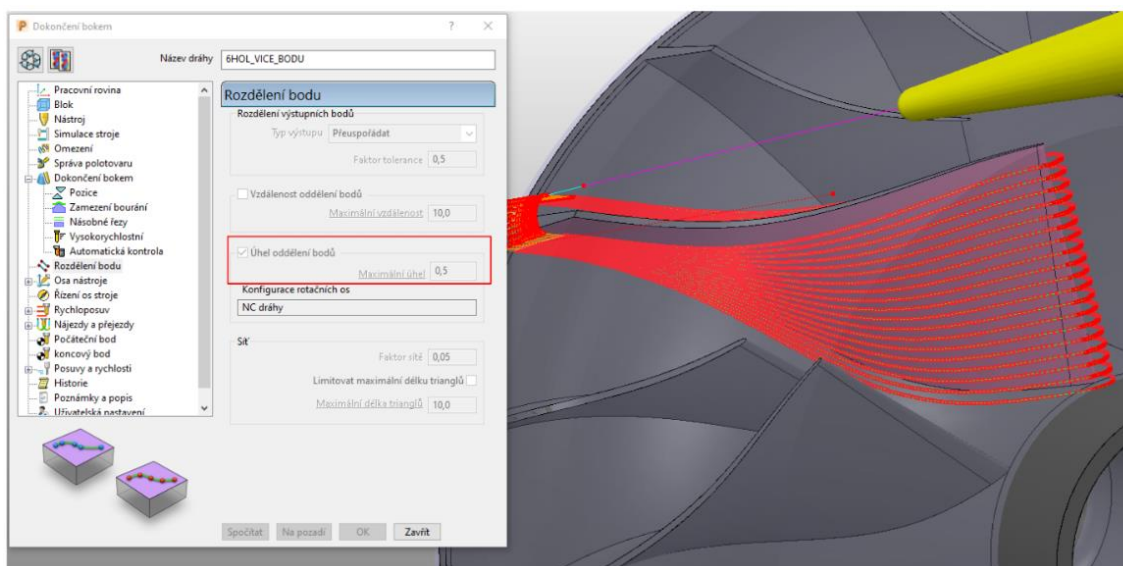
- úpravu nástrojových dat v CAM softwaru (změna hustoty řídicích bodů),
- lokální změnu posuvové rychlosti,
- ověření nepřesnosti polohování lineárních i rotačních os,
- využití speciálních opcí určených pro obrábění komplexních ploch.

K eliminaci problému se vycházelo postupně od jednodušších řešení po ta složitější. Na počátku se vzniklá nespojitost ploch pokusila vyřešit změnou parametrů v CAM softwaru a následně byly zkoumány řešení vztahující se k samotnému výrobnímu stroji.

- **Změna hustoty řídicích bodů.**

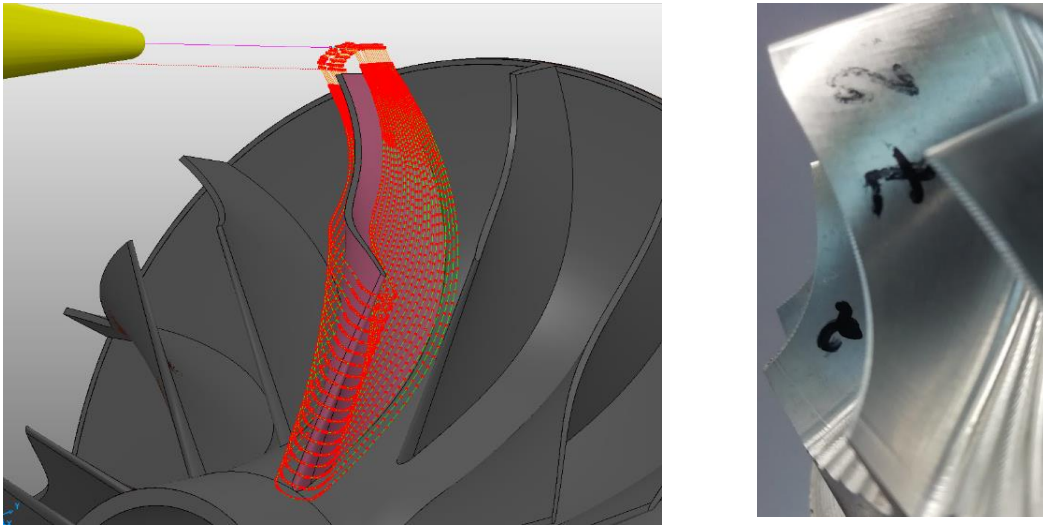
První navržené řešení byla úprava dat v CAM softwaru. Nástrojové dráhy jsou složeny z řídicích bodů, které mohou být aproximovány přímkou nebo křivkou. Při menším počtu bodů dochází k rychlejšímu zpracování dat strojem, avšak v důsledku snížení počtu bodů se reálný tvar obrobenej lopatky více vzdaluje od výpočetně určeného, tj. teoretického tvaru lopatky a naopak. Snížení počtu bodů se projeví zejména zhoršením povrchu lopatky.

Byl tedy zkoumán vliv zjemnění sítě, tj. zvýšení počtu bodů v CAM PowerMill. Pro změnu hustoty řídicích bodů bylo využito parametru „úhel oddělení bodů“, který se nachází v záložce rozdělení bodů (viz Obr. 40). Maximální úhel pro oddělení bodů byl nastaven na 0,5. Po provedení této úpravy, zpracování post-procesorem a obrobení povrchu lopatky nedošlo k zásadnímu zlepšení v oblasti, kde se vyskytovala řešená nespojitost povrchu (viz Obr. 41).

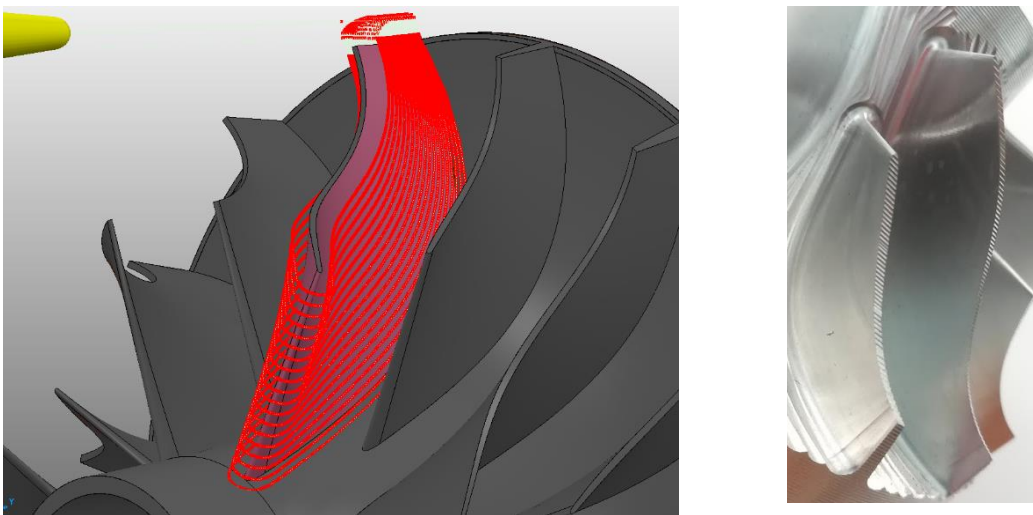


Obr. 40: Změna parametru „úhel oddělení bodů“.

Dále se řešil vliv snížení hustoty sítě, tj. snížení počtu bodů (Obr. 42). Tento předpoklad vznikl na základě myšlenky, že stroj nebyl schopen zpracovat tak velké množství dat, které předchozí zjemnění sítě způsobilo. V průběhu obrábění se totiž vždy upravují nastavené posuvové rychlosti jednotlivých os tak, že jejich posuvová rychlost je automaticky upravována dle nejpomalejší osy. Zde došlo také ke změně parametru „úhel oddělení bodů“, kdy hodnota maximálního úhlu pro oddělení bodů byla nastavena na 5.



Obr. 41: Dokončování lopatky s hrubou sítí řídicích bodů.



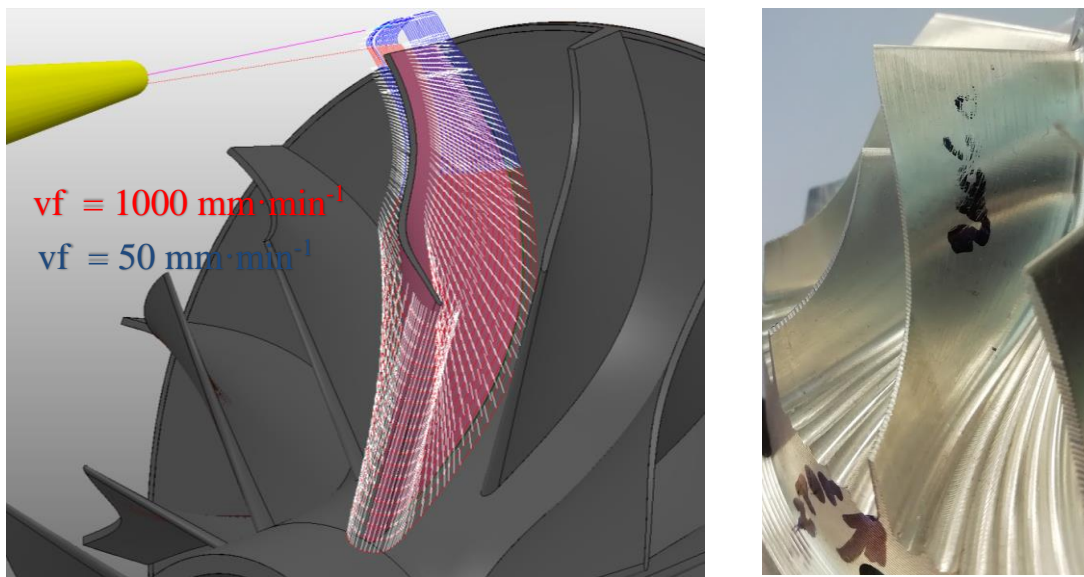
Obr. 42: Dokončování lopatky s jemnou sítí řídicích bodů.

Po obou změnách hustoty řídicích bodů se stopa na lopatkách stále vyskytovala a bylo zapotřebí zvolit jiné řešení.

- **Změna lokální posuvové rychlosti.**

Poslední jednoduše proveditelná změna programu byla založena na lokalizované úpravě řezných podmínek, a to především posuvové rychlosti (Obr. 43). V oblasti

s výskytem stopy po obrábění se 20násobně snížila posuvová rychlost. Důsledkem snížení posuvové rychlosti došlo k významnému potlačení viditelnosti zmíněné stopy. Lokální zpomalení posuvu je patrné i na viditelné změně povrchu v dané oblasti (viz Obr. 43 vpravo – označeno 2006a). Značnou nevýhodou lokálního snížení posuvové rychlosti je významné navýšení strojního času, a tedy snížení produktivity výroby KK. Při zavedení dochází k nárůstu strojního času výroby lopatek z původních 37 min na 80 min. Nárůst jednotkového času je znázorněn v kapitole č.7 na Obr. 55.



Obr. 43: Dokončování lopatky s lokálním zpomalením posuvové rychlosti.

Pro obrábění lopatek bez zanechání nežádoucí stopy a omezení výrazného zvýšení strojního času bylo tedy vhodné zvážit prozkoumání post-processoru CAM softwaru nebo prozkoumání nedostatků v kinematice stroje.

- **Nepřesnost v polohování lineárních a rotačních os.**

Z důvodu, že ani jedno řešení pro eliminaci vzniklé stopy na lopatkách nebylo zcela optimální, bylo navrženo vyloučení vzniku stopy z důvodu nepřesnosti v polohování stroje, a to jak lineárního, tak rotačního. Pro vyloučení nepřesnosti polohování lineárních a rotačních os stroje byla za účasti technika ze společnosti Mazak využita měřicí aparatura „double ball bar“ od firmy Renishaw (viz Obr. 44) pro získání těchto nepřesností v polohování.

Double ball bar je bezdrátový systém sloužící k určení nepřesnosti lineárního polohování stroje. Skládá se z velmi přesného teleskopického lineárního snímače, který má na obou koncích umístěnou vysoce přesnou kouli. Další součástí jsou dva vysoce přesné magnetické držáky, kdy jeden je umístěn do vřetena a druhý na stůl stroje (součást upnutou ve sklíčidle). Tyto přesné koule jsou kinematicky uloženy do obou těchto magnetických snímačů. Metoda je založena na měření odlišností od naprogramované kruhové dráhy okolo nepohyblivého držáku za pomoci lineárního snímače. Tato metoda

dokáže registrovat i velmi drobné odchylky od naprogramované dráhy. Nasnímaná data jsou následně dále zpracována za pomoci speciálního softwaru a vyhodnocena jako kruhovitost nebo odchylka od kruhovitosti [49].

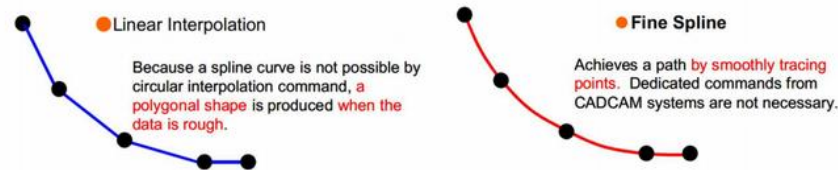


Obr. 44: Double ball bar aparatura od firmy Renishaw.

Po vyhodnocení softwarem byla u lineárních os x a z zjištěna nepřesnost polohování v řádu $1 \cdot 10^{-4}$ mm. Pro vyloučení chyb v polohování rotačních os byla využita stejná metoda a aparatura od firmy Renishaw, avšak data byla zpracována specializovaným softwarem a vyhodnocovací metodikou od společnosti Mazak. Zde výsledná nepřesnost v polohování dosahovala hodnoty $7 \cdot 10^{-4}$ mm. Z naměřených hodnot lze pozorovat, že nepřesnosti polohování pravděpodobně nejsou důvodem vzniku nespojitostí na lopatkách.

- **Využití speciálních opcí určených pro obrábění komplexních ploch.**

Podrobné prozkoumání post-procesoru a získaná data z měření přesnosti polohování os neprokázala žádný závažný problém v oblasti dat ani v oblasti polohování. Proto bylo přistoupeno ke kontrole opcí, které se u strojů Mazak musí na rozdíl od frézovacích strojů pořizovat jako příplatková výbava. Bylo zjištěno, že opce, které umožňují využít křivkovou interpolaci (viz Obr. 45) nebyly v rámci příplatkové výbavy pořízeny. A to zejména z důvodu, že v době realizace investice nebyla daná aplikace uvažována. Jedná se o opce č.26 a č.77 (příloha č.6). Opce č.26 je „Spline“ a opce č.77 je „5axis Spline“. Obě opce jsou speciálně určeny pro obrábění komplexních ploch, jakým jsou lopatky kompresorového kola. Využívají se u funkcí, které automaticky vytvoří křivku, která hladce sleduje body naprogramované CAM softwarem. Důsledkem je snížení náhlých zrychlení a zpomalení, což může zajistit hladší obrobek povrch.



Obr. 45: Speciální „Spline“ funkce.

V době zpracovávání DP se podařilo získat povolení na vyzkoušení zmíněných opcí a za účasti technika ze společnosti Mazak bylo přistoupeno k jejich instalaci, která bohužel neskončila úspěšně. Instalace opcí probíhala začátkem června a chyby, které při instalaci nastaly jsou v současné době řešeny odborníky ze společnosti Mazak v Japonsku. Z tohoto důvodu nebyla ověřena funkčnost tohoto řešení.

- **Vyhodnocení a volba řešení pro eliminaci vzniklé stopy.**

Byla zkoumána různá řešení pro eliminaci vzniklé nespojitosti ploch na výstupní hraně lopatek. Mezi tyto řešení patřila změna hustoty řídicích bodů, globální a lokální zpomalení posuvové rychlosti, záměna post-processoru, měření nepřesnosti v polohování lineárních a rotačních os a zakoupení nových opcí pro ŘS Mazatrol. I přesto, že ani jedno z těchto řešení nebylo nejvhodnější, k následnému vyhodnocení budou využita data metody s nejlepšími dosaženými výsledky z hlediska povrchu v předešlém místě nespojitosti. Touto metodou je obrábění lopatek KK s lokálním zpomalením posuvové rychlosti. Je nutné brát v potaz, že toto řešení je vhodné především z hlediska povrchu, avšak dochází k výraznému navýšení strojního času. Z tohoto důvodu by bylo vhodné ověření, zdali má vzniklá stopa vliv na funkci a parametry motoru. V případě, že nedojde k významnému ovlivnění těchto parametrů a funkčnosti motoru, tak by bylo vhodné zvážit změnu drsnosti povrchu lopatek nebo tuto stopu povolit ve výkresové dokumentaci. V případě, že stopa bude mít významný vliv na parametry a funkčnost motoru, bylo by vhodné najít přesný důvod vzniku nespojitosti, vyřešit jej a tím následně zefektivnit výrobu KK. Kompresorové kolo po obrobení je znázorněno viz Obr. 46.



Obr. 46: Kompresorové kolo po obrobení.

6.3 Dynamické vyvažování

Vyvažování je proces, při kterém je zkoušeno rozložení hmoty rotoru a je-li nutno, je zkorigováno tak, aby bylo zajištěno, že zbytkové nevyváženosti, respektive chvění ložiskových čepů, jehož frekvence závisí na otáčkách rotoru a/nebo síly působící na ložiska, zůstávaly při daných otáčkách v daném rozmezí [50].

Dynamické vyvažování rotorů slouží k odstranění nerovnováhy rotačních součástí a patří mezi důležitou část výroby kompresorových kol. U rotačních prvků proudových motorů dochází k vysokým frekvencím otáčení a sebemenší nevyvážení rotoru negativně ovlivňuje působení motoru a opotřebovává ložiska. Nevyvážená součást vzniká, když se hlavní osa těžiště tělesa neshoduje s osou rotace. Z důsledku nevyvážení rotoru odstředivá síla způsobuje vznik vibrací. Tyto vibrace mohou způsobit výrazné potíže mezi které lze řadit nižší životnost součástí, vyšší hlučnost, sníženou efektivitu a v extrémních případech porušení celistvosti součástí [5, 51, 52].

Proces vyvažování spočívá v odstranění (odvrtání, odbroušení) nebo přidání (navaření) hmoty k součásti za účelem posunutí středu hmoty do středu otáčení ve vyvažovacích rovinách. Dynamické vyvažování je nutné řešit v obou vyvažovacích rovinách zvlášť [51, 52].

Dynamické vyvažování kompresorového kola je realizováno ve dvou vyvažovacích rovinách a úběr materiálu je prováděn odbroušováním. Dovolená zbytková nevyváženost KK je 0,5 g·mm. Vyvažování řešeného kompresorového kola je prováděna na vyvažovače Schenk Passio 5 (viz Obr. 47).

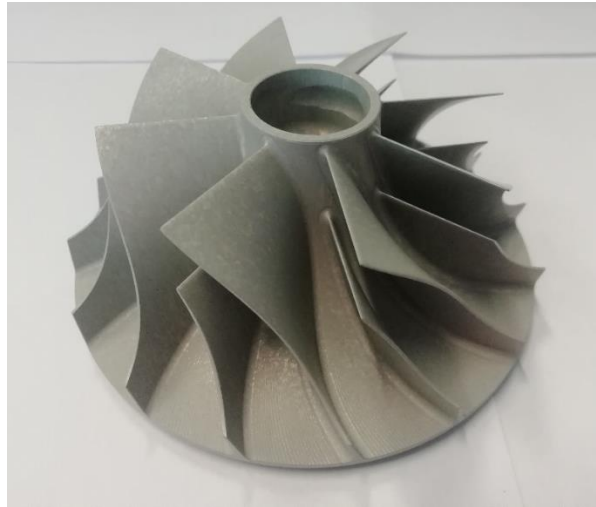


Obr. 47: Vyvažovačka – Schenk Passio 5.

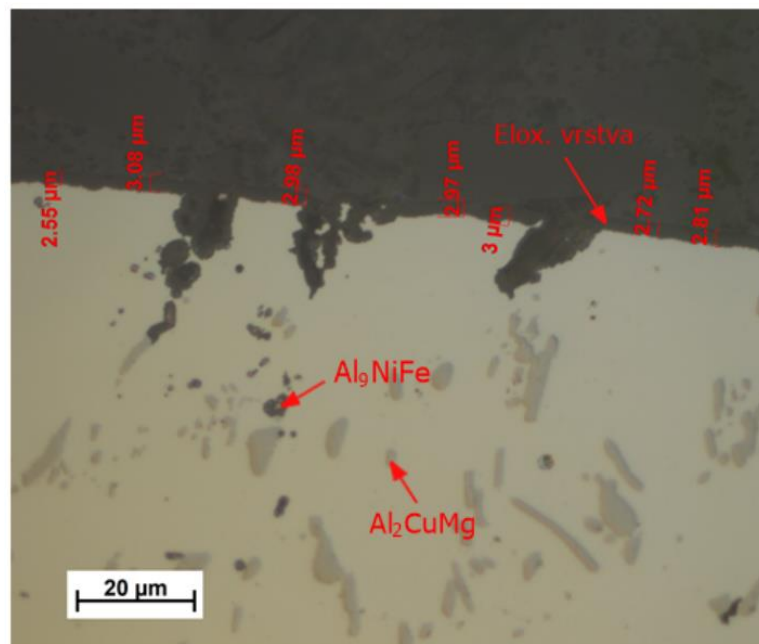
6.4 Povrchová úprava

Pro zvýšení odolnosti proti povětrnostním vlivům, korozi a otěruvzdornosti povrchové vrstvy u hliníkových slitin lze využít povrchové úpravy. V našem případě se jedná o eloxování neboli anodizaci. Jedná se o druh povrchové úpravy používaný pro hliník a hliníkové slitiny. Při eloxování se vloží součást do roztoku kyselin (kyseliny organické, chromové sírové, fosforečné), v kterých povrch součásti oxiduje za působení elektrického proudu. Lze také využít solný roztok. Účelem eloxování je vytvoření tenké ochranné pasivační vrstvy oxidu hliníku (Al_2O_3), který dále již neoxiduje a chrání součást před další oxidací. Z tohoto důvodu je eloxování důležitou součástí procesu při výrobě dílců z hliníkových slitin pro letecký průmysl. Eloxování hliníkových slitin může mít nepříznivý účinek na únavové vlastnosti materiálu. Pokles únavových vlastností vzniká v důsledku vzniku křehkých oxidů hliníku [53, 54, 55].

Kompresorové kolo bylo povrchově upraveno anodickou oxidací ELOX 3 ONL 1831.21 (ONL – odborová norma letecká). Jedná se o povrchovou ochranu, při které je provedeno utěšňování v kyselině chromové, tzv. chromelox s tl. vrstvy $3\mu\text{m}$. Vzhledem k tl. vrstvy $3\mu\text{m}$ u řešené součásti není třeba upravovat přesně tolerované rozměry před samotnou povrchovou úpravou. Tento typ povrchové úpravy má za účel pouze zvýšení korozní odolnosti součásti. Obrobené kompresorové kolo po povrchové úpravě je znázorněno na Obr. 48. Z vyrobeného kompresorového kola byl odebrán vzorek a byl proveden metalografický výbrus. Na Obr. 49 je znázorněno orientační měření tloušťky vrstvy eloxu. Popis struktury je pouze odhad, pro zjištění složení jednotlivých částic by bylo zapotřebí provést EDS analýzu v SEM.



Obr. 48: Kompresorové kolo po eloxování.



Obr. 49: Zobrazení mikro-struktury hliníkové slitiny EN AW 2618 po eloxování [56].

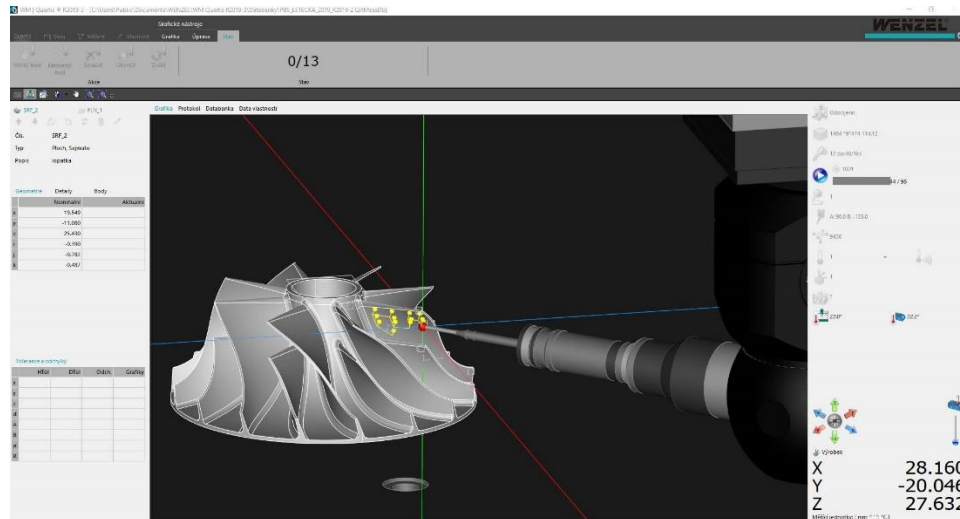
6.5 Závěrečná kontrola kompresorového kola

Při finální kontrole není posuzována pouze rozměrová, geometrická přesnost či drsnost součásti, ale vyrobená součást je posuzována i vizuálně (jednotnost vzhledu povrchové úpravy a nepoškozenost výrobku). Současně je kontrolována i veškerá průvodní dokumentace, např. protokol o vyvážení kompresorového kola.

6.5.1 Vyhodnocení odchylek lopatkování od CAD modelu


K ověření správnosti výroby lopatek jsou určeny 3D souřadnicové měřicí stroje. Tyto stroje jsou univerzální měřicí zařízení využívající dotykových sond a umožňující změřit (nasnímat) i tvarové plochy s vysokou přesností. Lze tedy zjistit přesnost a kvalitu

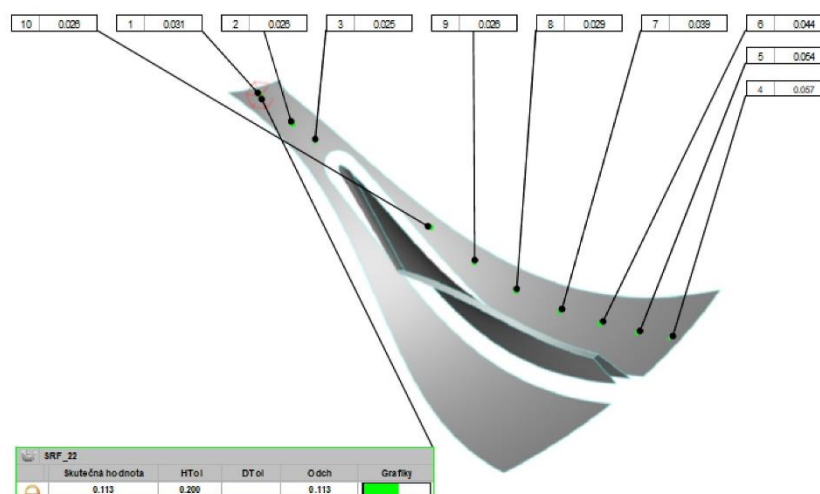
vyrobených lopatek při porovnání vyrobených lopatek kompresorového kola s patřičným CAD modelem. Postup měření lopatky na stroji Wenzel LH87 je znázorněn na Obr. 50.



Obr. 50: Měření na SMS Wenzel.

Na zařízení SMS Wenzel byla provedena kontrola geometrie lopatky na základě dat CAD modelu a na základě měření byly vyhodnoceny odchylky vyrobených lopatek od CAD modelu v jednotlivých měřených bodech. Dovolena odchylka od CAD modelu je v našem případě $\pm 0,1\text{mm}$. Všechny měřené body se nachází v toleranci (viz Obr. 51), což potvrzuje použitelnost výroby kompresorového kola pomocí sestaveného technologického postupu.

MĚŘICÍ PROTOKOL WENZEL LH 87		 První brněnská strojírna Velká Bíteš, a.s. Vlkovská 279 595 01 Velká Bíteš Czech Republic
Výrobek:		
Výkres:		
Komentář:	Kompresor T.J40 IBW2	
Měření:	2 op.40/1ks	
Datum:	24.03.2021	
Měřil:		



Obr. 51: Vyhodnocení odchylek vyrobených lopatek.

7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Pro zhodnocení výsledných nákladů je nedíve nutné propočítat celkové náklady na nově zvolenou technologii výroby kompresorového kola a také na technologii již zavedenou. Jelikož se jedná o komplexní tvary, pro které je určení jednotlivých dílčích časů velmi obtížné, tak všechny časy potřebné k ekonomickému zhodnocení byly určeny za pomoci vytvořených programů. Náklady na provoz jednotlivých strojních zařízení včetně režii byly získány od společnosti PBS Velká Bíteš.

7.1 Náklady na zavedenou výrobní technologii

Náklady na zavedenou výrobní technologii [57].

Tab.17: Náklady na jednotlivé operace pro stávající výrobní technologii.

Operace	Popis operace	Pracoviště	t_{AC} [min]	t_{BC} [min]	Náklady na provoz stroje [Kč·hod ⁻¹]	Náklady na kooperaci [Kč]	Náklady na operaci [Kč]
10	řezání	Pásová pila	10	10	595	–	198
20	soustružení	SP280Y	5,2	90	1469	–	2331
30	soustružení	SP280Y	4,5	60	1469	–	1579
40	frézování	Hermle C20U	104	135	1472	–	5861
50	soustružení	SV18R	17,5	30	972	–	770
60	frézování	Hermle C20U	30,5	67,5	1472	–	2403
70	soustružení	SV18R	4,5	30	972	–	559
80	soustružení	SP280Y	19	90	1469	–	2669
90	soustružení	SP280Y	13	30	1469	–	1053
100	srážení hran	Zámečnická dílna	10	15	957	–	399
110	popisování	TrueMark 5000	2	10	1046	–	209
120	vyvažování	Schenk Passio 5	30	26	1222	–	1141
130	kontrola	OTK	45	10	430	–	394
140	povrchová úprava	Galvanovna	–	–	–	59	59
150	kontrola	OTK	60	10	430	–	502
							$\Sigma=20126$

Náklady na výrobní operaci č.2 při výrobní dávce 20 ks:

$$N_{op2} = (t_{AC2} \cdot d_v + t_{BC2}) \cdot \frac{N_{hs2}}{60} = (5,2 \cdot 20 + 90) \cdot \frac{1469}{60} = 4750 \text{ Kč.} \quad (3)$$

Kde:

N_{op2} ... náklady na výrobní dávku konkrétní výrobní operace [Kč],

t_{AC2} ... jednotkový čas s přídavkem času směnového konkrétní operace [min],

t_{BC2} ... dávkový čas s přídavkem času směnového konkrétní operace [min],

d_v ... výrobní dávka [ks],

N_{hs2} ... náklady na hodinu provozu strojního zařízení [Kč·hod⁻¹].

Náklady na výrobu jednoho kompresorového kola při výrobní dávce 20 ks:

$$N_{v1} = \frac{(\sum_{i=1}^{n=14} N_{opi} = N_{op1} + N_{op2} + N_{op3} + \dots + \sum_{j=1}^{n=1} N_{kj})}{d_v} = \quad (4)$$

$$= \frac{2083 + 4750 + 3673 + \dots + 1173}{20} = 7078 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}.$$

Kde:

N_{v1} ... náklady na výrobu jednoho kompresorového kola stávající výrobní technologie při dávce 20 ks [Kč·ks⁻¹],

N_k ... náklady na kooperaci [Kč].

Náklady na výrobu jednoho kompresorového kola včetně ceny materiálu při výrobní dávce 20 ks:

$$N_{c1} = N_{v1} + N_{mat} = 7078 + 318 = 7396 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}. \quad (5)$$

Kde:

N_{c1} ... náklady na výrobu jednoho kompresorového kola stávající výrobní technologie včetně materiálu při výrobní dávce 20 ks [Kč·ks⁻¹],

N_{mat} ... náklady na materiál [Kč].

Tab.18: Náklady na jeden ks pro různé výrobní dávky pro stávající výrobní technologii.

	Počet kusů v jedné výrobní dávce [-]					
	1	5	10	15	20	100
Náklady na výrobu jednoho kompresorového kola při různých výrobních dávkách [Kč]	20444	9457	8083	7625	7396	6847

7.2 Náklady na nově navrženou výrobní technologii

Náklady na navrženou výrobní technologii [57].

Tab.19: Náklady na jednotlivé operace pro navrženou výrobní technologii.

Operace	Popis operace	Pracoviště	t_{AC} [min]	t_{BC} [min]	Náklady na provoz stroje [Kč·hod ⁻¹]	Náklady na kooperaci [Kč]	Náklady na operaci [Kč]
10	řezání	Pásová pila	10	10	595	–	198
20	soustružení, frézování	Mazak integrex i300	180	270	1460	–	10950
30	soustružení	SV18RA	10	30	972	–	648
40	srážení hran	Zámečnická dílna	10	15	957	–	399
50	popisování	TrueMark 5000	2	10	1046	–	209
60	vyvažování	Schenk Passio 5	30	26	1222	–	1141
70	kontrola	OTK	45	10	430	–	394
80	povrchová úprava	Galvanovna	–	–	–	59	59
90	kontrola	OTK	60	10	430	–	502
							$\Sigma=14499$

Náklady na výrobní operaci č.2 při výrobní dávce 20 ks:

$$N_{op2} = (t_{AC2} \cdot d_v + t_{BC2}) \cdot \frac{N_{hs2}}{60} = (180 \cdot 20 + 270) \cdot \frac{1460}{60} = 94170 \text{ Kč.} \quad (6)$$

Náklady na výrobu jednoho kompresorového kola při výrobní dávce 20 ks:

$$N_{v2} = \frac{(\sum_{i=1}^{n=14} N_{opi} = N_{op1} + N_{op2} + N_{op3} + \dots + \sum_{j=1}^{n=1} N_{kj})}{d_v} \quad (7)$$

$$= \frac{2083 + 94170 + 3726 + \dots + 1173}{20} = 6670 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}.$$

Náklady na výrobu jednoho kompresorového kola včetně ceny materiálu při výrobní dávce 20 ks:

$$N_{C2} = N_{v2} + N_{mat} = 6670 + 356 = 7026 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}. \quad (8)$$

Tab.20: Náklady na jeden ks pro různé výrobní dávky pro nově navrženou výrobní technologii.

	Počet kusů v jedné výrobní dávce [-]					
	1	5	10	15	20	100
Náklady na výrobu jednoho kompresorového kola při různých výrobních dávkách [Kč]	14855	8262	7438	7163	7026	6696

Při navrhování nové technologie je nutné brát ohled na náklady, které jsou zapotřebí k zavedení dané technologie do výroby. Mezi tyto náklady lze řadit pořízení nového strojního zařízení, nových nástrojů, nástrojových držáků atp. Jelikož byla strojní zařízení volena s ohledem na strojový park PBS Velká Bíteš, tak se náklady na zakoupení strojního zařízení nevyskytují. Byly vyčísleny náklady na všechny potřebné nástroje pro zavedení nové technologie do výroby (tab. 21). Avšak velké množství těchto nástrojů je již využíváno v současné výrobní technologii, a proto jsou uvedeny pouze orientačně.

Tab.21: Náklady na použité nástroje.

Nástroj / Držák	Cena nástroje bez DPH [Kč]	VBD / Korunka	Cena VBD bez DPH [Kč]
Soustružnický nůž S32U SCLCR 12	3248	CCGT120404-N-AS	230
Vrták s VBD Ø24	5980	–	180
Vrták z VBD Ø16	6444	–	184
Těleso vrtáku KTFS Ø8	2541	Korunka HPML KCMS15 (s chlazením)	1437
Soustružnický nůž A10k SWLCR 04	1766	WCGT 040204 PM2-WK1	237
Soustružnický nůž Picco 7/50	863	–	

Nástroj / Držák	Cena nástroje bez DPH [Kč]	– VBD / Korunka	Cena VBD bez DPH [Kč]
Soustružnický nůž SDUCR Ø16	2062	DCGT070202FN	171
Soustružnický nůž SDJCR	1672	DCGT11T302	208
Zapichovací nůž KM63XMZBSR4Y	7668	EVBSN26J0540	163
Zapichovací nůž KM63XMZBSR4Y	7668	EG0500M05P04HUP K313	1669
Středící vrták Ø8/90°	713	–	
Vrták Ø1,4 (5D)	130	–	
Fréza Ø1,5	1885	–	
Fréza kuželová kopírovací R3/8°	6100	–	
Fréza kuželová kopírovací R1,5/8°	6203	–	
Fréza Ø1,8	320	–	
Vrták Ø2	142		
	Σ=55405		Σ=4478

Cena na pořízení nástrojů:

$$N_N = N_D + N_{VBD} = 55405 + 4478 = 59883 \text{ Kč.} \quad (8)$$

Kde:

N_N ... náklady na pořízení nástrojů [Kč],

N_D ... náklady na pořízení držáků [Kč],

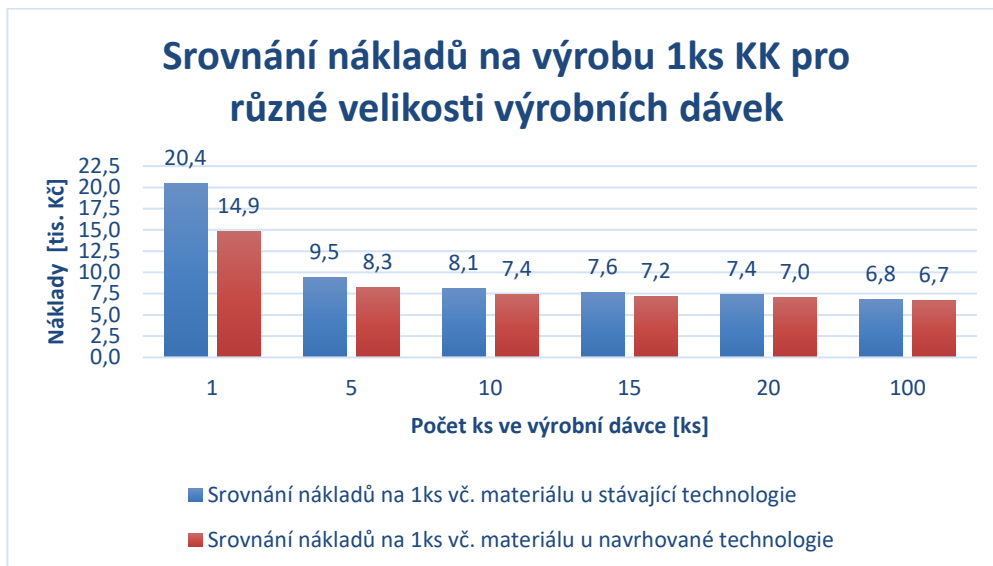
N_{VBD} ... náklady na pořízení VBD [Kč].

7.3 Porovnání jednotlivých technologií

Porovnání mezi stávající a nově navrženou technologií je jedním z nejdůležitějších ukazatelů vhodnosti nasazení nové technologie do výroby. Nově vytvořená technologie byla oproti předešlé technologii zaměřena na omezení manipulace s materiálem a vykonání co největšího množství operací na jednom strojním zařízení.

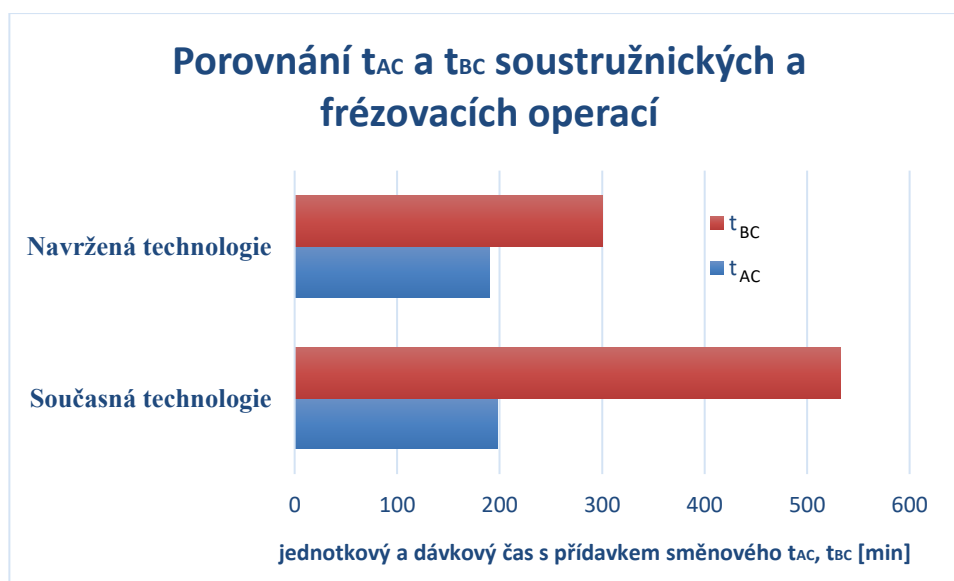
Náklady na výrobu jednoho kompresorového kola se výrazně mění v závislosti na velikosti výrobní dávky. Z grafu lze pozorovat, že náklady na výrobu kompresorového kola u nově navržené technologie jsou nižší pro všechny vyobrazené velikosti dávek oproti technologii stávající (viz Obr. 52). Nejvyšší procentuální rozdíl nákladů je u nižších výrobních dávek a se zvyšováním výrobní dávky tento rozdíl výrazně klesá. Dále je z grafu

patrné, že při výrobní dávce 20 ks je cena za jedno kompresorové kolo více než dvojnásobně nižší než při výrobní dávce 1 ks.



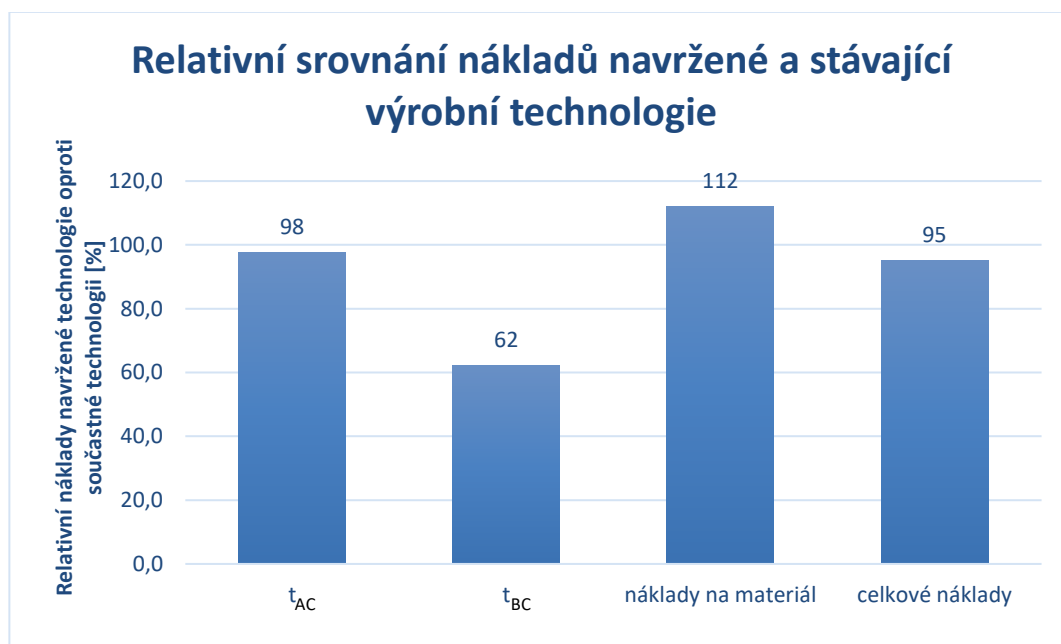
Obr. 52: Srovnání nákladů na výrobu 1ks KK pro různé výrobní dávky.

Z grafu na Obr. 53 lze zaznamenat, že nově navržená výrobní technologie má výrazně redukováný dávkový čas t_{BC} oproti technologii stávající. Důvodem tohoto poklesu je zaměření nově navržené technologie na minimalizování potřebných výrobních operací a s tím spojený nižší celkový čas potřebný k přípravě pracovišť na výrobní dávku. Rozdíl dávkových časů se především projeví u nižších výrobních dávkách. Jednotkový čas t_{AC} je u navržené technologie nižší než u stávající technologie, avšak rozdíl je výrazně nižší.



Obr. 53: Srovnání jednotkového a dávkového času pro obráběcí operace mezi stávající a navrženou technologií výroby.

Srovnání relativních nákladů mezi nově navrženou a stávající metodou je vyobrazeno viz Obr. 54. Celkové náklady se vztahují na nejčastější výrobní dávku, která činí 20 ks. K nejvyšším úsporám nově navržené technologie dochází u dávkového času, kdy je zapotřebí 62 % předešlých nákladů. Úspory jednotkového času představují 2 %. Nákladová položka, která se naopak značně navýšila jsou náklady na materiál, kdy pro nově navrženou technologii a následnou výrobu je nutné využití delších přířezů z tyčí. Náklady na materiál vzrostly na 112 % původních nákladů. Celkové náklady činí 95 % z původních nákladů, nově navržená technologie je tedy možným řešením inovace stávajícího výrobního postupu pro zefektivnění obráběcího procesu a snížení nákladů na výrobu kompresorového kola.



Obr. 54: Relativní srovnání nákladů navržené a stávající výrobní technologie.

7.4 Důsledky aplikace lokalizovaného zpomalení posuvové rychlosti při dokončování lopatek

V kapitole č. 6.2.5 byla řešena vzniklá nespojitost povrchu na výstupní hraně lopatek KK. Pro její eliminaci byla zvolena metoda lokálního snížení posuvové rychlosti, která vedla k značnému navýšení strojního času dokončování lopatek. Kvůli tomuto lokálnímu snížení posuvové rychlosti došlo k navýšení jednotkového času o 12 % (Obr. 55) a tedy i značnému navýšení výrobních nákladů KK.



Obr. 55: Srovnání celkového t_{AC} s a bez využití lokálního snížení posuvové rychlosti.

Řešení eliminace vzniklé stopy po dokončovacím obrábění na lopatkách v podobě lokální redukce posuvové rychlosti je vhodným řešením především z hlediska jakosti povrchu lopatek. Avšak při tomto lokálním snížení posuvové rychlosti dochází k značnému navýšení strojního času (jednotkového času) a technologie se stává nepoužitelnou.

Bylo by tedy vhodné ověřit vliv vzniklé stopy na parametry a správnou funkci KK v proudovém motoru. V případě, že by stopa na lopatkách tyto parametry a funkci KK významně neovlivňovala, bylo by vhodné zvážit povolení této stopy nebo změnu drsnosti povrchu lopatek ve výkresové dokumentaci. Pokud stopa na lopatkách bude nabývat významného vlivu na parametry a funkčnost KK, bylo by vhodné vyhledat důvod vzniku nespojitosti a problém eliminovat. Tímto by došlo k zefektivnění výroby KK.

ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena na navržení nové technologie výroby kompresorového kola malého proudového motoru PBS GJ 40, která by mohla nahradit již stávající výrobní technologii. Nově navržená technologie byla zaměřena na co nejmenší manipulaci s materiálem a koncentraci co nejvíce operací na jedno strojní zařízení. K tomuto navrženému a zpracovanému technologickému postupu výroby byli zvoleny vhodné strojní zařízení a nástroje.

Na základě provedeného obrábění pro ověření technologického postupu lze konstatovat:

- byla ověřena vyrobiteľnosť řešené součásti dle navrženého technologického postupu a navržený postup je možné zavést do výroby za podmínky, že nebude experimentálně prokázán vliv projevené nespojitosti na výstupní hraně lopatek na účinnost kompresorového kola, nebo za předpokladu, že bude vyřešena příčina vzniku nespojitosti na lopatkách,
- došlo k vzniku nespojitosti povrchu na lopatkách kompresorového kola,
- změna hustoty řídicích bodů nástrojové dráhy nemá zásadní vliv na eliminaci stopy vzniklé na lopatkách,
- způsobenou nespojitost povrchu na lopatce kompresorového kola je možné eliminovat použitím lokálního zpomalení posuvové rychlosti,
- měření přesnosti polohování lineárních a rotačních os stroje Mazak integrex i300 pomocí aparatury Renishaw double ball bar neprokázalo jednoznačný vliv na vznik této nespojitosti,
- byla ověřena realizovatelnost obrábění lopatek kompresorového kola na stroji Mazak inegrex i300,

Na základě technicko-ekonomického zhodnocení lze konstatovat:

- celkové náklady na výrobu 1ks kompresorového kola u nově navržené technologie, pro výrobní dávku 20 ks, činí 95 % nákladů technologie stávající,
- došlo k výrazné redukci dávkového času (o 38 %) a mírné redukci jednotkového času (o 2 %),
- součet dávkových časů všech obráběcích operací dle stávajícího technologického postupu činí 532,5min,
- součet dávkových časů všech obráběcích operací u inovovaného technologického postupu a jeho provedeného ověření ve výrobě činí 300 min,
- celková úspora v dávkovém čase tedy činí 232,5min,

- součet jednotkových časů všech obráběcích operací stávajícího postupu nutných pro výrobu 1ks činí 198,2min,
- součet jednotkových časů všech obráběcích operací inovovaného technologického postupu nutných pro výrobu 1ks činí 190 min,
- celková úspora v jednotkovém čase tedy činí 8,2min,
- došlo k navýšení materiálové spotřeby o 12 %,
- lokální zpomalení posuvové rychlosti představuje 12% navýšení jednotkového času,
- na základě získaných dat pro výpočet nákladů je celková úspora při výrobě obvyklé výrobní dávky 20ks rovna 7412 Kč,
- náklady na pořízení nástrojů pro realizaci frézování kompresorového kola na stroji mazak integrex i300 činí 59883 Kč.

Na základě vyhodnocených dat je možné konstatovat:

- navrženou inovaci technologického postupu je možné zavést do výroby,
- zavedení navrženého technologického postupu je vhodné z hlediska ekonomického, ale zejména z hlediska omezení manipulace s materiálem (8 obráběcích operací vs. 2 obráběcí operace),
- rychlejší vřeteno pro poháněné nástroje by umožnilo zrychlení frézování lopatek řešené součásti o cca o 30 až 40 % z ověřených 138 min na cca 108 min až 98 min,
- trvanlivost a životnost nástrojů nebyla předmětem zkoumání,
- lokální zpomalení posuvové rychlosti způsobuje značný nárůst jednotkového času (o 12 %), a omezuje využití nově navržené technologie do výroby.

Doporučení pro budoucí práci na vylepšení výrobního procesu.

- Z důvodu, že výroba lopatek patří mezi nejnákladnější položky výroby kompresorového kola je vhodné se dále zaměřit na snižování strojních časů pro tuto operaci. Jedním z možných řešení je investice do nového přídatného zařízení nebo stroje k navýšení maximálních pracovních otáček vřetena pro poháněné nástroje. Vřeteno pro poháněné nástroje stroje Mazak integrex i300 dosahuje maximálních otáček 12000 min^{-1} .
- Dále je vhodné vyhledat efektivnější způsob eliminace vzniklé nespojitosti ploch na výstupní hraně lopatek, než je lokální zpomalení posuvové rychlosti. Nebyl zjištěn původ vzniku této stopy a pro zjištění a zamezení jejího vzniku by byl nutný další podrobnější výzkum. Pro možnou eliminaci této stopy by bylo vhodné ověřit vliv navržených přídatných opcí, které jsou speciálně určeny pro obrábění komplexních ploch. Z časových důvodů a výskytu chyby při jejich implementaci nebyl ověřen jejich vliv na vznik stopy na lopatkách. Další oblastí, která by mohla být možnou

příčinou vzniku stopy na lopatkách a nebyla důkladněji prozkoumána je převod dat obsahujících pozice nástroje z CAM softwaru na pohyby stroje za pomoci post-processoru.

- Dalším možným řešením, které zcela vylučuje nutnost řešení vzniklé nespojitost ploch na lopatkách je povolit tuto stopu ve výkresové dokumentaci. Pro povolení této stopy na lopatkách ve výkresové dokumentaci by bylo nutné ověřit její vliv na parametry a funkčnost kompresorového kola. Při zjištění nevýznamného vlivu této stopy na parametry a funkčnost kompresorového kola by bylo možné tuto stopu povolit ve výkresové dokumentaci.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *O Společnosti PBS* [online]. [cit. 2021-06-28]. Dostupné z: <https://pbs.cz/cz/O-PBS/O-spolecnosti>
2. *Letectvi* [online]. [cit. 2021-06-28]. Dostupné z: <https://pbs.cz/cz/Letectvi>
3. *PBS turbojet engines brochure* [online]. [cit. 2021-7-1]. Dostupné z: https://pbs.cz/getmedia/f284d891-b97f-42e5-bee0-3da91bc541d5/PBS_Turbojet_Engines_Brochure_210315_new.pdf.aspx
4. ŠMEJKAL, Pavel. Jak funguje proudový motor. *21století.cz* [online]. [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <https://21století.cz/2017/02/03/jak-funguje-proudovy-motor-2/>
5. ROLLS-ROYCE plc. *The Jet Engine*. 5th edition. Birmingham: Renault Printing Co, 1996. 292 s. ISBN 0902121-235.
6. HECZKO, Nikodem. *Letecké proudové motory s proměnným cyklem*. Brno, 2013. Bakalářská práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Josef Klement.
7. Proudový motor. [Http://tomas-bures.mzf.cz](http://tomas-bures.mzf.cz) [online]. [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <http://tomas-bures.mzf.cz/Leteck%C3%A9%20technologie%20-%20form%C3%A1t/Proudov%C3%BD%20motor.html>
8. GONGOL, Jakub. *Návrh malého proudového motoru do 1kN tahu*. Brno, 2013. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Jiří Škorpík.
9. *Proudový motor* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: <http://tomas-bures.mzf.cz/Leteck%C3%A9%20technologie%20-%20bootstrap/Proudov%C3%BD%20motor.html>
10. *Dvouproudový motor* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: <http://tomas-bures.mzf.cz/Leteck%C3%A9%20technologie%20-%20bootstrap/Proudov%C3%BD%20motor.html>
11. *Propeller motor* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRYi567nRXiyo0Qak69HnXheyCumTSS1opTQCz-Rt_620Pk01H044P3NHlnVSxwUiA-Rg&usqp=CAU
12. Sorokes, James. (2013). Selecting a centrifugal compressor. 109. 44-51.
13. Centrifugal compressor parts & their function. *Thepipingtalk.com* [online]. 2020 [cit. 2021-7-16]. Dostupné z: <http://thepipingtalk.com/centrifugal-compressor-parts-their-function/>
14. Centrifugal compressor. *Mech4study.com* [online]. 2017 [cit. 2021-7-16]. Dostupné z: <https://www.mech4study.com/2017/11/centrifugal-compressor.html>
15. SCHWIND, R. a S. ABDALLAH. A Look at Compressor Impeller Technologies for Turbochargers Focusing on Surge Mitigation. *Technology & Optimization* [online]. 2015, **2015**(6), 4 [cit. 2021-7-16]. Dostupné z: doi:10.4172/2229-8711.1000185
16. Čerňan, J.; Pecho, P.; M.Čuttová, M., Semrád, K. 2018. Structural analysis of centrifugal compressor impellers with different blade shapes, 22rd International Scientific Conference, Trakai, Lithuania.
17. SVOBODA, Miroslav a Martin TŮMA. PEVNOSTNÍ KONTROLA RADIÁLNÍHO KOMPRESOROVÉHO KOLA POMOCNÉ ENERGETICKÉ JEDNOTKY. In: TŮMA, Martin. *Proceedings of 27th*

- SVSFEM ANSYS Users' Group Meeting and Conference 2019*. Olomouc: SVSFEM, 2019, s. 4-10. ISBN 978-80-905525-6-2
18. *Aluminium_2618a* [online]. [cit. 2021-06-28]. Dostupné z: <https://www.aircraftmaterials.com/data/aluminium/2618a.html>
 19. Nikolay A. Belov, Dmitry G. Eskin, Andrey A. Aksenov; *Multicomponent Phase Diagrams: Applications for Commercial Aluminum Alloys*, Elsevier, ISBN: 9780080456966, 2005-07-01, P424. str.245
 20. *Tepelne zpracovani hlinikových slitin* [online]. [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Tepeln%C3%A9%20zpracov%C3%A1n%C3%AD%20hlin%C3%ADkov%C3%BDch%20slitin.pdf?redirected>
 21. *Definice stavu EN 515* [online]. In: . [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <http://www.fajners.cz/pictures/pdf/Definice%20stavu%20EN%20515.pdf>
 22. PBS Velká Bíteš. *Laboratorní rozbor 9089/20-1943/Mt*. 2020.
 23. *Steel forming process hot rolled cold rolled forging casting* [online]. 2015 [cit. 2021-7-1]. Dostupné z: <https://www.astmsteel.com/steel-knowledge/steel-forming-process-hot-rolled-cold-rolled-forging-casting/>
 24. *Difference between forging and rolling* [online]. 2015 [cit. 2021-06-288]. Dostupné z: <https://www.machinemfg.com/difference-between-forging-and-rolling/>
 25. *Www.melett.com* [online]. 2017 [cit. 2021-6-28]. Dostupné z: <https://www.melett.com/technicalarticles/cast-vs-mfs-compressor-wheels/>
 26. CHILDS, P.R.N. a M.B. NORONHA. *The Impact of Machining Techniques on Centrifugal Compressor Impeller Performance* [online]. 2014 [cit. 2021-7-1]. Dostupné z: doi:10.1115/97-GT-456
 27. TAO, Wu, Cao YANLONG a Yang JIANGXIN. Analysis of the Influence of Blade's Machining Error on Aerodynamic Performance of Impeller Based on NUMECA. *Procedia CIRP* [online]. 2015, **2015**(27), 7 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2015.04.059
 28. OSIČKA, Karel. *Technologická identifikace kvality povrchu obrobene plochy*. Prezentace. In: Powerpoint[online]. 2021
 29. *Simulace obrábění od společnosti Hexagon* [online]. 2020 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/about-us/news/media-releases/2020/november-2020/hexagon-machine-simulation-helps-manufacturers-avoid-notorious-5-axis-singularity>
 30. CHAVES-JACOB, Julien, Gérard POULACHON a Emmanuel DUC. Optimal strategy for finishing impeller blades using 5-axis machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing* [online]. **2012**(58), 3 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-011-3424-1
 31. Profile milling. *Www.sandvik.coromant.com* [online]. [cit. 2021-7-1]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>
 32. Addaptive toolpath for 3-axis milling of thin walled parts. In: GROSSI, N., A. SCIPPA, L. CROPPA, L. MORELLI a G. CAMPATELLI. *15th International Conference on High Speed Machining*. Praha, 2019, s. 8. ISSN 1805-0476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2019_11_201909

33. RUSINEK, R. a K. ZALESKI. Dynamics of thin-walled element milling expressed by recurrence analysis. *Meccanica* [online]. **2016**(51), 1275–1286 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: doi:10.1007/s11012-015-0293-y
34. BOLSUNOVSKIY, S. a V. VERMEL. Thin-Walled Part Machining Process Parameters Optimization based on Finite-Element Modeling of Workpiece Vibrations. *Procedia CIRP* [online]. **2013**(8), 276-280 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2013.06.102
35. HEISEL, U. a A. FEINAUER. Dynamic Influence on Workpiece Quality in High Speed Milling. *CIRP Annals* [online]. **1999**(48), 321-324 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)63193-X
36. SØRBY, Knut. Inverse kinematics of five-axis machines near singular configurations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2007, **2007**(2), 7 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2006.03.011
37. MIN, Wan a Liu YANG. Singularity avoidance for five-axis machine tools through introducing geometrical constraints. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2018, **2018**(127), 13 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2017.12.006
38. SVOBODA, Ondřej. *Víceosé obrábění optimální směr pro růst průmyslu* [online]. 2011, (111230) [cit. 2021-7-1]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/viceose-obrabeni-optimalni-smer-pro-rust-prumyslu>
39. Computer aided manufacturing. *Www.autodesk.com* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/>
40. OVERBY, Alan. *CNC machining handbook: building, programming, and implementation*. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-162301-8.
41. Cnc post processor. *Camplete.com* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: <https://camplete.com/cnc-post-processor/>
42. *Mazak integrex i300* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: <https://www.mazakeu.cz/cs/machines/integrex-i-300/>
43. *Kuželová stopková fréza* [online]. [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <http://250.ef-catalogues.com/171/>
44. DVOŘÁK, Luděk. *Www.mmspektrum.com* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/tepelne-upinani-nastroju-11885>
45. *Tepelny upinac* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: <https://www.bo-import.cz/tepelny-upinac-mini-hsk-e50x05mm-zg80-extrauzky-g2-5-25-000-din-69893e-243007-50-05-p627847/>
46. YOUNG, H.-T., L.-C. CHUANG, K. GERSCHWILER a Sascha KAMPS. A five-axis rough machining approach for a centrifugal impeller. *The International Journal of Advanced Manufacturing* [online]. **2004**(23), 233-239 [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-003-1677-z
47. TIŠER, Tomáš. *Obrábění lopatkových kol*. Praha, 2020. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Jiří Sommer.
48. Manufacturing method for turbomachinery. *Www.conceptsnrec.com* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z:

- <https://www.conceptsnrec.com/blog/manufacturing-methods-for-turbomachinery>
49. *Www.renishaw.cz* [online]. [cit. 2021-7-1]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/ballbar-qc20-w--11075>
50. ČSN ISO 21940-2. *Vyvažování rotorů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2017.
51. *Vyvažování* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vyva%C5%BEov%C3%A1n%C3%AD_rotor%C5%AF
52. *Vyvažování* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: <https://www.vibrostroje.cz/cs/o-vyvažování>
53. Elox. *Www.pbs.cz* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: <https://www.pbs.cz/cz/Sluzby/Povrchove-upravu/Druhy-povrchovych-uprav#elox>
54. Povrchové úpravy elox. [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Eloxov%C3%A1n%C3%AD>
55. *Study and modelling of anodized 2618 aluminum behavior subjected to multiaxial fatigue* [online]. [cit. 2021-7-2]. Dostupné z: doi: 10.1051/mateconf/201816516010
56. PBS Velká Bíteš. *Laboratorní rozbor eloxové vrstvy*. 2020.
57. OSIČKA, Karel. *Technologické a ekonomické aspekty provozu CNC obráběcích strojů*. Prezentace. In: Powerpoint[online]. 2021

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
KK	Kompresorové kolo
SK	Slinutý karbid
CAM	Počítačová podpora výroby (z ang. <i>Computer Aided Manufacturing</i>)
CNC	Číslicové řízení pomocí počítače (z ang. <i>Computer numeric control</i>)
VBD	Vyměnitelná břitová destička
DLT	Divize letecké techniky
SW	Software
ŘS	Řídicí systém
TP	Technologický postup
EDS	Elektronově disperzním spektrometrem
SEM	Skenovací elektronový mikroskop

Symbol	Jednotka	Popis
p_d	mm	Přídavek pro obrábění na průměr
d_{smax}	mm	Maximální průměr součásti
d_{pt}	mm	Teoretický průměr polotovaru
p_l	mm	Přídavek na obrábění ploch
l_{max}	mm	Maximální délka součásti
l_p	mm	Délka přřezu polotovaru
N_{opi}	Kč	Náklady na dávku konkrétní výrobní operace
t_{AC}	min	Jednotkový čas s přídavkem času směnového
t_{BC}	min	Dávkový čas s přídavkem času směnového konkrétní operace

Symbol	Jednotka	Popis
d_v	ks	Dávka
N_{hs}	Kč·hod ⁻¹	Náklady na hodinu provozu strojního zařízení
N_{vi}	Kč·ks ⁻¹	Náklady na výrobu jednoho kompresorového kola stávající výrobní technologie při určité dávce
N_{kj}	Kč	Náklady na kooperaci
N_{C1}	Kč·ks ⁻¹	Náklady na výrobu jednoho kompresorového kola stávající výrobní technologie včetně materiálu při určité výrobní dávce
N_{mat}	Kč	Náklady na materiál
N_N	Kč	Náklady na pořízení nástrojů
N_D	Kč	Náklady na pořízení držáků
N_{VBD}	Kč	Náklady na pořízení VBD
a_p	mm	Šířka záběru ostří
a_e	mm	Pracovní záběr

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Materiálový atest.
Příloha 2	Původní technologický postup.
Příloha 3	Technologický postup pro variantu č.1.
Příloha 4	Přípravky pro variantu č.1.
Příloha 5	Technologický postup pro variantu č.2 (návrh).
Příloha 6	Rozpis jednotlivých opcí.
Příloha 7	Výkres součásti.

part STEP/G

Order Information

Customer:

Our order no:

Our part no:

Country of origin:

Your order no:

Your part no:

Delivery note no:

Description:
 ROUND BAR
 2618A T8511
 110 X 3000MM

Alloy: 2618A

Temper: T8511

Chemical Composition (%)

Cast	Si		Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Ti+Zr	Others each		Others total
	Min	Max											
03-250949	0,15	0,9	1,8	1,2	0,8	1,2	0,8	0,15	0,20	0,25	0,05	0,05	0,15
	0,25	1,4	2,7	1,8	1,4	1,4	1,4	0,07	0,05	0,06	<= 0,05	<= 0,15	
	0,18	1,1	2,6	1,6	1,0	1,0	1,0	0,07	0,05	0,06	<= 0,05	<= 0,15	

Mechanical Properties

Cast	Batch	Test	HBW 2,5/62,5		Rm (L)	Rp0,2 (L)	A5 (L)	E.G.
			Min	Max	N/mm ²	N/mm ²	%	MS/m
03-250949	9873	1	136,0	452,9	410,0	350,0	6,0	21,0
					423,8	423,8	8,9	21,8

CERTIFICATE EN 10204-3.1

ALL BARS HAVE BEEN ULTRASONICALLY TESTED ACCORDING TO AMS-STD 2154
 . TYPE I, CLASS A.

The specified material meets the terms agreed on.

Package Information

Package	Cast No	Colour	Batch	Pieces
	03-250949		9873	5
	03-250949		9873	5

This document was created electronically and is valid without signature and stamp. As legally binding only the original deposited in Duffel is to be considered.

PŘÍLOHA 2

PBS Velká Bíteš, a. s.

TECHNOLOGICKÝ POSTUP

List: 1 / 2

Artikl:	Alt.	Název	Výkres:	Postavení					
		Kompresor TJ40 IBW2		Dílec					
Dávky :	technologická 10	minimální 0	maximální 0	Kmen. středisko 331	Platí od / do 29.5.2020 22:0	Modifikace 8	Změna od / do IT_DLT_20200529	Stav H	Poč. operací 15

Poznámka:	Autor postupu	Schválil

Materiál - název	Artikl	Spotřební množství	MJ	% ztrát
KR 110 AIR 9049, EN 10204 3.1	M19412100619244	1,7 kg	0	
Příznaky Pracoviště Středisko Rozměr přezu Ks Kspolot Příd. up. Prořez Hmotnost polot.				
+++++				
Poznámka : KR110x50 + 1KS KR110x50 NAVIC NA OVERENI FREZOvani				Klíč: 72103

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
10	0596701	Pila pásová	301		0,00 min.		1,0
	řezání				0,00 min.		0,00
		URIZNOUT					

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
20	3459402	Soustruh automatický produkční	331		90,00 min.	6100	0,6
	soustružení		L-3459402-1436		5,70 min.	6100	3,42
		SOUSTRUZIT Z PRAVE STRANY CELO, POVRCH NA $\varnothing 101$ DO HL.13, OTVOR $\varnothing 10-0,004$ NA $\varnothing 8+0,01+0,03$ DO HL.16, DALE ODLEHCIT NA $\varnothing 8,1+0,2$, NA CELE $\varnothing 101/80$ FREZOVAT DRAZKU S=3+0,02 DO HL.2, SRAZIT HRANY					

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
30	3459402	Soustruh automatický produkční	331		60,00 min.	6100	1,0
	soustružení		L-3459402-1437		4,75 min.	6100	4,75
		SOUSTRUZIT Z LEVE STRANY, ZAROVNAT CELO NA CELKOVOU DELKU L=43,1+-0,05, VNEJSI MERIDIAN S PRID.1MM NA PRUMER, MIRA 7+5,7 NA 13,4 MIN., OTVOR $\varnothing 21$ NA $\varnothing 20$ VCETNE R2,5 DO HL.13					

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
40	3533503	Obráběcí centrum	331		135,00 min.	6107	0,6
	frézování		L-3533503-KOLO-131		114,00 min.	6107	68,40
		FREZOVAT LOPATKY HOTOVE DLE VYKRESU, ODJEHLIT PO FREZOvani FREZOVACI PRIPRAVEK 183-67153					
		* POZOR! NA PRAVEM CELE PRID.4,7					
		* FREZOvani LOPATEK OVERIT NA 1KS VYDANEM NAVIC					

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
50	0412505	Soustruh hrotový	331		30,00 min.	6100	1,0
	soustružení				19,00 min.	6100	19,00
		UPNOUT NA TRN, PREROVNAT PRAVE CELO MIRA 5,7+-0,05 NA 5,9+-0,05, SOUSTRUZIT POVRCH $\varnothing 100$ NA $\varnothing 100,5$					

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
60	3533503	Obráběcí centrum	331		67,50 min.	6100	0,6
	frézování		L-3533503-KOLO-131-		33,25 min.	6100	19,95
		UPNOUT, VYSTREDIT, VRTAT OTVOR 2x $\varnothing 1,5$ A $\varnothing 10-0,004$ HOTOVE FREZOVACI PRIPRAVEK 183-67089					

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
70	0412505	Soustruh hrotový	331		30,00 min.	6100	1,0
	soustružení				4,75 min.	6100	4,75
		UPNOUT NA TRN, SOUSTRUZIT HOTOVE PRAVE CELO $\varnothing 100/\varnothing 10$ V JEDNE ROVINE, LEVE CELO A POVRCH $\varnothing 100-0,05-0,1$					

Vytiskl:

Dne:

Artikl:	Alt.	Název	Výkres:	Postavení					
		Kompresor TJ40 IBW2		Dílec					
Dávky:	technologická	minimální	maximální	Kmen. středisko	Platí od / do	Modifikace	Změna od / do	Stav	Poč. operací
	10	0	0	331	29.5.2020 22:0	8	IT_DLT_20200529	H	15

Poznámka: Autor postupu Schválil

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
80	3459402	Soustruh automatický produkční soustružení	331		90,00 min.	6105	0,6
			L-3459402-1477		19,95 min.	6105	11,97
SOUSTRUZIT HOTOVE VNEJSI MERIDIAN, DALE SOUSTRUZIT ≈21 VCETNE R2,5 A CELA HOTOVE, VNITRNI CELO PRELESTIT, NAPOJIT KUZELE 5° NA R1,5					SOUSTRUZNICKY PRIPRAVEK 183-67088		
90	3459402	Soustruh automatický produkční soustružení	331		30,00 min.	6100	0,6
			L-3459402-1478		14,00 min.	6106	8,40
SOUSTRUZIT Z PRAVE STRANY R70 HOTOVE					SOUSTRUZNICKY PRIPRAVEK 183-67088		
100	0942105	Práce zámečnické zámečnické práce	331		10,00 min.	4105	1,0
					15,00 min.	4105	15,00
CELKOVE ODJEHLIT, PECLIVE VYPRAT OD CHLADICI KAPALINY							
110	9582301	TruMark Station 5000 popisování	331		15,00 min.	4105	1,0
					2,85 min.	4105	2,85
OZNACIT LASEREM MELKYM GRAVIROVANIM DLE VYKRESU							
120	2892207	Vyvažovačka 0,2-20 kg vyvažování	334		30,00 min.	6100	1,0
					27,075 min.	6100	27,075
VYVAZIT DLE VYKRESU							
130	0986001	Prace pri trideni, kontrole roz kontrola	302		0,00 min.		1,0
					0,00 min.		0,00
KONTROLOVAT PRED POVRCHNOVOU OCHRANOU							
140	0963501	Eloxování v kys.chrom. eloxování	301	E 10,00	0,00 min.		1,0
					0,00 min.		0,00
ELOXOVAT. ELOX 3 ONL 1831.21							
150	0986001	Prace pri trideni, kontrole roz kontrola	302		0,00 min.		1,0
					0,00 min.		0,00
KONTROLOVAT-KOMPLETNI ROZMEROVA KONTROLA							

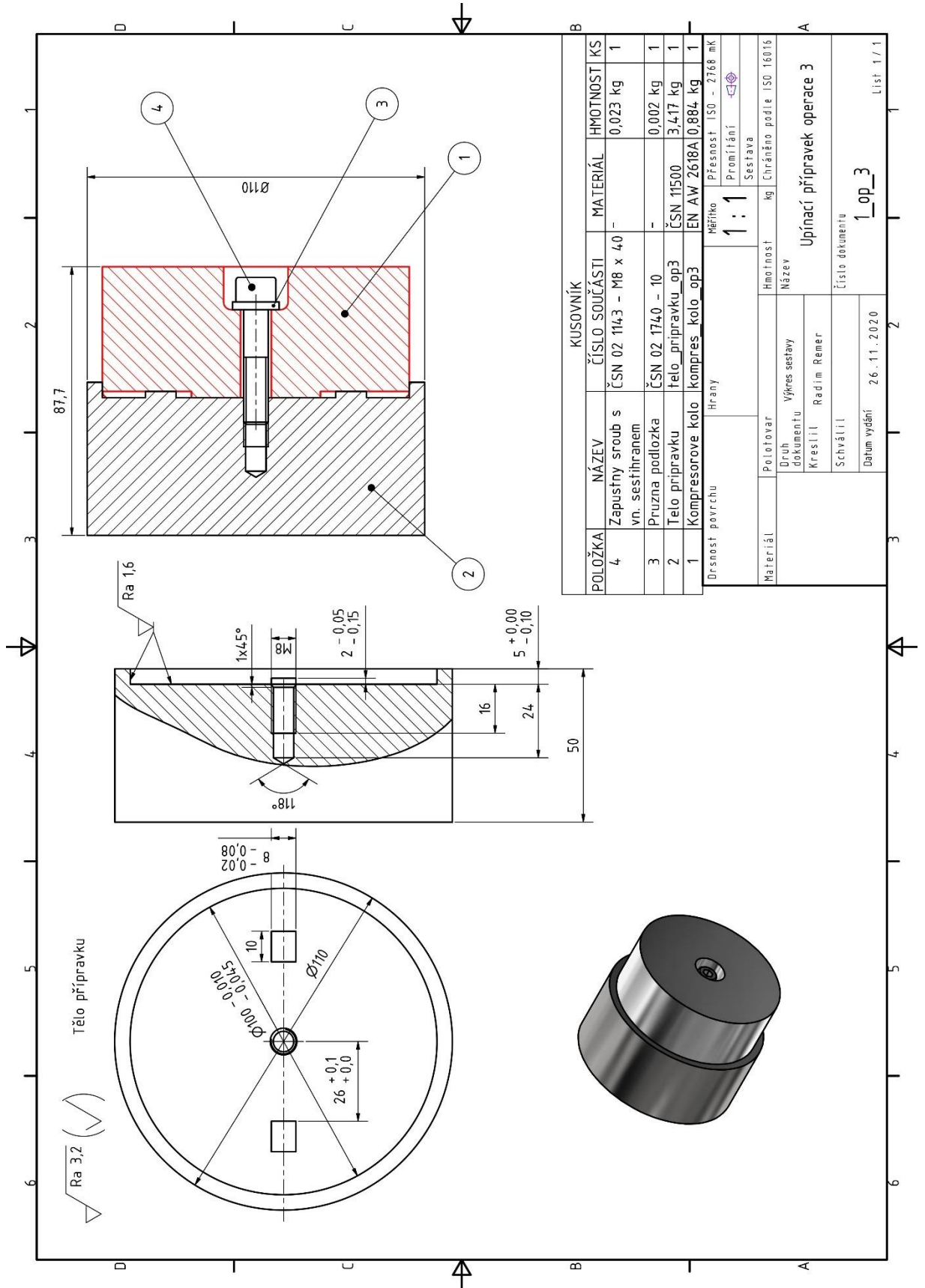
Vytiskl:

Dne:

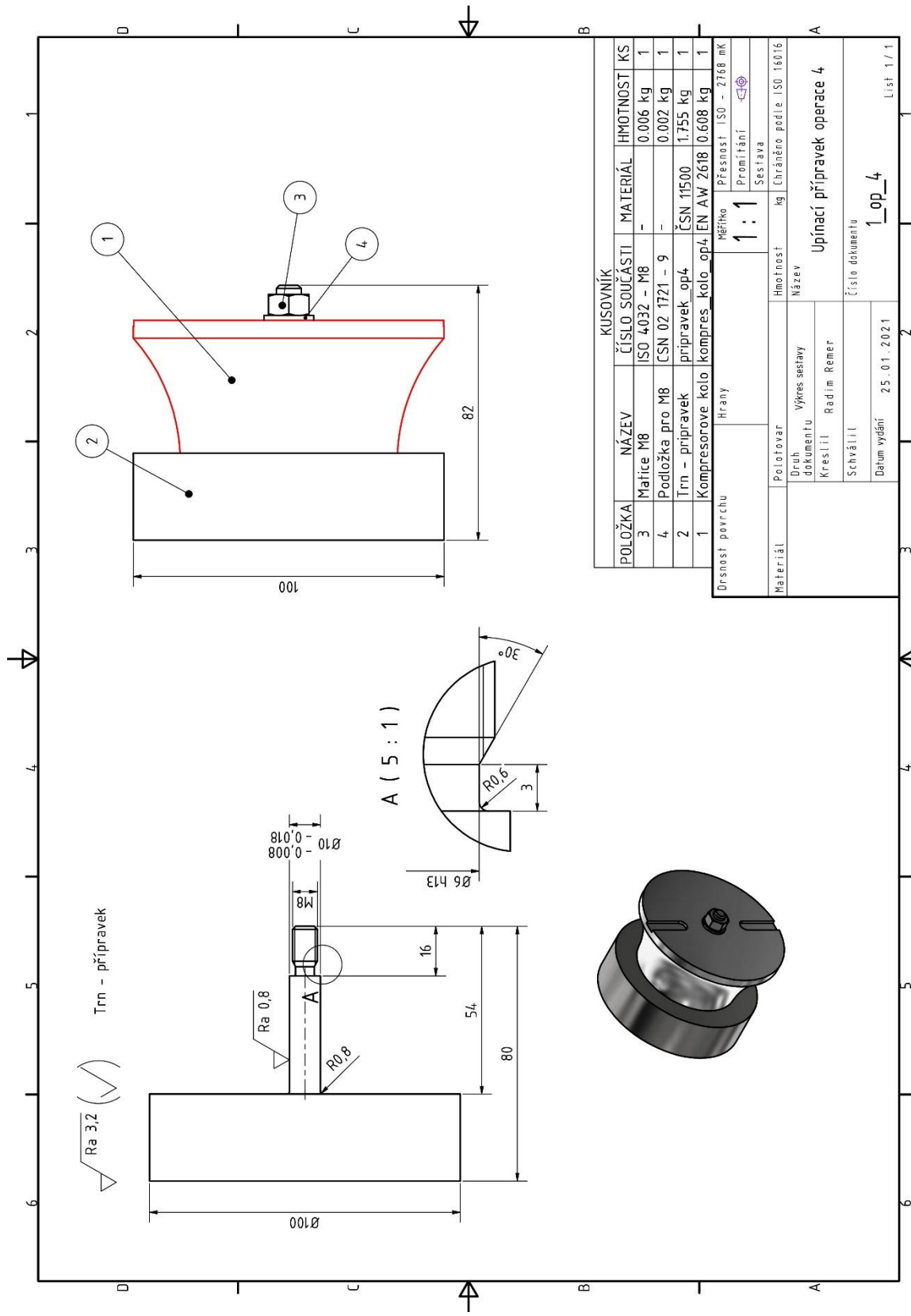
PŘÍLOHA 3

PBS Velká Bíteš, a.s.		VÝROBNÍ POSTUP	Název součásti: Kompresor	Číslo výkresu: B3-0474-13321
Datum: 24.11.2020		Vyhotovil: Radim Remer	Polotovár: Ø110 x 48	Materiál: EN AW 2618A – T8511
Dávka: 10 ks		Hmotnost hrubá: 1,28 kg	Hmotnost čistá: –	Strana: 1/2
Číslo op.	Název, označení stroje	Popis práce v operaci		Výrobní nástroje, přípravky, pomůcky
0/0	Pásová pila 05967	Tyče Ø110 řezat po 47,7±0,1.		
10/10	Soustružnicko – frézovací centrum – Mazak integrex i300 34135	<p>Upnout zprava do měkkých čelistí (hloubka 18) tříčelistového sklíčidla – dorazit na čelo (obrábět zleva), vrtat otvor Ø9,4-0,1, zarovnat čelo o 2 a soustružit válcovou plochu na Ø100+0,1 do vzdálenosti 20+0,2 (hrubování), soustružit vnitřní zahlobení (hrubování), soustružit vnitřní zahlobení (na hotovo), vrtat 2x Ø1,5+0,03, zaoblit hrany děr 2x R1,5+0,03, zarovnat čelo o 2 a soustružit válcovou plochu na Ø100+0,1 do vzdálenosti 20+0,2 (na hotovo). (+ srazit ostré hrany)</p>		<p>Vrták Ø 9,4 (č.1) Soustružnický nůž levý – hr (č.2) Soustružnický nůž levý – do (č.3) Soustružnický nůž levý vnitřní – hr (č.4) Soustružnický nůž levý vnitřní – do (č.5) Vrták Ø 1,5 (č.6) Kulová fréza Ø 1,5 (č.7)</p>
20/20	Soustružnicko – frézovací centrum – Mazak integrex i300 34135	<p>Upnout zleva do měkkých čelistí tříčelistového sklíčidla – dorazit na čelo (obrábět zprava), vystředit do 0,02 zarovnat čelo na 42,7-0,1 a Ø100^{-0,05}_{-0,085} soustružit do vzdálenosti min.13 na hotovo (hrubování), zarovnat čelo na 42,7-0,1 a Ø100^{-0,05}_{-0,085} soustružit do vzdálenosti min.13 na hotovo (dokončování), na čele vyfrézovat 2 pomocné drážky po 180° s šířkou 8+0,05 od Ø100 po Ø50(střed kružnice konce drážky), hloubka 2+0,1, vyvrtat otvor 10-0,004 na hotovo, kontrola otvoru.</p>		<p>Soustružnický nůž levý – hr (č.2) Soustružnický nůž levý – do (č.3) Vyvrtávací tyč (č.8) Fréza pr.6 (č.9) Tříbodový mikrometr (přesnost 0,001)</p>

PBS Velká Bíteš, a.s.		VÝROBNÍ POSTUP	Název součásti: Kompresor	Číslo výkresu: B3-0474-13321
Datum: 24.11.2020		Vyhotovil: Radim Remer	Polotovár: Ø110 x 48	Materiál: EN AW 2618A – T8511
Dávka: 10 ks		Hmotnost hrubá: 1,28 kg	Hmotnost čistá: –	Strana: 2/2
Číslo op.	Název, označení stroje	Popis práce v operaci		Výrobní nástroje, přípravky, pomůcky
30/30	Soustružnicko – frézovací centrum – Mazak integrex i300 34135	Upnout zprava do přípravku, přípravek ustavit do měkkých čelistí tří-čelistového sklíčidla – dorazit na čelo (obrábět zleva), vystředit do 0,02 soustružit vnější meridián (hrubování), frézovat lopatky (hrubování), frézovat lopatky (dokončování), soustružit vnější meridián a napojit kužel 5° na R1,5 (dokončování).		Soustružnický nůž levý – hr (č.2) Soustružnický nůž levý – do (č.3) Fréza kuželová kulová hr. (č.10) Fréza do. Pr.6, kulová (č.11) Fréza kuželová se zaoblením R1,5 (č.12) Přípravek (č.1_op_3)
40/40	Soustružnicko – frézovací centrum – Mazak integrex i300 34135	Upnout zleva na trn přípravku, přípravek ustavit do měkkých čelistí tří-čelistového sklíčidla – dorazit na čelo (obrábět zprava), vystředit do 0,02 soustružit rádius R70 (hrubování), soustružit rádius R70 (dokončování).		Soustružnický nůž levý – hr (č.2) Soustružnický nůž levý – do (č.3) Přípravek (č.1_op_4)
50/50	Zámečnické pracoviště 09421	Odjehlit ostré hrany 0,3+0,2 x 45°.		
60/60	Pračka	Součásti zbavit od nečistot a emulzí „vypráním“.		
70/70	Laser na značení 95823	Ustavit součást za díru, značit laserem mělkým gravírováním (dle výkresové dokumentace).		
80/80	Vyvažovačka 28922	Vyvážit dle výkresové dokumentace.		
90/90	Mezioperační – kontrola 09863	Měřit profil lopatek na souřadnicovém měřicím stroji lks, celková kontrola s četností 20 %, vizuální kontrola s četností 100 %.		
100/100	Povrchová úprava – ELOX	ELOX 3 ONL 1831.21.		
110/110	Výstupní kontrola 09863	Celková a vizuální kontrola s četností 100 %.		



KUSOVNÍK			
POLOŽKA	NÁZEV	ČÍSLO SOUČÁSTI	HMOTNOST KS
4	Zapustný sroub s vn. sestřihem	ČSN 02 1143 - M8 x 40	0,023 kg 1
3	Průzna podložka	ČSN 02 1740 - 10	0,002 kg 1
2	Tělo přípravku	ČSN 11500	3,417 kg 1
1	Kompresorové kolo	EN AW 2618A 0,884 kg	0,884 kg 1
Drsnost povrchu hrany			
Měřtko		Přesnost ISO - 27168 mk	
Měřítko		Promítání	
Měřítko		Sestava	
Materiál		Hmotnost	kg
Materiál		Chráněno podle ISO 16016	
Druh dokumentu		Název	
Kreslit		Výkres sestavy	
Kreslit		Radim Remer	
Schválit		Schválit	
Datum vydání		26.11.2020	
Upínací přípravek operace 3			
Číslo dokumentu			1_op_3
List 1 / 1			



POLOŽKA	NÁZEV	ČÍSLO SOUČÁSTI	MATERIÁL	HMOTNOST	KS
3	Matice M8	ISO 4032 - M8	-	0,006 kg	1
4	Podložka pro M8	CSN 02 1721 - 9	-	0,002 kg	1
2	Trn - přípravek	ČSN 11500	ČSN 11500	1,755 kg	1
1	Kompresorové kolo	kompres_kolo_op4	EN AW 2618	0,608 kg	1

Drsnost povrchu	Hrany	Měřítko	Přesnost ISO - 2768 mK
		1 : 1	Promítání
			Sestava
Materiál	Položovar	Hmotnosti	kg Chráněno podle ISO 16016
	Druh dokumentu	Název	
	Kreslil	Radim Remer	Úpínací přípravek operace 4
	Schválil		
	Datum vydání	25.01.2021	Číslo dokumentu
			1_op_4
			List 1 / 1

PŘÍLOHA 5

PBS Velká Bíteš, a. s.

TECHNOLOGICKÝ POSTUP

List: 1 / 2

Artikl:	Alt.	Název	Výkres:	Postavení					
		Kompresor TJ40 IBW2		Dílec					
Dávky :	technologická 2	minimální 0	maximální 0	Kmen. středisko 334	Platí od / do 24.4.2021 0:0	Modifikace 2	Změna od / do IT_DLT_20210424	Stav R	Poč. operací 9

Poznámka:	Autor postupu	Schválil

Materiál - název	Artikl	Spotřební množství	MJ	% ztrát
KR 110 AIR 9049, EN 10204 3.1	M19412100619244	1,96	kg	0
Příznaky Pracoviště Středisko Rozměr přezu	Ks	Kspolot	Příd. up.	Prořez
Hmotnost polot.				
Poznámka : KR110x140 (NA 2KS)				Klíč: 72103

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
10	0596701	Pila pásová	301		0,00 min.		1,0
	řezání				0,00 min.		0,00
UŘÍZNOUT.							

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
20	4445602	Mazak Integrex i-300/1000	331		270,00 min.	5110	0,6
	soustružení, frézování				153,60 min.	5110	92,16

SOUSTRUŽIT Z LEVÉ STRANY HOTOVĚ DLE VÝKRESU:

- FRÉZOVAT LOPATKY HOTOVĚ,
- FRÉZOVAT 2x R0,75+0,03,
- SOUSTRUŽIT R70 NA PRÁVÉ STRANĚ,
- SRAZIT HRANY,
- UPÍCHNOUT S PŘÍDAVKEM 0,3.

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
30	0412408	Soustruh hrotový	334		30,00 min.	5110	1,0
	soustružení				9,60 min.	5110	9,60

UPNOUT DO MĚKKÝCH ČELISTÍ:

- SOUSTRUŽIT Z PRÁVÉ STRANY, SRAZIT HRANU V OTVORU S OHLEDEM NA PŘÍDAVEK,
- PŘEPNOUT, UPNOUT NA TRN,
- ZAROVNAT HOTOVĚ PRÁVÉ ČELO

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
40	0942105	Práce zámečnické	334		10,00 min.	5110	1,0
	zámečnické práce				14,40 min.	5110	14,40

CELKOVĚ ODJEHLIT:

- PEČLIVĚ VYPRAT OD PROCESNÍ KAPALINY.

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
50	9582301	TruMark Station 5000	331		10,00 min.	5110	1,0
	popisování				1,824 min.	5110	1,824

OZNAČIT LASEREM ZABARVENÍM POVRCHU DLE VÝKRESU.

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
60	2892207	Vyvažovačka 0,2-20 kg	334		30,00 min.	5110	1,0
	vyvažování				25,992 min.	5110	25,992

VYVÁŽIT DLE VÝKRESU

Vytiskl:

Dne:

Artikl:	Alt.	Název	Výkres:	Postavení
		Kompresor TJ40 IBW2		Dílec
<i>technologická</i>	<i>minimální</i>	<i>maximální</i>	<i>Kmen. středisko</i>	<i>Platí od / do</i>
<i>Dávky:</i>	2	0	0 334	24.4.2021 0:0
			<i>Modifikace</i>	<i>Změna od / do</i>
			2	IT_DLT_20210424
			<i>Stav</i>	<i>Poč. operací</i>
			R	9

Poznámka:	Autor postupu	Schválil

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
70	0986001	Prace při třídění, kontrole roz	302		0,00 min.		1,0
	kontrola				0,00 min.		0,00

KONTROLOVAT PŘED POVRCHNOVOU ÚPRAVOU.

*

KONTROLU PROFILU LOPATEK PROVÁDĚT NA SOUŘADNICOVÉM MĚŘÍCÍM

PŘÍSTROJI DLE CAD MODELU.

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
80	0963501	Eloxování v kys.chrom.	301	I 49,00	0,00 min.		1,0
	eloxování				0,00 min.		0,00

ELOXOVAT, ELOX 3 ONL 1831.21.

Operace	Pracoviště	Název pracoviště	Středisko / NC	Kooperace	TBC / TAC	Tarif	KVO / Čas d.
90	0986001	Prace při třídění, kontrole roz	302		0,00 min.		1,0
	kontrola				0,00 min.		0,00

KONTROLOVAT DLE VÝKRESU PRO Č.Č. 474114.12

*

KONTROLU PROFILU LOPATEK PROVÁDĚT NA SOUŘADNICOVÉM MĚŘÍCÍM

PŘÍSTROJI DLE CAD MODELU.

PŘÍLOHA 6

1 EIA	29 GANTRY ROBOT CONTROL	57 RE-THREAD
2 HIGH SMOOTHING CONTROL	30 FLASH TOOL	58 PROGRAM MEMORY EXPANSION
3 SPIRAL	31 INCH/MM CONVERT	59 LOWER TURRET MAZATROL
4 EIA 3D COMP.	32 ROT-AXIS SHAPE COMP.	60 MILL TURNING MAZATROL
5 ROTATION	33 G00 SLOPE CONST.	61
6 GEOMETRIC	34 SCALE FEED BACK	62
7 SCALING	35 SUB SP 1/1000 DEG POSI.	63
8 EXT-DATA I/O	36 VARIABLE 600 SETS	64
9 MAZATROL 3D	37 SCALE F/B (A)	65
10 POLYGON MACHINING	38 CYLINDER & POLAR CO-OR INT	66 5-AXIS TOOL LENGTH COMP.
11 HOB MACHINING	39 SYNC. MAIN SP. TAPPING	67 WORK HANDLING
12	40 SIMULTANEOUS 5 AXIS	68 TAP RETRACTION
13 HIGH SPEED	41	69 WORK POS. ERR. COMP.
14 SHAPE COMP.	42	70 THREAD CUT-SPEED OVERRIDE
15 THREAD	43 EIA HERICAL TAP CYCLE	71 SPINDLE ATTACHMENT
16 SUB C-AXIS CONTROL	44 EIA PATTERN CYCLE	72 ANGLE TOOL 5-PLANE
17 INVERSE TIME	45 PROTOCOL B	73 SPRINT
18 DYNAMIC COMP.	46 SHAPING	74
19 3-D CO-OR ROT.	47 2ND AUX. FUNCTIONS	75 VOLUMETRIC COMP.
20 AUTO TLM	48 NURBS INTERPORATION	76
21 POLAR COORDINATES INPUT	49 TILTED WORKING PLANE	77 5-AXIS SPLINE
22 COMPARISON STOP	50 SP/ROT. PARA. ADJUST	78 CHOPPING
23 HV CNTR.	51 TABLE UNBALANCE DETECT	79 PINCH / Y-OFFSET TURNING
24 SYNC. CONT.	52 5-AXIS TOOL COMP.	80
25 EIA CONVERSION	53 AUTO PECKING	
26 SPLINE	54 ETHERNET RUNNING	
27 G54.1	55 TOOL CENTER POINT CONTROL	
28 SYNC. MILL TAPPING	56 THREAD START POINT COMP.	

81 SEAMLESS CORNER CONTROL	109	137
82 VARIABLE ACC CONTROL	110	138
83 SUPER HIGH SPEED	111	139
84 REALTIME TUNING 2	112	140
85 RAPID OVERLAP	113	141
86	114	142
87	115	143
88	116	144
89 LONG TOOL STOCKER	117	145
90 INVOLUTE	118	146
91 PROGRAM MEMORY EXPANSION 2	119	147
92 PARALLEL SHAFT SYNTHESIS	120	148
93 HOB MACHINING 2	121	149
94 ORBIT MACHINING	122	150
95 AUTOMATIC OPERATION ISS	123	151
96 5-AXIS PARAM SELECT	124	152
97 TOOL CUTTING POINT CONTROL	125	153
98 ENGRAVING	126	154
99 SPINDLE ROT. FLUCTUATION	127	155
100	128	156
101	129	157
102	130	158
103	131	159
104	132	160
105	133	
106	134	
107	135	
108	136	

