

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



Obrábění lopatkových kol
Machining of impellers

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE: BC. TOMÁŠ TIŠER

VEDOUCÍ PRÁCE: ING. JIŘÍ SOMMER

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tišer** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **459645**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Obrábění lopatkových kol

Název diplomové práce anglicky:

Machining of impellers

Pokyny pro vypracování:

- 1) Lopatková kola a jejich použití.
- 2) Výroba lopatkových kol s využitím víceosého obrábění.
- 3) CAM strategie softwaru HyperMILL pro obrábění lopatkových kol.
- 4) Návrh NC programu a výroba lopatek experimentálního radiálního kompresorového kola.

Seznam doporučené literatury:

OVERBY, Alan. CNC machining handbook: building, programming, and implementation. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-162301-8.
Davis, J. R. (1989). Machining. Metals Park, OH: ASM International.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jiří Sommer, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

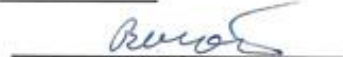
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____



Ing. Jiří Sommer
podpis vedoucí(ho) práce



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

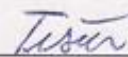


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Tomáš Tišer
Název diplomové práce:	Obrábění lopatkových kol
Rok:	2020
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní a materiálové inženýrství
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí:	Ing. Jiří Sommer
Bibliografické údaje:	počet stran: 104
	počet obrázků: 74
	počet tabulek: 24
	počet příloh: 4

klíčová slova: lopatkové kolo, hyperMILL, pětiosé frézování, strategie frézování, lopatka

Anotace:

Tato diplomová práce se věnuje problematice výroby impelleru, neboli lopatkového kola, za použití 5-osého frézování. V teoretické části práce je řešena oblast použitelnosti lopatkového kola a s ní úzce spojený výběr vhodného materiálu pro splnění podmínek k dané aplikaci. Dále jsou uvedeny charakteristiky víceosého obrábění a uspořádání CNC obráběcích center k tomuto obrábění určené.

Praktická část práce je zaměřena na návrh NC programu a jeho optimalizaci z hlediska drah a jakosti povrchu prototypového lopatkového kola obrobeného z hliníkové slitiny. K tomuto účelu byl použit CAM software hyperMILL od společnosti WESTCAM, který disponuje mimo jiné speciálními strategiemi pro obrobení takto složitých součástí, mezi které lopatkové kolo bezpochyby patří.

Annotation

Author:	Tomáš Tišer
Title of master thesis:	Machining of impellers
Year:	2020
Study program:	Mechanical engineering
Field of study:	Manufacturing and materials engineering
Department:	Department of Machining, Process Planning and Metrology
Supervisor:	Ing. Jiří Sommer
Bibliographic data:	pages: 104
	images: 74
	tables: 24
	attachments: 4

key words: impeller, hyperMILL, 5 axis milling, milling strategy, vane

Annotation:

This diploma thesis deals with the issue of impeller production with 5 axis milling usage. Theoretical part of the work deals with the field of applicability of the impeller and closely related selection of suitable materials to meet the conditions for the application. In the following, characteristics of multi-axis machining are described, together with the arrangement of CNC machining centers intended for this machining.

Practical part is focused on the design of NC program and its optimization in terms of paths and surface quality of prototype impeller, machined from aluminum alloy. CAM software hyperMILL from WESTCAM company was used for this purpose, which has, among other things, special strategies for machining such complex components, among which the impeller undoubtedly belongs.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma obrábění lopatkových kol vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Sommera, s použitím literatury uvedené na konci této diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne

Podpis autora:

Bc. Tomáš Tišer

Poděkování

Na tomto místě bych rád v první řadě poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Sommerovi, a to především za odborné vedení, cenné rady, připomínky, trpělivost a čas, který mi během zpracování této práce věnoval. Dále děkuji mé rodině, přítelkyni a přátelům, kteří mi byli po celou dobu mého studia velkou podporou.

Obsah

1	Úvod	10
2	Lopatkové stroje.....	11
2.1	Rozdělení lopatkových strojů.....	11
2.2	Základní aplikace lopatkových strojů.....	12
2.3	Proudový motor	13
2.4	Turbodmychadlo	14
2.4.1	Kompresorová část	15
2.4.2	Turbínová část	17
3	Lopatková kola	18
3.1	Konstrukce lopatkových kol	19
3.2	Materiály lopatkových kol	21
3.2.1	Turbínová kola	22
3.2.2	Kompresorová kola.....	24
4	Víceosé obrábění.....	26
4.1	Čtyřosé frézování	26
4.2	Pětiosé frézování.....	27
4.2.1	Uspořádání pětiosých center.....	28
4.2.2	Hlavní přínosy pětiosého frézování	30
4.2.3	Řezné síly při pětiosém frézování.....	31
4.3	Strategie frézování	32
4.3.1	Strategie HSC	33
4.3.2	Strategie HFC	33
4.3.3	Strategie HPC	34
4.4	Hrubování lopatkových kol	34
4.5	Dokončování lopatkových kol	36
5	Používané nástroje při obrábění tvarových ploch	37

5.1	Stopkové frézy s kuželovou řeznou částí	38
5.2	Stopkové frézy s kulovou řeznou částí.....	38
5.3	Stopkové frézy se soudečkovou řeznou částí	38
6	Řetězec CAD/CAM/CNC	40
6.1	CAD.....	40
6.2	CAM.....	40
6.3	Postprocesor	41
6.3.1	ISO kód.....	41
6.4	CNC.....	42
6.5	Optimalizace řetězce CAD/CAM/CNC.....	43
6.5.1	Standardní způsob optimalizace	43
6.5.2	Moderní způsob optimalizace	43
7	Software <i>hyperMILL</i>	45
7.1	Uspořádání prohlížeče	46
7.2	Frézovací cykly při obrábění vícelopkových kol v softwaru <i>hyperMILL</i>	47
7.2.1	Hrubování VK.....	47
7.2.2	Dokončování nábojů VK.....	50
7.2.3	Frézování boků VK	51
7.2.4	Bodové frézování VK.....	52
7.2.5	Frézování hran VK.....	52
7.2.6	Frézování zaoblení VK.....	53
8	Experimentální část.....	54
8.1	Materiál polotovaru.....	54
8.2	CAD model lopatkového kola	55
8.3	Použité zařízení	56
8.4	Použité nástroje a upínače.....	57
8.4.1	Řezné podmínky doporučené výrobcem.....	59

8.5	Tvorba NC programu.....	60
8.5.1	Výběr geometrie.....	62
8.5.2	Hrubovací frézování.....	63
8.5.3	Dokončovací frézování náboje	68
8.5.4	Frézování náběžné hrany.....	70
8.5.5	Bodové frézování lopatek.....	71
8.5.6	Frézování zaoblení.....	72
8.6	Realizace výroby lopatkového kola.....	74
8.7	Vyhodnocení výsledků	76
9	Závěr.....	80
10	Seznam použité literatury	82
11	Seznam obrázků.....	89
12	Seznam tabulek	91
13	Seznam příloh	92

1 Úvod

Lopatková kola jsou rotační strojní součástky, vyskytující se takřka v každém odvětví průmyslu. V automobilovém průmyslu jsou aplikována do turbodmychadel či turbokompresorů, zajišťujících zvýšení výkonu spalovacích motorů. V leteckém průmyslu jsou zase součástí proudových motorů. Dále se lopatková kola vyskytují v energetickém průmyslu jako prvky turbín, čerpadel, ventilátorů aj. S lopatkovými koly je možné se setkat i v lodní dopravě, potravinářství, farmacii, chemickém průmyslu, těžebním průmyslu atd.

Způsob výroby lopatkových kol závisí především na účelu použití, na materiálu, z jakého je kolo vyrobeno a jeho rozměrech. Dají se vyrábět odléváním, třískovým obráběním, či aditivními technologiemi výroby, mezi které lze zařadit např. selektivní laserové slinování.

Tato diplomová práce je zaměřena na výrobu lopatkového kola právě třískovým obráběním. Jedná se o prototypové lopatkové kolo do kompresoru motoru nákladního automobilu, vyrobeného technologií pětiosého frézování. Materiálem, ze kterého je kolo vyrobeno, je hliníková slitina EN AW 7075 T6511. CAD model kola poskytl doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D. z ústavu automobilního a dopravního inženýrství, na fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

V teoretické části je zmíněna oblast použití lopatkových kol a shrnutí nejběžněji používaných materiálů pro jejich výrobu. Dále je zde možné nalézt kapitoly zabývající se problematikou víceosého obrábění a progresivních obráběcích strategií, které se při víceosém frézování tvarových ploch běžně používají. V neposlední řadě je zde pojednáno o inovativních řezných nástrojích, zvyšujících efektivnost celého procesu, a také o řetězci CAD/CAM/CNC návrhem součásti počínaje a samotnou realizací výroby konče.

Cílem praktické části práce je návrh NC programu pro výrobu lopatkového kola. Nejprve jsou zde popsány jednotlivé CAM strategie výkonného softwaru hyperMILL, posléze samotná tvorba NC programu, se zaměřením se na optimalizaci drah nástrojů a jakosti obrobeneho povrchu. Výstupem je fyzický model experimentálního radiálního kompresorového kola.

2 Lopatkové stroje

Lopatkové stroje jsou zařízení, jejichž principem je kontinuální transformace energie proudící tekutiny v mechanickou práci (turbíny, mlýny) – tyto stroje se nazývají stroji hnacími, resp. transformace mechanické práce v energii nesenou tekutinou (kompresory, dmychadla, čerpadla, ventilátory) - tyto stroje nazýváme stroji hnanými. Proto jsou označovány i jako stroje tekutinové. Skládají se vždy z rotorové a statorové části. Rotorová část je tvořena lopatkovým, někdy také nazýváno oběžným kolem upevněným na hřídeli. Toto kolo má na svém obvodu rozmístěny tvarové lopatky, které mezi sebou tvoří lopatkové kanálky. V těchto kanálcích proudí pracovní médium, kdy otáčkami lopatkového kola dochází k jeho kompresi a urychlení, a poté putuje dále do další části lopatkového stroje, kterým bývá zpravidla difuzor kompresorové skříně.

2.1 Rozdělení lopatkových strojů

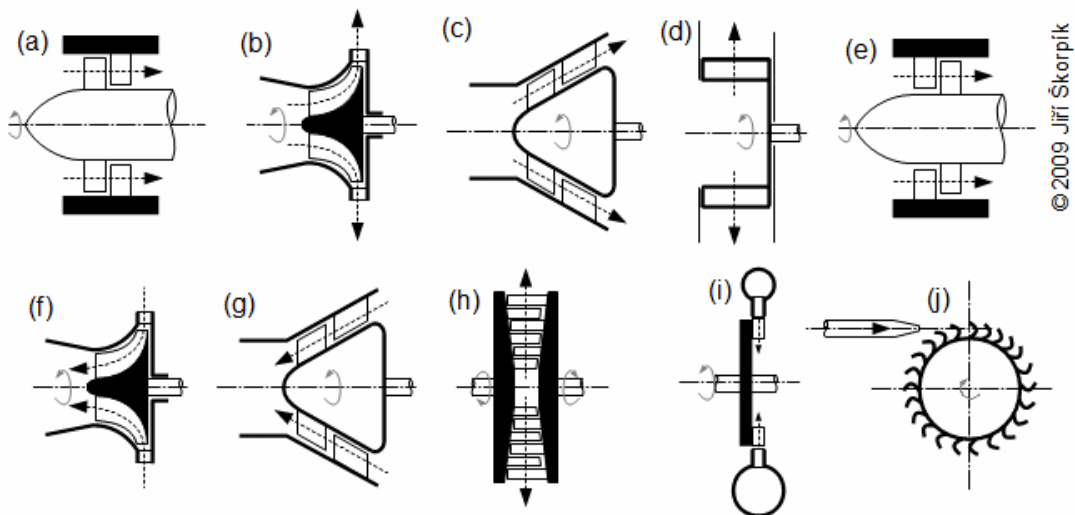
Lopatkové stroje (dále jen LS), je obsáhlá skupina strojů, kterou lze dále rozčlenit dle mnoha parametrů do vícero skupin. Mezi základní parametry patří [1], [2]:

- Poloha hřídele rotoru
 - LS se svislým hřídelem
 - LS s vodorovným hřídelem

- Počet oběžných kol
 - Jednostupňové
 - Vícestupňové

- Směr průtoku proudící tekutiny vůči ose rotace lopatkového stroje, viz obr. 2-1.
 - Axiální LS
 - Kdy pracovní médium vstupuje do a vstupuje ze stroje ve směru osy rotace. (obr. 2-1 – případ (a) až (e))
 - Radiální LS
 - Kdy pracovní médium vstupuje do a vystupuje ze stroje v radiálním směru. (obr. 2-1 – případ (d), (h), (i))

- Radiálně-axiální LS
 - Kdy pracovní médium vstupuje v jednom směru (např. axiálním) a vystupuje ve směru druhém (radiálním), či naopak. (obr. 2-1 – případ (b), (f))
- Diagonální LS
 - Kdy tekutina proudí do stroje ve směru axiálním a vystupuje z něho pod úhlem do 90° od osy rotace, či naopak. (obr. 2-1 – případ (c), (g))
- Tangenciální LS
 - Kdy tekutina proudí do stroje v tečném směru. Tento typ se využívá u vodních turbín (v Peltonově či Bánkiho turbíně). (obr. 2-1 – případ (j))



Obrázek 2-1 - Rozdělení lopatkových strojů podle směru proudění k ose rotace [2]

2.2 Základní aplikace lopatkových strojů

LS mají velice rozsáhle pole působnosti a vyskytují se takřka ve všech odvětvích průmyslu. Mezi hlavní oblasti použití lze jednoznačně zařadit:

- Energetiku, kdy se LS vyskytují v tepelných elektrárnách a teplárnách ve formě turbín (parní, plynové, vodní). Dále to jsou cirkulační čerpadla a ventilátory.
- Lodní dopravu – zde jako pohon lodních šroubů, člunů s křídélky a vznášedel.
- Silniční dopravu – ve formě plynových turbín pro velké nákladní automobily, přeplňovacích turbodmychadel a kompresorů pro zvýšení výkonu spalovacího motoru.

- Letectví a kosmonautiku – při klimatizaci a pohonu letadel s turbovrtulovými či proudovými motory. U helikoptér jakožto nosná vrtule a její pohon, či u raketových motorů sestávajících se z turbín a čerpadel pro čerpání paliva a okysličovačla.
- Ostatní aplikace, jako je např. lékařství (magnetická rezonance); hydraulické spojky; hydrodynamické převodovky aj. [3]

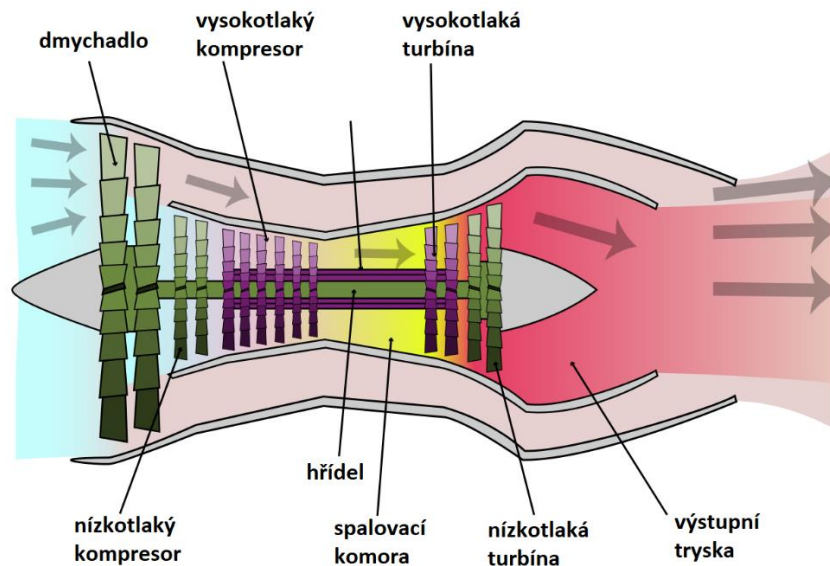
Právě v silniční a letecké dopravě je výskyt těchto strojů nejzdačnější, neboť v dnešní době jsou všechny novější automobily se vznětovým, a téměř všechny automobily se zážehovým motorem, opatřeny turbodmychadlem, zajišťující tzv. přeplňování neboli akt, který vede ke zvýšení celkového výkonu motoru bez nutnosti zásadní změny jeho konstrukce. V civilním letectví je zase každý motor (proudový, turbodmychadlový) letounu vybaven kompresory a turbínami, díky nimž je splněna jejich funkčnost.

2.3 Proudový motor

Jedná se o reakční motor, jehož princip je v podstatě velmi jednoduchý. Uplatňuje se zde Třetí Newtonův pohybový zákon, tj. zákon akce a reakce, kdy motor letounu působí na vycházející vzduch a spaliny silou, která je stejně velká, avšak opačného smyslu, než jakou působí tyto plyny na motor.

Okolní vzduch je tedy vstupním ústrojím nasáván do kompresoru, kde dojde k jeho stlačení, čímž dochází také k jeho zahřátí. Takto zahřátý putuje do spalovací komory. Ve spalovací komoře se ke vzduchu vstříkuje tryskami palivo (letecký petrolej či benzín). Následným zažehnutím směsi se uvolňuje obrovské množství tepelné energie, která při výstupu ze spalovací komory roztáčí turbínu umístěnou na jejím konci. Ta přes společnou hřídel zpětně pohání kompresor na přední straně motoru. Ve výstupní trysce umístěné za turbínou se vlivem vysokého tlaku mění tato tepelná energie na energii kinetickou, která zaručí tah motoru. [5]

V současné době se používají spíše dvouproudové motory, které jsou oproti proudovým obohaceny na vstupu o dmychadlo. Princip je však téměř stejný, viz obrázek 2-2.

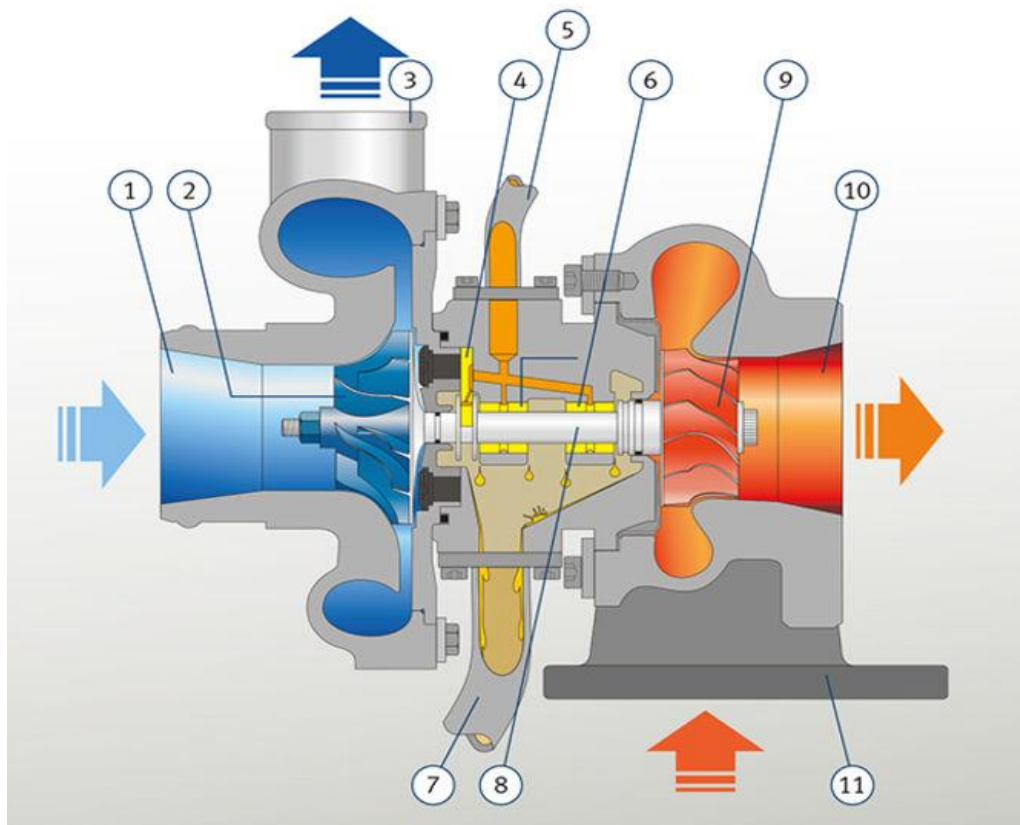


Obrázek 2-2 - Schéma dvouproudového motoru s celkovým obtokem a malým obtokovým poměrem [4]

2.4 Turbodmychadlo

Jak již bylo zmíněno výše, turbodmychadlo je agregát používaný k přeplňování u pístových spalovacích motorů. S tímto vynálezem přišel roku 1905 švýcarský inženýr Alfred Büchi, ovšem do světa automotive se dostal až v 50. letech minulého století. Zpočátku se jednalo o nepříliš efektivní stroj značných rozměrů, který dosahoval maximálně $30\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, avšak dnešní konstrukce turbodmychadla je poněkud sofistikovanější.

Turbodmychadlo se skládá ze statorové a rotorové části. Za rotorovou část je považována společná hřídel, na jejímž jednom konci je maticí připevněno kompresorové (oběžné) kolo, na druhém konci pak pevně spojeno kolo turbínové. Tato hřídel je uložena v ložiskové skříni, která společně s kompresorovou a turbínovou skříní tvoří statorovou část dmychadla. Uložení hřídele bývá nejčastěji realizováno fluidními či kuličkovými ložisky, která jsou stabilní a zejména při vysokých otáčkách dobře tlumí vibrace. Kvůli snížení tření jsou ložiska mazána motorovým olejem, který zároveň slouží i jako chladící kapalina. Aby nedocházelo k nežádoucímu úniku tohoto oleje do kompresorové a turbínové části, či naopak k profuku pracovních plynů do ložiskové skříně, je použito pístních kroužků, nebo labyrintového těsnění. [8] Schematicky je turbodmychadlo zobrazeno na obrázku 2-3.



Obrázek 2-3 - Řez turbodmychadlem [8]

legenda: 1 – vstup vzduchu; 2 – kompresorové (oběžné) kolo; 3 – výstup stlačeného vzduchu; 4 – axiální uložení hřídele; 5 – přívod motorového oleje; 6 – radiální uložení hřídele; 7 – odtok motorového oleje; 8 – hřídel turbodmychadla; 9 – turbínové kolo; 10 – výstup výfukových plynů z turbíny; 11 – vstup výfukových plynů na turbínu

2.4.1 Kompresorová část

Téměř každé turbodmychadlo v automobilovém průmyslu je opatřeno radiálním kompresorem. V některých případech se může vyskytovat také kompresor axiální, avšak své uplatnění našel spíše v leteckém průmyslu. Výhod použití radiálního kompresoru je hned několik – jednoduchá konstrukce, relativně nízké výrobní náklady, v porovnání s kompresory s axiálním průtokem generují vyšší tlakový poměr v jednom stupni, jsou spolehlivé a nenáročné na údržbu aj. Kompresorová část je tvořena třemi základními komponenty: kompresorové kolo, kompresorová (dmychadlová) skříň a difuzor. Proud pracovního média je nejprve nasáván lopatkovým kolem v axiálním směru. Vlivem vysokých otáček lopatek (v současnosti až $300\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$) mu je předána energie. Takto urychlený je odstředivou silou dopraven v radiálním směru do difuzoru. Difuzor jakožto kanálek s postupně se rozšiřujícím průřezem takřka beze ztrát zpomalí proud této tekutiny o vysoké rychlosti, tudíž podle rovnice

kontinuity začne zákonitě docházet k nárůstu jejího tlaku a teploty. Poté doputuje do voluty kompresorové skříně, kde dojde k dalšímu snížení kinetické energie a přeměně na energii tlakovou.

Limitující rychlostí nasávané látky kompresorem, při které dojde k tzv. aerodynamickému ucpání, je rychlost zvuku. K tomuto jevu dochází nejčastěji v kompresorovém sacím hrdle, hrdle kompresorového kola, či při vstupu do difuzoru a znamená to, že kompresor dosáhl svého průtočného maxima. [9], [10], [17]

Kompresní mapa

Pro přehledné znázornění výkonu turbodmychadla byla zhotovena kompresorová mapa (obr. 2-4). Jedná se o schéma, ve kterém je užito korigovaných proměnných (korigovaný hm. tok, kompresní poměr, korigované otáčky hřídele a adiabatická účinnost kompresoru).

Na horizontální ose je vyneseno korigovaný hmotnostní tok daný rovnicí (1).

$$\dot{m}_{c,corr} = \dot{m}_c \frac{\sqrt{\frac{T_{01}}{T_{c,std}}}}{\frac{p_{01}}{p_{c,std}}} \quad [kg * s^{-1}] \quad (1)$$

Kde \dot{m}_c je hmotnostní tok protékající kompresorem; T_{01} je teplota na vstupu do kompresoru; p_{01} je tlak na vstupu do kompresoru; teplota $T_{c,std}$ a tlak $p_{c,std}$ jsou referenční hodnoty, obvykle volené jako teplota a tlak okolí.

Na vertikální ose je pak vyneseno kompresní poměr, který je dán vztahem (2). Je to podíl absolutního výstupního tlaku ku absolutnímu vstupnímu tlaku neboli také jaké množství tlaku je kompresní stupeň schopný generovat při dané rychlosti, vzhledem k atmosférickému tlaku a vstupním podmínkám.

$$\Pi_C = \frac{p_{02}}{p_{01}} \quad [-] \quad (2)$$

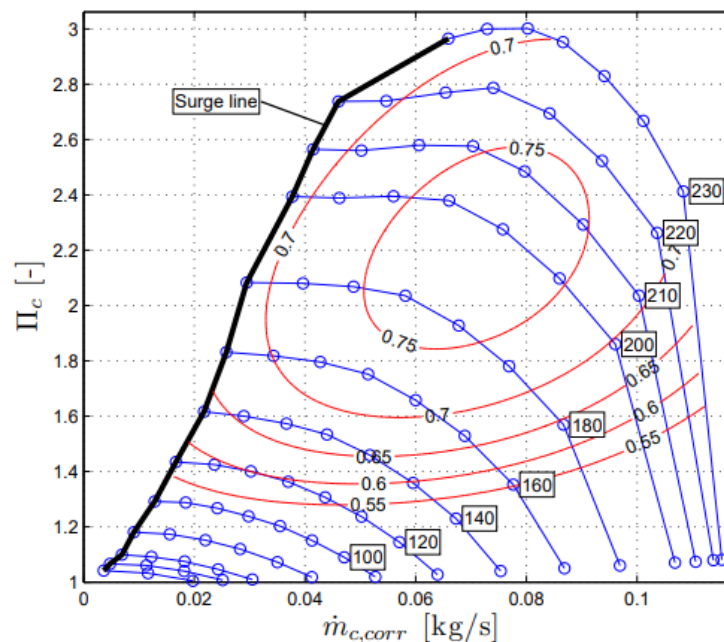
Kde p_{02} je tlak při výstupu z kompresoru. Pro korigovanou rychlost otáčení hřídele platí rovnice (3).

$$N_{c,corr} = N_{tc} \frac{1}{\sqrt{\frac{T_{01}}{T_{c,std}}}} \quad [ot * min^{-1}] \quad (3)$$

N_{tc} jsou skutečné otáčky hřídele (na obr. 2-4 modré křivky). Pro adiabatickou účinnost platí vztah následující (4).

$$\eta_c = \frac{\left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^{\frac{\gamma_c-1}{\gamma_c}} - 1}{\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1} [-] \quad (4)$$

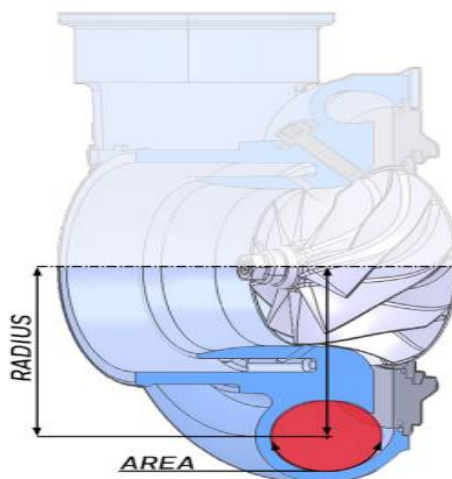
Kde γ_c je adiabatický mocnitél. Adiabatická účinnost popisuje, jak efektivní je stlačení plynu v porovnání s ideálním procesem. Jinými slovy, o kolik se zvýší tlak v porovnání s tím, o kolik se zvýší teplota. V kompresorové mapě na obr. 2-4 ji představují červené kružnice. Křivka ohraničující mapu z levé strany, se nazývá mez pumpování (surge line) a je hranicí stabilního chodu kompresoru. [19], [20]



Obrázek 2-4 - Kompresorová mapa [19]

2.4.2 Turbínová část

Hlavními komponenty turbínové části jsou turbínová skříň a turbínové kolo. Jejím úkolem je transformace kinetické energie výfukových plynů jdoucích z válce motoru na energii mechanickou, která pohání oběžné kolo kompresoru. Maximálního využití kinetické energie se docílí tangenciálním vstupem spalin na lopatky turbínového kola. Velmi důležitým parametrem pro správnost chodu turbodmychadla je tvar a velikost turbínové skříňe, která je určena parametrem A/R (obr. 2-5). Ten je definován jako poměr plochy průtočného průřezu voluty (A) ku vzdálenosti (R) mezi osou turbínového kola a touto plochou. [6], [7]



Obrázek 2-5 - Poměr A/R [6]

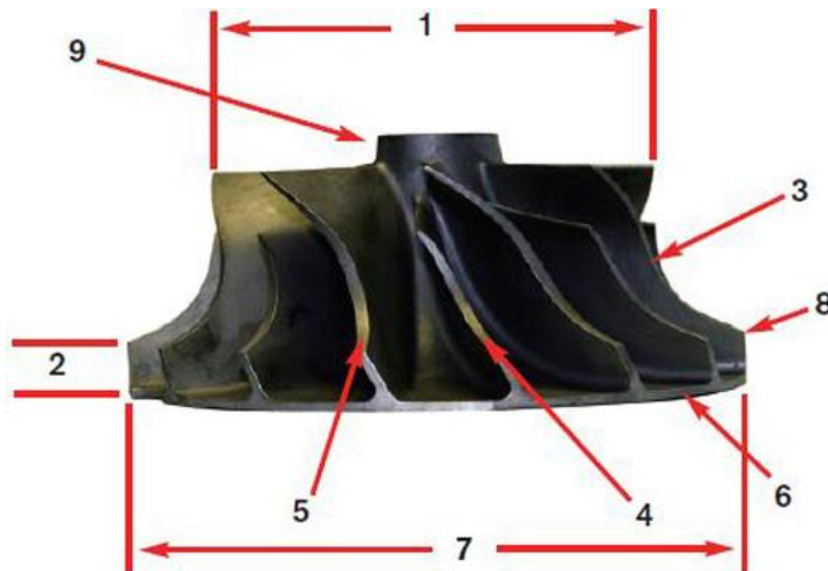
Jelikož je turbínová část dmychadla vystavována vysokým teplotám spalin generujících se ve spalovacím prostoru válce (u vznětových motorů asi 850 °C, u zážehových i více než 1 000 °C), musí proto být zhotovena z materiálů, které jsou schopny těmto teplotám odolat. Z toho důvodu jsou nejčastěji turbínové skříňe odlitkem z tvárné legované litiny, či žáruvzdorných slitin. [6], [9]

3 Lopatková kola

Nejdůležitějšími komponenty v jakémkoliv radiálním kompresoru, bez ohledu na jeho typ, jsou lopatková kola. Pokud lopatková kola nejsou schopna zajistit vysokou účinnost a celkově dobrý průtok pracovní tekutiny, je pro kompresor nemožné tyto parametry získat.

Lopatková kola jsou jedinou rotační aerodynamickou komponentou v radiálním kompresoru. Poskytují 100% kinetické energie, která je předána pracovnímu médiu a mohou být odpovědní za zvýšení statického tlaku až o 70 % ve fázi. Dále jsou lopatková kola také vůbec neúčinnější součástí lopatkových strojů. Dobře navržené lopatkové kolo může dosahovat účinnosti i více než 96 %, což znamená, že pouze asi 4% vynaložené energie je ztraceno. Ztráty ve stacionárním hardwaru snižují celkovou účinnost ve fázi od základní účinnosti stanovené lopatkovým kolem. Proto platí následující-pokud je výkon lopatkového kola nízký, může být celkový výkon kompresoru pouze nižší. [11]

Geometrii polootevřeného lopatkového kola lze vidět na obr. 3-1.



Obrázek 3-1 – Geometrie polootevřeného lopatkového kola [23]

legenda: 1 – průměr kola u náběžných hran; 2 – výška odtokové hrany; 3 – kontura kola; 4 – dělicí lopatka; 5 – hlavní lopatka; 6 – zadní stěna; 7 – průměr kola, či průměr exduceru; 8 – exducer; 9 – nos

3.1 Konstrukce lopatkových kol

Konstrukce oběžného kola je nejvýznamnějším faktorem určující výkon turbokompresoru. Podle typů lopatek existují kola s dopředně zakřivenými lopatkami, kola s lopatkami přímými radiálními, či kola s lopatkami dozadu zakřivenými. Ačkoli dokážou první dva jmenované typy docílit vysokého stlačení, tak se z důvodů nízké účinnosti v dnešní době téměř nepoužívají. To je způsobeno neschopností zpracovat vyšší průtoky pracovního média a operování v úzkém rozmezí otáček. Proto jsou v současnosti nejpoužívanějším typem kola s lopatkami dozadu zakřivenými, proti směru otáčení. Ty zajišťují částečné stlačení média již při průchodu kolem, a tím dochází k navýšení účinnosti. Navíc jsou poměrně často opatřeny lopatkami dělicími, které se umísťují vždy mezi dvě lopatky plné. To má za následek efektivnější zpracování průtoku, obzvláště při vysokých otáčkách. Dále se konstrukční řešení dělí na kola otevřená, polootevřená a uzavřená.

Otevřené kompresorové kolo

Jak již název napovídá, tento typ kola má z obou stran lopatky otevřené (obr. 3-2), což zapříčiňuje jejich strukturální slabost. Z tohoto důvodu nachází své využití u levnějších kompresorů o menším průměru a čerpadel pracujících s usazeninami. Navíc díky otevřené konstrukci dochází ke směšování přivedené tekutiny s tekutinou již v kompresorové skříni, což vede k rapidnímu snižování celkové účinnosti kompresoru.



Obrázek 3-2 - Otevřené kompresorové kolo [14]

Polootevřené kompresorové kolo

U tohoto typu kola jsou lopatky z jedné strany otevřené. Disk z druhé strany zvyšuje pevnost kola. Dále také toto kolo díky plášti poskytuje vyšší účinnost, než jak je tomu u kola otevřeného (obr. 3-3). Uplatňují se u kompresorů o středně velkých průměrech, které pracují s tekutinami obsahující jen malé množství sedimentů.



Obrázek 3-3 - Polootevřené kompresorové kolo [15]

Uzavřené kompresorové kolo

Lopatky tohoto kola jsou umístěny mezi dva disky (obr. 3-4). Tyto disky zabraňují proudění tekutiny přes lopatky dále do kompresoru a zaručují tak nejlepší účinnost. Nevýhodou oproti dvěma předešlým typům je fakt, že není schopné dosáhnout tak vysoké komprese. [18]

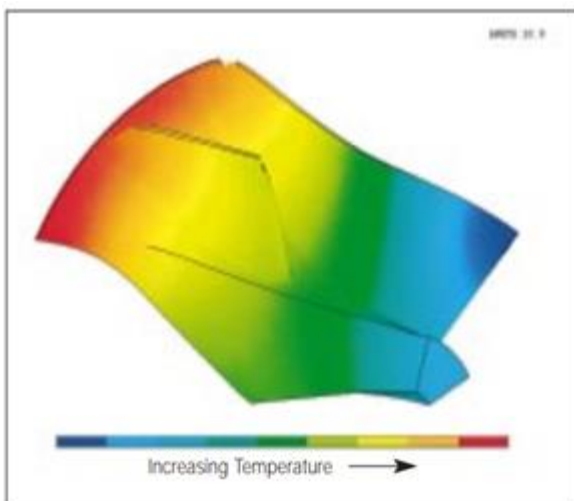


Obrázek 3-4 - Uzavřené kompresorové kolo [16]

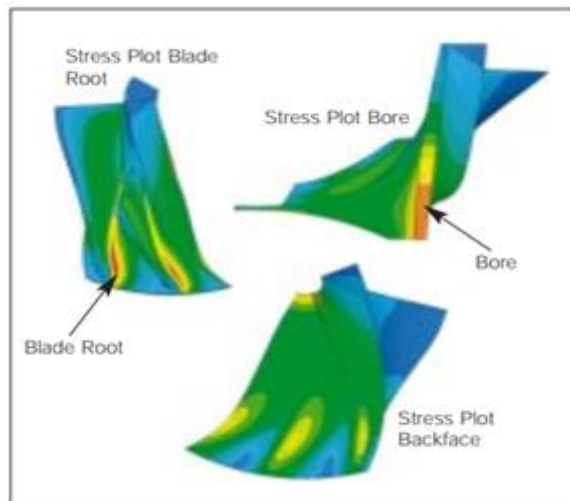
3.2 Materiály lopatkových kol

Výběr materiálu lopatkových kol je ovlivněn mnoha faktory. Klíčovými faktory jsou pracovní teplota a požadavky na životnost. Když dojde ke stlačení vzduchu, zákonitě dojde ke zvýšení jeho teploty. Výsledná teplota stlačeného vzduchu je také ovlivněna účinností oběžného kola. Na obrázku 3-5 je znázorněn průběh teploty oběžného kola, rostoucí od středu kola směrem k jeho vnějšímu průměru. V oběžném kole jsou napětí generována v důsledku hmotnostních sil, mezi které lze zařadit např. odstředivé síly, úměrné hmotnosti kola a čtverci rychlosti otáčení. Z tohoto důvodu je zejména v letectví kladen důraz na volbu materiálů s malou měrnou hmotností. Nejvyššího napětí je dosahováno v otvoru, kde je kolo umístěno na hřídel, a také v kořeni každé lopatky, jak je znázorněno na obrázku 3-6. [21]

Výběr správného materiálu je také ovlivněn typem a stavem pracovní látky, neboť ku příkladu u hydraulických strojů může vlivem špatně zvoleného materiálu docházet ke kavitaci a následné nežádoucí kavitační erozi a korozi. Neméně důležité je i technologické hledisko, zabývající se obrobiteľností, slévateľností, či svařitelností daného materiálu. V neposlední řadě hraje důležitou roli také ekonomický aspekt. Volba vhodného materiálu pro lopatková kola je tedy realizována dle materiálových listů konkrétních výrobců a požadavků z katalogů. [2]



Obrázek 3-5 - Průběh teploty v radiálním oběžném kole [21]



Obrázek 3-6 - Napětí generováno vlivem odstředivého namáhání, znázorňující koncentrátoři napětí v kořeni lopatky a otvoru pro hřídel [21]

3.2.1 Turbínová kola

Jelikož jsou turbínová kola oproti kolům kompresorovým vystavována značně vyšším pracovním teplotám, je zapotřebí volit takové materiály, které jsou těmto teplotám odolné. Především se jedná o speciální vysokoteplotní slitiny na bázi niklu a chromu, obchodně známé jako slitiny Inconel. Dále se používají žárupevné oceli, a také již zmíněné slitiny titanu.

Inconel 718

Tato precipitačně vytvrzovaná slitina na bázi niklu, se využívá pro širokou škálu vysokoteplotních aplikací, jako jsou plynové turbíny, letecké motory, rotory turbodmychadel, jaderné reaktory atd. Obsahuje velké množství legujících prvků, díky nimž se vyznačuje výbornou únavovou pevností a odolností proti tečení při teplotách dosahujících 700°C. Chemické složení této slitiny je uvedeno v tabulce 3-1. [26]

Tabulka 3-1 Chemické složení slitiny Inconel 718 [25]

	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Co	Al	Mn	Si	Cu	ostatní
Minimum [%]	50	17	11,1	1,8	2,8	0,65	0	0,2	0	0	0	0
Maximum [%]	55	21	24,6	5,5	3,3	1,2	1	0,8	0,35	0,35	0,3	0,12

Mechanické vlastnosti:

Mez pevnosti R_m 930÷1530 MPa; tvrdost dle Brinella 363.

Inconel 713C

Jedná se o obdobu slitiny inconel 718, avšak její vlastnosti excelují až do teplot 980°C. Chemické složení je uvedeno v tabulce 3-2. Existuje také modifikace této slitiny označována jako Inconel 713LC (low carbon) se sníženým obsahem uhlíku.

Tabulka 3-2 Chemické složení slitiny Inconel 713C

	Cr	Mo	Nb+Ta	Al	Ti	C	B	Zr	Si
Minimum [%]	12	3,8	1,8	5,5	0,5	0,08	0,005	0,05	0
Maximum [%]	14	5,2	2,8	6,5	1	0,2	0,015	0,15	0,5

Mechanické vlastnosti:

Mez pevnosti Rm 745 MPa; tažnost A \geq 3,5 %; tvrdost dle Brinella 350. [9]

Slitina γ -TiAl

Jde o slitinu z intermetalické fáze s mnoha přednostmi, mezi které patří nízká měrná hmotnost, vysoká pevnost, tuhost, vysokoteplotní a oxidační odolnost. Ty z ní dělají kandidáta při volbě materiálu pro náročné aplikace, kde jsou vyžadované dobré jak mechanické, tak i tepelné vlastnosti. Její obrobiteľnosť je ovšem veľmi náročná, doprovázená nízkou životností obráběcích nástrojů a často zhoršenou kvalitou povrchu.

Tabulka 3-3 Chemické složení slitiny γ -TiAl [27]

	Ti	Al	Ni	Cr	O	N	C	Fe	H	ostatní
Minimum [%]	-	32	4,5	2,2	-	-	-	-	-	-
Maximum [%]	60	33,5	5,1	2,6	0,08	0,02	0,015	0,04	0,001	0,05

Žárupevná ocel X30WCrV9-3

Tabulka 3-4 Chemické složení oceli X30WCrV9-3

	C	Mn	Si	Cr	W	V	P	S
Minimum [%]	0,25	0,25	0,15	2,25	8	0,3	-	-
Maximum [%]	0,35	0,4	0,3	2,8	9	0,4	0,035	0,035

Mechanické vlastnosti:

Mez pevnosti Rm 1600 MPa; tvrdost dle Brinella 240. [9]

3.2.2 Kompresorová kola

Nejhojněji používaným materiálem pro výrobu oběžných kol v kompresorové části turbodmychadla jsou Al slitiny, a to hned z několika důvodů. Jelikož se v kompresorové části pracovní medium takřka nezahřívá a má teplotu okolí, jsou hliníkové slitiny s obecně nižší teplotou tání a pevností za tepla oproti železným kovům pro tuto aplikaci postačující. Navíc tyto slitiny mají velmi dobrý poměr mezi pevností v tahu a měrnou hmotností a také dobré lící vlastnosti, které se uplatní zejména u menších rozměrů kol, kdy je nejčastější metodou pro jejich výrobu tlakové lití a lití na vytavitelný model. [12]

Slitina AC-45300 (dle ČSN 42 4380 AlSi5Cu1Mg)

Tabulka 3-5 Chemické složení slitiny C335.0 [13]

	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Zn	Sn	ostatní
Minimum [%]	4,5	1,0	0,35	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum [%]	5,5	1,5	0,65	0,65	0,55	0,25	0,25	0,15	0,15	0,05	0,15

Mechanické vlastnosti [9], [25]:

Mez pevnosti Rm 270 MPa; Tažnost A \geq 0,5%; Tvrdost dle Brinella 94 ÷ 120.

Slitina 2618 (dle UNS A92618)

Tabulka 3-6 Chemické složení slitiny 2618 [22]

	Si	Cu	Mg	Fe	Ni	Ti	Zn	ostatní
Minimum [%]	0,1	1,9	1,3	0,9	0,9	0,04	0	0
Maximum [%]	0,25	2,7	1,8	1,3	1,2	0,1	0,1	0,15

Mechanické vlastnosti:

Mez pevnosti Rm 420 MPa; Tažnost A $\geq 0,5$ %; Tvrdost dle Brinella 120.

I když je drtivá většina kompresorových kol turbodmychadel osobních automobilů vyrobena z hliníkových slitin, přibývá čím dál více aplikací, ve kterých jsou vlastnosti těchto slitin nedostačující. Například v náročných motoristických sportech, jako jsou např. závody traktorů (tractor pulling), může vlivem extrémně vysoké zátěže motoru dojít k jejich roztržení. Proto se v poslední době dostávají čím dál více do popředí kola z titanových slitin vyrobena víceosým frézováním. [23]

Slitina Ti-6Al-4V (dle UNS R56400)

Jedná se o nejpoužívanější slitinu titanu, obsahující fáze α i β . Přítomnost hliníku ve struktuře má za následek stabilizaci α fáze, přítomnost vanadu pak stabilizuje fázi β . Hlavními rysy této slitiny jsou vysoká pevnost, dobrá korozní odolnost a nízká měrná hmotnost. Proto byla původně vyvinuta pro aplikace v oblasti letectví. Používá se i na výrobu turbínových kol.

Tabulka 3-7 Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V [24]

	Al	V	Fe	O	C	Ni	H	ostatní
Minimum [%]	5,5	3,5	0	0	0	0	0	0
Maximum [%]	6,8	4,5	0,4	0,25	0,1	0,05	0,015	0,4

Mechanické vlastnosti:

Mez pevnosti Rm 1000 MPa; Tažnost A 5÷18 %; Tvrdost dle Brinella 310.

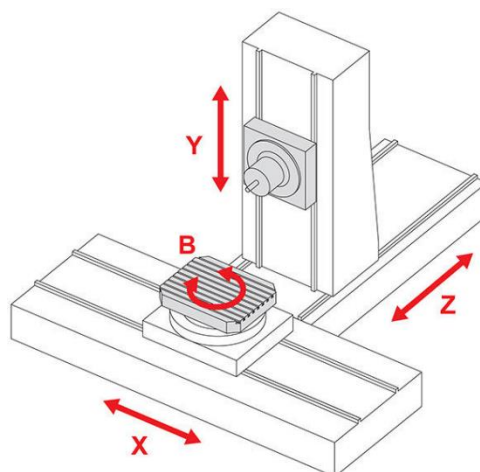
4 Víceosé obrábění

O víceosém obrábění hovoříme tehdy, když je k základním třem lineárním, navzájem kolmým osám pohybu X, Y, Z přidána alespoň jedna další rotační osa. V takovém případě, kdy jsou k dispozici čtyři pracovní osy, jedná se o 4D obrábění. Dnešní číslicově řízená neboli CNC (Computer Numerical Control) obráběcí centra, však disponují zpravidla pěti i více osami. Ortogonální souřadnice jsou tedy obohaceny o úhlové osy, obvykle značené A, B, resp. C. CNC obráběcí centra se vyznačují možností souvislého řízení jednotlivých os, možnost provádění různých technologických operací, práce v automatickém cyklu, automatická výměna nástrojů. Při dodržení určitých podmínek mohou být tyto stroje autonomní, tedy na obsluze nezávislé.

4.1 Čtyřosé frézování

Ačkoli se čtyřosé (nebo také 3+1D, obr. 4-1) frézování uplatňuje v menší míře, vyskytující se ve speciálních aplikacích, je bezesporu zajímavou dílčí částí ve světě CNC frézování. Zcela obvykle se používá ve dvou režimech. Prvním je režim indexování, druhým pak režim plynulý. Indexované obrábění znamená, že je rotační osa zastavena a zablokována v určitém úhlu naklonění. Následně se polotovar obrábí již standardní tříosou metodou v pootočeném souřadném systému. Z důvodu pootáčení obrobku je indexování obecně považováno za méně efektivní způsob výroby oproti plynulé variantě. Nicméně nabízí i jednu důležitou vlastnost. Zablokováním rotační osy se zvyšuje tuhost soustavy, zejména při hrubovacích operacích, kdy dochází k velkému úběru materiálu. Při plynulém módu frézování dochází k úběru materiálu z obrobku během rotace. Nejpoužívanější variantou uspořádání čtyřosých obráběcích center je horizontální typ.

Kvůli složité geometrii lopatkových kol, kdy se často jednotlivé lopatky navzájem překrývají, hrozí snadný vznik kolizí nástroje s překrývajícími se lopatkami. Proto se čtyřosé frézování používá jen pro výrobu kol s jednodušší geometrií. Typickou aplikací této metody je však výroba ozubení. Pro obrábění lopatkových kol se složitější geometrií, se dostává do popředí čím dál více frézování pětiosé. [29], [32]

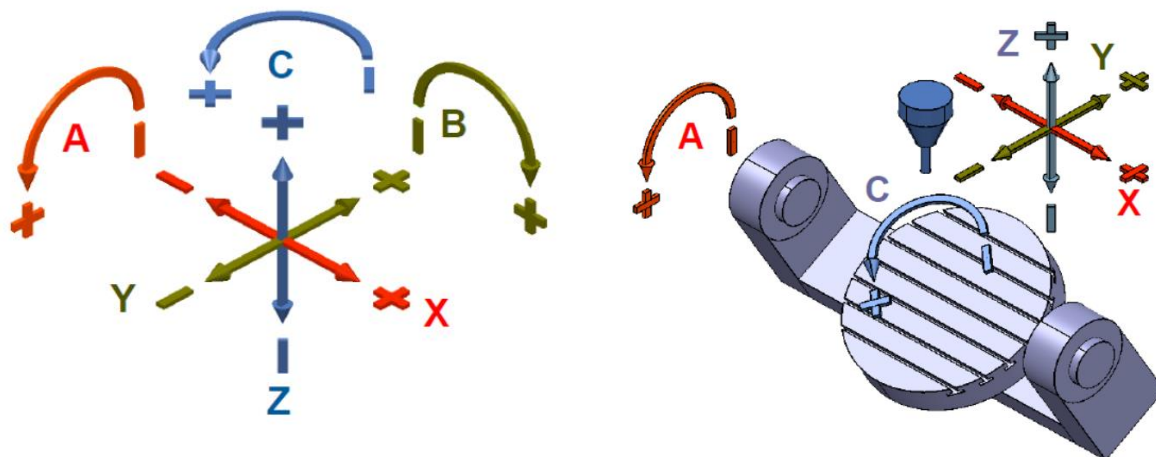


Obrázek 4-1 – Možné uspořádání os při čtyřosém frézování [31]

4.2 Pětiosé frézování

Nejrozšířeněji používanou technologií třískového obrábění, je zcela nepochybně technologie frézování. Jedná se o proces, kdy je úběru materiálu z obrobku dosahováno vícebřitým nástrojem–frézou, konající hlavní řezný pohyb. Tento pohyb je rotační. Obrobek upnutý na pracovním stole stroje-frézky, pak koná pohyb vedlejší posuvný neboli zkráceně posuv. Při klasickém 3D frézování je obvykle směr pohybu obrobku kolmý k ose nástroje. U Pětiosého frézování (často skloňováno také jako obrábění volných tvarových ploch-free form surfaces) však toto mnohdy neplatí.

Přítomnost rotačních os znamená, že nástroj, resp. obrobek mají o dva stupně volnosti více, díky čemuž je možné jejich libovolné naklápění. Osa nástroje se plynule mění a dochází k souvislému obrábění. 5D frézování je progresivní technologií, realizovanou na frézovacích obráběcích centrech. Pětiosé, číslicově řízená frézovací centra, jsou široce používána k výrobě tvarově složitých součástí, jako jsou letecké díly, nástroje, speciální formy a bez pochyb také oběžná kola, představující vůbec ty nejnáročnější obrobitelné komponenty. Tyto součásti mají obvykle složitou geometrii a jsou tvořeny parametrickými, či volnými tvary povrchů. Oběžné kolo svojí tvarovou složitostí skvěle demonstruje výrobní schopnosti 5D frézování, neboť povrch modelu oběžného kola je velice zakřivený a jednotlivé lopatky se navzájem překrývají. To může mnohdy vést ke snadné kolizi nástroje. Na obrázku 4-2 vlevo jsou znázorněny možnosti řízení os v ortogonálním systému, přičemž kladný smysl otáčení rotačních pohybů se shoduje se směrem a smyslem posuvu pravotočivých šroubovic v kladných osách X, Y, Z. Vpravo pak schéma možného provedení pětiosé frézky. [27]



Obrázek 4-2 - Označení os víceosého obrábění a příklad konstrukce pětiosé frézky [27]

4.2.1 Uspořádání pětiosých center

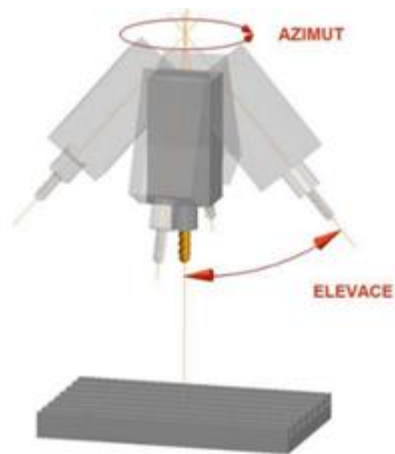
Ze všech rotačních os, které mají frézovací centra k dispozici, jsou při pětiosém frézování aktivní vždy dvě z nich. Podle toho, jaká konfigurace os je aktivní, je kinematika těchto center rozčleněna do tří konstrukčních kategorizací.

Konfigurace hlava-hlava

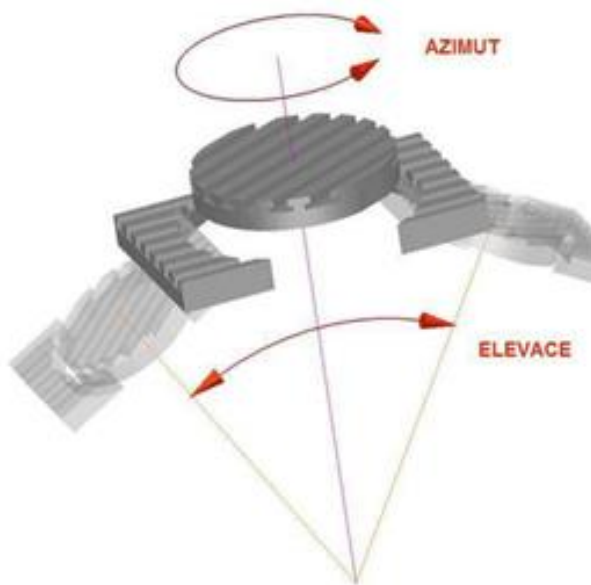
Obě rotační osy jsou v tomto případě aktivní ve vřetenu hlavy stroje (nástrojový systém), viz obrázek 4-3. Znamená to, že pracovní stůl s obráběnou součástkou je zafixovaný v jedné poloze během celého procesu frézování a naklápí se pouze nástrojová hlava, což vede k delším pojezdům os, a proto je toto řešení nejlepší při výrobě dílů větších rozměrů. Zásadní nevýhodou je však menší tuhost nástrojové hlavy oproti následujícím variantám, plynoucí právě z jejího pohybu. To se v konečném důsledku nepříznivě projeví na přesnosti obrobene plochy.

Konfigurace stůl-stůl

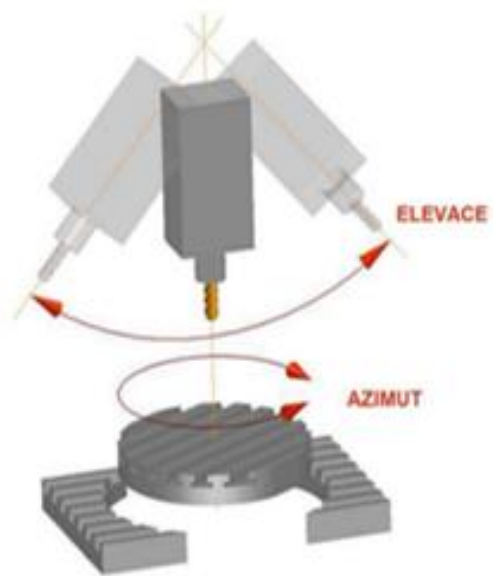
Zde jsou obě osy umístěné v pracovním stole, jak je možné vidět na obrázku 4-4. Stejně jako u konfigurace hlava-stůl, má i zde osa elevace omezený rozsah. Ta může být umístěna buď vertikálně, nebo je také možné umístění pod úhlem, který bývá obvykle 45°. Rotační osa svůj rozsah omezený nemá. Přínosem této koncepce je nejvyšší tuhost ze všech tří zmíněných variant a také fakt, že díky pohybu vřetene v ose Z, který se pohybuje vždy pouze ve vertikálním směru, je snadné odjetí nástroje od obrobku v jakékoliv fázi obrábění.



Obrázek 4-3 - Konfigurace hlava-hlava [30]



Obrázek 4-4 - Konfigurace stůl-stůl [30]

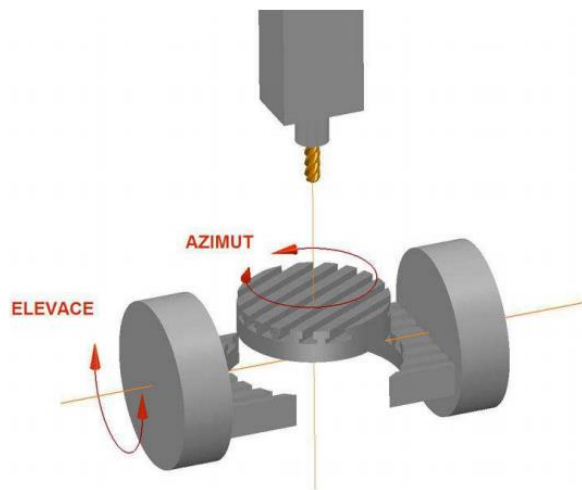


Obrázek 4-5 - Konfigurace hlava-stůl [30]

Konfigurace hlava-stůl

Osa naklápění (osa elevace), je v této konfiguraci stroje umístěna v nástrojové hlavě (obr. 4-5), mající omezený rozsah. Druhá osa, osa rotace (osa azimutu), je poté umístěna v pracovním stole a její rozsah není omezen. Je zde dosahováno větší tuhosti oproti předešlé variantě díky rozdělení pohybů mezi tyto dva systémy.

Často používanou modifikací konfigurace stůl-stůl, je konfigurace **stůl-stůl (kolébka)**. Jedná se o takřka identické provedení, až na ten rozdíl, že v tomto případě je naklápění pracovního stolu obráběcího stroje realizováno otáčením okolo rotační osy A, viz obrázek 4-6.



Obrázek 4-6 - Konfigurace stůl-stůl (kolébka) [30]

Této koncepcce se ujal například přední tuzemský výrobce obráběcích strojů Kovosvit MAS. Neboli společnosti Mazak, Hermle a Quasar.

Obdobně jako u čtyřosého frézování, i zde bývají k dispozici dva pracovní režimy: plynulé pětiosé frézování, či poziční 3+2D frézování (indexování). Výběr režimu se odvíjí zejména od konstrukční složitosti dané součástky, možnosti stroje aj. [28], [29], [30]

4.2.2 Hlavní přínosy pětiosého frézování

Pětiosé frézování na nejmodernějších frézovacích centrech přináší bezesporu řadu výhod. Jedná se především o:

- Redukci strojního času, jelikož se jedná o komplexní obrábění součástky prováděné často během jednoho upnutí.
- Zvyšuje se přesnost výroby vlivem eliminace potenciálních chyb při nastavování stroje.
- Díky plynulému naklápění nástrojů, udržujících optimální kontaktní bod s obráběnou plochou, je docíleno vysoce kvalitního povrchu.
- Snadný přístup nástroje k negativním stěnám a dutinám, což má za následek volbu nástrojů s kratším vyložení z nástrojové hlavy, tím pádem eliminace vzniku nežádoucích vibrací.
- Obrábění modelů, které by jinak musely být odlévané. To je velkým přínosem např. při výrobě prototypů a výrobků v malé sérii. [27]

4.2.3 Řezné síly při pětiosém frézování

Řezné síly jsou závislé na okamžité tloušťce odřezávané vrstvy. Proto je pro predikci řezných sil při pětiosém frézování zcela zásadní přesnost výpočtu tloušťky třísky, jelikož fréza často mění ve své dráze pohybu úhel náklonu vůči obráběnému povrchu. Znalostí tohoto úhlu je možné predikovat zatížení nástroje. Z toho plyne, že lze řídit maximální dovolené namáhání nástroje při řezném procesu, kdy nedojde k jeho přetížení.

Snahou pětiosého frézování je udržet v každém bodě dotyku stálý úhel náklonu. Při konstantním náklonu jsou rovněž hodnoty řezných podmínek víceméně konstantní. Tím je docíleno lepší jakosti a přesnosti obrobeného povrchu. Jde však o poměrně idealizovaný stav, kterého není možné vlivem nerovnoměrných přídavek na obrábění, vibrací a jiných průvodních jevů třískového obrábění docílit.

Pokud je úhel náklonu nulový, tedy kdy osa nástroje je kolmá na povrch obráběné součásti, je u kulových fréz v jejich ose nulová obvodová rychlost. To je ovšem nežádoucí stav, jelikož nulová obvodová rychlost má neblahý dopad na velikost axiálních řezných sil, pěchování třísky, zvyšující se chvění, tvorbu nárůstku, či rostoucí teplotu řezání. Těmito jevy se výrazně snižuje trvanlivost nástroje a zhoršuje kvalitu obrobeného povrchu.

Díky náklonu tedy dojde ke zvětšení efektivního průměru frézy a tím pádem i efektivní řezné rychlosti (obr. 4-7). Velký vliv na efektivní průměr frézy má i směr posuvu nástroje. Kolmý náklon na směr posuvu má za následek útlum samobuzených kmitů.

Náklonem vícebřitého nástroje se tedy zvýší hodnota řezné rychlosti, zlepší se utváření třísky, kvalita obrobené plochy a prodlouží se životnost nástroje. Hodnota náklonu se dle různých zdrojů liší, např. dle [37] je doporučený náklon v rozmezí $10\div 15^\circ$.

Obecně lze říci, že tlačný nástroj vykazuje horší kvalitu povrchu. Proto se spíše používá tažený posuv nástroje, vykazující mimo jiné i tišší chod.

Formule pro výpočet efektivního průměru frézy pro tažný (5), resp. tlačný (6) posuv, jsou uvedeny na následující stránce.

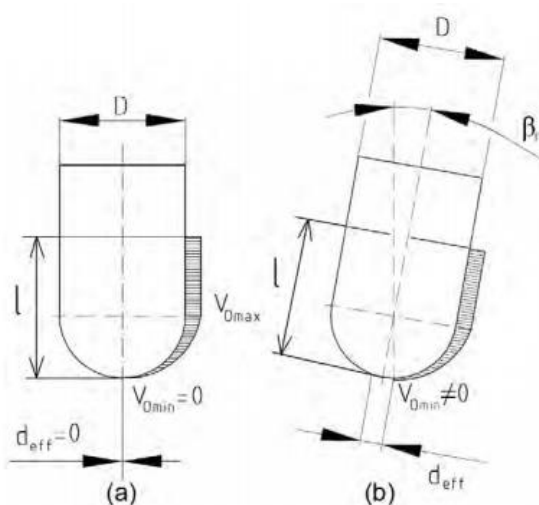
Tažený posuv:

$$d_{eff} = d * \sin \left[\cos^{-1} \left(\frac{d-2a_p}{d} \right) + \beta_f \right] \text{ [mm]} \quad (5)$$

Tlačený posuv:

$$d_{eff} = d * \sin \left[\cos^{-1} \left(\frac{d-2a_p}{d} \right) - \beta_f \right] \text{ [mm]} \quad (6)$$

Kde: β_f je náklon nástroje [°]; a_p je hloubka řezu [mm]; d je průměr frézy [mm]. [33], [34], [35], [36], [37]



Obrázek 4-7 - Znázornění obvodové rychlosti a efektivního průměru nástroje u (a) nevykloněného; (b) vykloněného nástroje [34]

4.3 Strategie frézování

Při výrobě konkrétní součásti na frézovacích centrech se postupuje systematicky. Nejprve se uplatňují hrubovací operace, posléze operace dokončovací, popř. může být použito jakéhosi mezistupně mezi těmito dvěma operacemi, zahrnující operace polohrubování, polodokončování, aj.

Pro tyto operace bylo vyvinuto mnoho strategií obrábění za účelem zvýšení produktivity obrábění. Správně zvolené frézovací strategie mají značný vliv nejen na technologický proces, ale samozřejmě také na konečný výrobek. Velmi ovlivňují například vibrace nástroje, a s nimi spojenou jakost obrobeného povrchu, vnitřní strukturu materiálu obráběného dílce, řezné podmínky, řeznou sílu, čas výroby, a s ním úzce spojené nemalé sazby CNC strojů atd. Jsou ale také ovlivňovány mnoha faktory-volbou (materiálu) nástrojů,

materiálem obrobku, charakteristikou stroje, aj. V současnosti nejběžněji používané strategie v CAM (Computer-Aided Manufacturing – Počítačová podpora obrábění) systémech jsou popsány v následujících řádcích.

4.3.1 Strategie HSC

Ačkoli je tato metoda obrábění známá již od první poloviny minulého století, kdy byla chápána jako samostatný proces, je její začlenění přímo do CAM systémů díky pokrokovému vývoji řídicí a výpočetní techniky otázkou spíše posledních pár let. Podstatou vysokorychlostního obrábění (High Speed Machining), také známo jako vysokorychlostní řezání (HSC – High Speed Cutting), je obrábění za zvýšených, až velmi vysokých rezných rychlostí, ve srovnání s běžnými konvenčními metodami. Dle [38] se rezná rychlost při obrábění ocelí pohybuje v rozmezí 800 až 1100 m*min⁻¹. Při obrábění hliníkových slitin jsou hodnoty rezné rychlosti výrazně vyšší, pohybující se v intervalu 3000 až 6000 m*min⁻¹. Principem této strategie je rychlý nárůst teploty v lokálním místě řezu, která zapříčiní změknutí až částečné tavení třísky, snížení součinitele tření a tím pádem pokles rezné síly. Vysokorychlostní frézování zvyšuje objem odebíraného materiálu při hrubovacích operacích a při jeho aplikaci se dosahuje vyšší kvality obrobeneho povrchu. Další výhodou je snížení vzniku vibrací a tepelného namáhání nástroje vlivem odvodu tepla třískou. Tloušťka odebírané vrstvy je zpravidla maximálně 0,2 mm. Při vyšším úběru materiálu hrozí destrukce nástroje vlivem vysokých odstředivých a rezných sil. Za nejběžněji používané materiály nástrojů pro obrábění hliníkových slitin jsou považovány polykrystalické diamanty. Při obrábění ocelí jsou to slinuté karbidy a cermety. Tato strategie se mimo frézování také často vyskytuje při dokončovací operaci superfinišování. [37], [38], [39]

4.3.2 Strategie HFC

Frézování vysokým posuvem (HFC-High Feed Cutting či High Feed Machining,) je druhou progresivní metodou obrábění, mající ekonomický přínos. Umožňuje produktivnější obrábění, jelikož je dosahováno až třikrát rychlejšího úběru materiálu než u klasického frézování bez velkých nároků na kvalitu obrobeneho plochy. Proto se používá převážně při hrubování. Charakteristickým znakem této metody je vysoký posuv na zub, který může být až 3 mm. Hloubka řezu pak bývá udávána do 2 mm. To garantuje zkrácení strojních časů. Hlavním přínosem strategie frézování s vysokým posuvem je působení rezných sil do axiálního směru, které vedou k menšímu odtlačení nástroje a tím dochází k částečné eliminaci vzniku

nežádoucích vibrací. V důsledku toho je dosažena vyšší životnosti řezných nástrojů, zvýšení stability a efektivity řezného procesu, a především snížení výrobního času (některé zdroje uvádějí snížení výrobního času až o 60 % oproti konvenčním metodám). Je však zapotřebí vysoce výkonný řídicí systém stroje, který dokáže pohotově zpracovat NC program pro zachování plynulosti řezu. Nástroje jsou opatřeny vnitřním chlazením a vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD), vyhotoveny rovněž z kvalitních slinutých karbidů, jako je tomu u metody HSM. [40], [41]

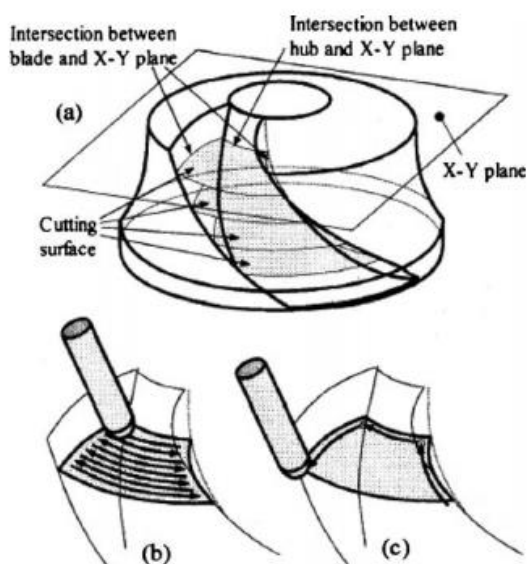
4.3.3 Strategie HPC

Vysokovýkonné obrábění (High Productive Cutting, či také HEM-High Efficiency Milling, nebo HPM-High Productive Milling) spočívá v úběru velkého úběru třísky. Své uplatnění nachází tedy u hrubovacích operací, či zpracování těžkoobrobitelných materiálů. Tato metoda vychází ze strategie HSC a stejně jako u ní, i zde se jedná o metodu suchého obrábění, jelikož náklady na procesní kapaliny činí okolo 16 % celkových výrobních nákladů. Z důvodu kratší doby kontaktu nástroje s obrobkem, se zde snižuje mechanické a tepelné namáhání nástroje. Tím je umožněno nasazení vysokých posuvových a řezných rychlostí, vyšších hodnot přísuvu a hloubky řezu. Navíc řeznými nástroji jsou zpravidla frézovací hlavy, opatřeny vyměnitelnými břitovými destičkami, stopkové frézy a vrtáky. [40], [41]

4.4 Hrubování lopatkových kol

Hrubování lopatkových kol je považováno za nejdůležitější proces ovlivňující efektivitu obrábění, a je rozhodujícím faktorem pro následné dokončovací operace. Cílem hrubování je odebrání maximálního možného množství materiálu za co nejkratší dobu. Zdroj [43] uvádí, že je přibližně 70 % celkového odebraného materiálu obrobku zajištěno právě hrubováním. Výzkum inovativních metod pro co možná nejefektivnější obrobení je extrémně nákladné, avšak existuje několik studií, zabývajících se právě touto problematikou. Například Morishige [42] ve své vědecké práci poukázal na fakt, že bezkolizní hrubování je generováno na základě kvalitního CAD (Computer Aided Design) geometrického modelu spolu s navrhovanou strategií obrábění. Využil dvourozměrného konfiguračního prostoru definovaného dvěma parametry pro získání vztahu mezi všemi polohami nástroje a existencí možného vzniku kolizí. Díky tomu je získána optimální poloha nástroje v kterémkoliv místě na obráběném povrchu. Prostor mezi lopatkami je obráběn kulovou frézou po jednotlivých vrstvách, obr. 4-8 (a), a to pod úhlem.

Každá plocha v dané hladině je nejprve obrobena rastrem a poté jsou ekvidistantně obrobena hranice vytyčené plochy mezi nábojem kola a jednotlivými lopatkami. Viz obr. 4-8 (b), resp. (c). Tato strategie se zdá být výhodná pro obrábění kol s rovinnými či mírně zakřivenými lopatkami, avšak při aplikaci na kola s lopatkami výrazně zakřivenými a vzájemně se překrývajícími není vyloučeno vzniku kolizí mezi nástrojem a obrobkem.



Obrázek 4-8 - Hrubovací strategie mezilopatkového prostoru dle Morishigeho [42]

S.H. Chuang a C.C. Pan představili metodu robustního hrubého frézování B-spline povrchů. Nejdříve se zkonstruuje několik B-spline povrchů. Poté je každý z nich přetransformován na Bézierovi plochy. Všechny takto vzniklé konvexní Bézierovy plochy jsou sjednoceny a společně vytváří aproximační model. Následně je vzniklý algoritmus aplikován na přibližný model „krájením“ materiálu do jednotlivých vrstev. Tímto způsobem jsou vytvořeny dráhy nástroje. Každá jednotlivá vrstva zpracovávané kapsy mezi lopatkami je obráběna samostatně. Na podobné koncepci je postaveno několik dalších výzkumů.

Iso-parametrická metoda je často používanou metodou pro generování nástrojových drah. Znamená to, že každá dráha nástroje je vytvořena ve směru kteréhokoliv parametru. Nejběžněji jsou koncentrovány v úzké oblasti povrchu křivky. Z důvodu vícenásobného přejetí nástroje po stejné dráze bylo však zapotřebí zvýšit účinnost této metody. Přebytné množství takto vygenerovaných drah redukovali K. Suresh a D.C.H. Yang tím, že přepočítali dráhy kontrolováním výšky zbytkových zubů (scallop) na již obrobeném povrchu, a úsek mezi dráhami je získán a vyjádřen průměrem frézy, výškou zubů a poloměrem zakřivení.

R.S. Lin a Y. Koren přišli se strategií hrubování pomocí offsetu (vytvoření dráhy kontury). Tato metoda zaručuje, že se nástroj nebude zbytečně pohybovat po již obrobeném povrchu. Při této metodě je využito kulové frézy. Vznik nerovností na povrchu po hrubování je důsledkem pozůstalého zoubkování mezi jednotlivými drahami nástroje.

4.5 Dokončování lopatkových kol

Správně zvolená strategie má zásadní vliv na kvalitu obrobené plochy a provázanost mezi strojním časem a náklady na výrobu. Dokončovací operace je rozdělena na frézování povrchů lopatek a frézování náboje lopatkového kola. V některých případech je zapotřebí i dokončení náběžných a odtokových hran.

Náboj kola (mezilopatková kapsa) je obráběn parametricky, kdy dráhy nástroje mají převážně axiální charakter. To zaručuje delší trasu, kterou nástroj vykoná, než je jeho pohyb ve vymezené kapse přerušen. Kvůli tvarové náročnosti se pro tuto operaci využívají stopkové kulové frézy. Možné je však také radiální vedení drah, které se nicméně právě z důvodu kratších drah, a tím pádem častějších přejezdů používá jen ve výjimečných případech. Přířuv může být jak jednosměrný, tak obousměrný.

Boční frézování (flank milling), je metoda obrábění, pro kterou je charakteristická velká axiální hloubka řezu, vysoká řezná rychlost a relativně malá radiální hloubka řezu. Lopatky kol jsou obráběny bokem kónických stopkových fréz s kulovým čelem na jeden průchod. To se výrazně projevuje na zkrácení výrobního času. Tato metoda je zvláště doporučena pro obrábění přímkových ploch. Pokud nelze použít boční frézování (např. z důvodu dvojité zaobleným tvarům lopatek, kde by došlo k podřezání, či obecně u povrchů se složitější geometrií), je alternativou k bočnímu frézování tzv. frézování bodové (point milling), kdy je plocha obrobená na několik průchodů špičkou frézy. Touto metodou je sice možné obrábět součástky se složitější geometrií, avšak i ta má své nedostatky. Zejména se jedná tedy o delší výrobní časy a s tím spojena ekonomičnost operace. Dále pak kvalita povrchu je oproti bočnímu frézování horší, jak lze vidět z obrázku 4-9. V některých aplikacích lopatkových kol je však tento nedostatek irelevantní. Při změně řezných parametrů (snížení řezné rychlosti, zvýšení posuvu na zub a hloubky řezu), jsou tyto metody využívány i pro hrubovací operace. [52], [53]



Obrázek 4-9 - Porovnání bočního (vlevo) a bodového (vpravo) frézování lopatkového kola [54]

5 Používané nástroje při obrábění tvarových ploch

Během frézování na obráběcích centrech se používá velké množství obráběcích nástrojů, a to jak hrubovacích, tak i dokončovacích, s vyměnitelnými břitovými destičkami, či monolitních. V katalogích nástrojových výrobců lze nalézt různého provedení těchto nástrojů, a to z různých nástrojových materiálů. V dnešní době jsou nejhojněji používanými nástrojovými materiály bezesporu slinuté karbidy (SK). Dále je možné se setkat s rychlořeznými ocelmi (HSS-avšak ty byly s příchodem slinutých karbidů ve velké míře vytlačeny), kubickým nitridem boru (CBN), polykrystalickým diamant (PKD), atd. Výkonnost a trvanlivost těchto nástrojů závisí nejen na jejich geometrii, volbě řezných podmínek a materiálu obrobku, ale také na kvalitě a typu nanášených povlaků, zlepšující i řezné vlastnosti. Metod nanášení povlaků na břit nástroje existuje více. Těmi nejběžnějšími technikami jsou však CVD a PVD (Chemical a Physical Vapour Deposition), neboli nanášení tenkých filmů chemickou a fyzikální cestou. Popřípadě je možné použít jejich modifikaci – PACVD, kdy je nanášení realizováno pomocí plazmatu; PLD, kdy je nanášení docíleno laserovou technologií; APCVD (CVD za atmosférického tlaku); ALCVD (CVD v atomové vrstvě); AACVD (CVD za pomoci aerosolu); EBPVD (PVD elektronovým paprskem); magnetronové napařování, reaktivní napařování a jiné.

5.1 Stopkové frézy s kuželovou řeznou částí

Frézy s kónickou geometrií své uplatnění nacházejí především v hrubovacích operacích. Oproti kulovým frézám mají kuželové frézy větší plochu kontaktu s obrobkem, což se projevuje tím, že zde dochází k podstatně většímu úběru materiálu. To však může být doprovázeno i nežádoucími jevy. Při obrábění tvarových ploch je odebírána proměnlivá tloušťka třísky, což představuje iniciátor k tvorbě vibrací a chvění. Tyto jevy však mohou být zcela eliminovány nepravidelným stoupáním šroubovice řezné části frézy.

5.2 Stopkové frézy s kulovou řeznou částí

Kulové frézy jsou význačné svou řeznou hranou ve tvaru rádiusu. Používají se zejména při dokončování konvexních i konkávních tvarových ploch, kterými jsou různé formy, lopatky oběžných kol aj. Hlavním nedostatkem tohoto typu fréz jsou vznikající nulové obvodové rychlosti v ose nástroje, při kterých je obráběný materiál v tomto bodě zatlačován, nikoli obráběn (viz kap. 4.2.3). Pro dosažení požadované kvality obráběného povrchu je u kulových fréz zapotřebí volit nízké hodnoty radiální hloubky řezu a_e , neboť efektivní průměr obrábění je malý. Tím ovšem dochází k extrémnímu nárůstu výrobních časů. Z tohoto důvodu proto bývají v poslední době velmi často nahrazovány inovativnějšími soudečkovými frézami.

5.3 Stopkové frézy se soudečkovou řeznou částí

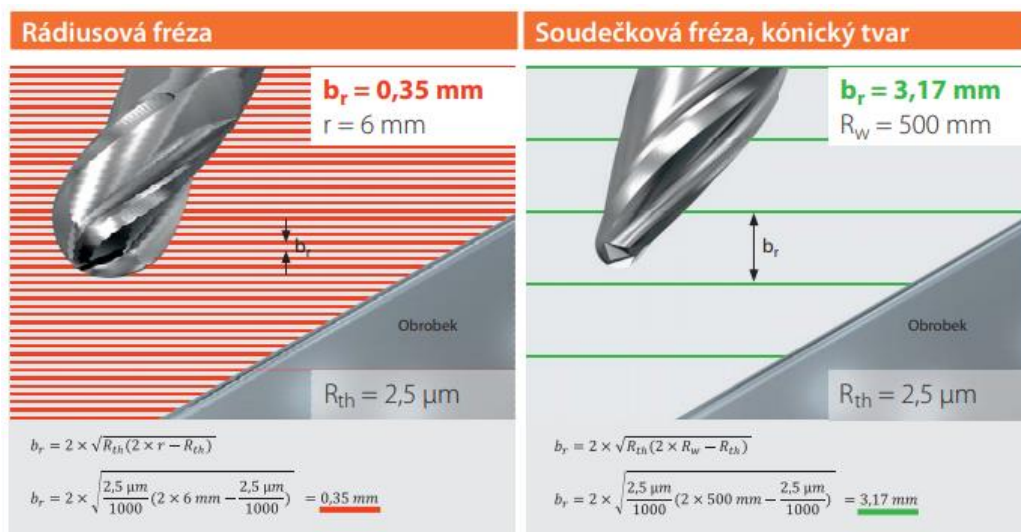
Výrazná úspora času přichází s vysoce výkonnými soudečkovými frézami (obr. 5-1). Tyto frézy, obdobně jako kuželové, odebírají materiál bokem nástroje, což umožňuje zvětšení rozestupů mezi jednotlivými dráhami, a navíc zlepšení jakosti obrobeného povrchu. Děje se tak z důvodu velkého efektivního rádiusu na řezné části. Mají však i své stinné stránky. Větší kontaktní plocha nástroj-obrobek generuje větší řezné síly, které mohou u obrábění tvarových ploch vést k vzniku vibrací, či nutnost většího naklonění nástroje, při kterém např. z důvodu omezenosti pracovního prostoru může nástrojový upínač kolidovat s obrobkem. Dále je zapotřebí mít pro nasazení soudečkových fréz do výroby výkonný CAM software, schopný s těmito nástroji pracovat. Rovněž jako kulové frézy, se i tyto používají spíše při dokončovacích operacích. Na obrázku 5-2 je porovnání kulové a soudečkové frézy, kdy při devítinásobné vzdálenosti mezi

jednotlivými drahami (b_r) u soudečkové frézy, je dosaženo stejné drsnosti obrobeneho povrchu (R_{th}), jako u frézy kulové. [57], [58]



Obrázek 5-1 – Čtyři základní tvary soudečkových fréz [57]

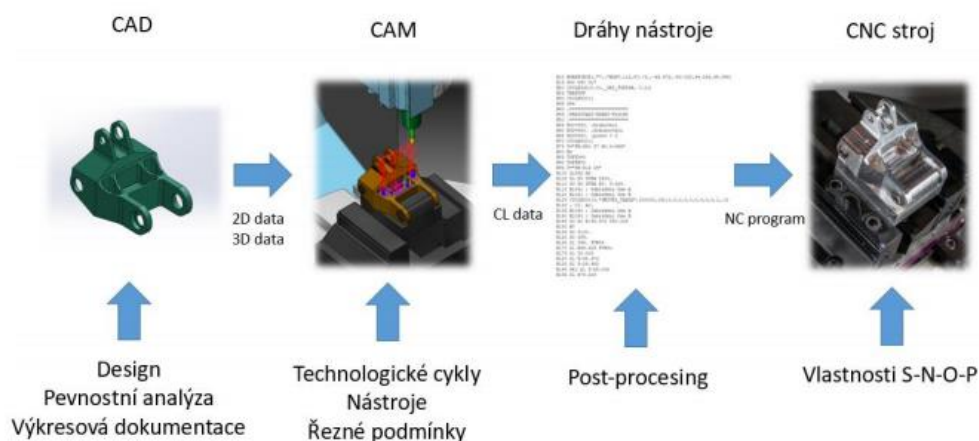
Zleva: kapkovitý, čochkovitý, kuželový, soudečkový



Obrázek 5-2 - Porovnání kulové a soudečkové frézy z hlediska vzdálenosti drah [58]

6 Řetězec CAD/CAM/CNC

Tímto pojmem se označuje ta část návrhu a přípravy výroby, odehrávající se v počítačovém prostředí mimo obráběcí stroj. Jde tedy o soubor jednotlivých úkonů, provázející požadovaný výrobek od jeho konceptu až po finální výrobu. Schéma tohoto řetězce je zobrazeno na obrázku 6-1.



Obrázek 6-1 - Struktura CAD/CAM/CNC řetězce [41]

6.1 CAD

Úlohou CAD modulu je přenesení a realizace nápadů do počítače. Jde tedy o zanesení geometrie za pomoci přímého vstupu formy do modelu. Tyto modely jsou buď ve 2D (k dispozici je pouze obrys součásti), nebo častěji spíše ve 3D formě (prostorový model součásti). Kromě pokročilých modelářských funkcí, je obrovskou výhodou a nedílnou součástí CAD softwarů také možnost tvorby výkresové dokumentace, různé analýzy vymodelované součásti (napětí, teplot, deformací, aj.), automatický výpočet objemu součásti a další nadstavbové funkce ulehčující ověření správnosti a požadované rozměrové přesnosti.

6.2 CAM

Vymodelovaná součást v CAD programu je následně exportována do modulu CAM a tvoří tak vstupní soubor pro CAM modul. Zde se připravují data pro následné obrobení na CNC strojích. Nejprve je zapotřebí definovat souřadný systém, nulový bod obrobku a rozměry polotovaru, použité řezné nástroje atd. Následně se vytvoří jednotlivé technologické operace tak, aby byla následně součást obrobena dle požadavků. Obdobně jako v CAD programech, i zde jsou

k dispozici nadstavbové funkce. Jde například o simulaci obráběcího procesu a celkovou kinematiku stroje, verifikaci navržených drah a kontrolu kolizí mezi nástrojem a obrobkem.

6.3 Postprocessor

Pokud výrobní proces vyhotovený v CAM softwaru je zkontrolován a bez chyb, je zapotřebí tyto informace obsažené v takovém procesu přenést na obráběcí stroj. K tomuto účelu slouží postprocessor. Jedná se o jakýsi softwarový převodník dat z CAM systému do datového jazyka řídicího systému konkrétního CNC stroje. Převádějí se tak dráhy nástrojů, zvolené řezné podmínky, či použité cykly do ISO kódu, popř. jiných datových jazyků. Vliv postprocesoru má tedy významný vliv na výsledek celého procesu. Pokud konkrétní stroj má tu možnost, je po boku nejčastěji používané lineární interpolace drah nástroje také např. interpolace kruhová. Takovými interpolacemi je možné zefektivnit a zlepšit plynulost obrábění tvarových ploch.

6.3.1 ISO kód

Jde o nejrozšířenější druh programovacího jazyka CNC obráběcích strojů. Je to skladbu slov (příkazů) seřazena v daném řetězci. Informace, které tento kód poskytuje, je možné rozdělit do následujících skupin [49]:

- Geometrické – obsahují informace o dráhách nástrojů
- Technologické – obsahují údaje které stanovují řezné podmínky
- Pomocné – obsahují příkazy pro vykonání pomocných funkcí

Každý blok (věta) v tomto jazyce je tvořena alfanumerickými symboly (slovy), které jednoznačně určují, jaký úkon má být proveden. Tato slova se skládají z adresy (písmen) a významu (číslíce). Adresy jsou seřazeny a zažity v určitém pořadí (N G M X Y Z F S T D). Jejich význam je shrnut v následující tabulce.

Tabulka 6-1 Seznam používaných adres a jejich definice [49]

adresa	definice
N	Číslo bloku (není potřeba zadávat, slouží jen pro přehlednost)
G	Geometrické přípravné funkce
M	Pomocné přípravné funkce
X, Y, Z	Konfigurovatelné adresy (zpravidla osy X, Y, Z souřadného systému)
A, B, C	Konfigurovatelné adresy (zpravidla rotace kolem základních os X, Y, Z)
F	Rychlost posuvu
S	Otáčky vřetena
T	Volba nástroje
D	Volba položky z tabulky korekcí

Některé geometrické přípravné funkce (G-funkce)

- G00 Najíždění rychloposuvem
- G01 Lineární interpolace
- G02 Kruhová interpolace
- G90 Absolutní odměřování
- G94 Posuv [mm]
- G95 Posuv [mm*ot⁻¹]

Některé pomocné přípravné funkce (M-funkce)

- M00 Zastavení programu
- M03 Spuštění otáček vřetene ve smyslu hodinových ručiček
- M04 Spuštění otáček vřetene proti smyslu hodinových ručiček
- M05 Zastavení otáček vřetene
- M06 Výměna nástroje
- M08 Zapnutí chlazení
- M09 Vypnutí chlazení
- M30 Konec programu

6.4 CNC

Vytvořený NC kód je ve finále přenesen do řídicího systému CNC stroje. Je to tedy poslední operace před zhotovením výrobku. Vlastnosti stroje výrazně ovlivňují výsledek procesu, zejména při obrábění tvarových ploch a při víceosém obrábění. Vlastnostmi stroje je zde míněno koncept stroje, jeho dynamika a tuhost, základní přesnost a jiné charakteristiky mající vliv na kvalitu a rozměrovou přesnost obrobenej plochy. Dalšími faktory ovlivňující vlastnosti obrobku jsou použité nástroje, či způsob upnutí těchto nástrojů na stroji.

6.5 Optimalizace řetězce CAD/CAM/CNC

Z důvodu komplexnosti celého řetězce, počínaje CAD modelováním, až po samotnou strojní výrobu, je zapotřebí k dobrání se správného výsledku brát v potaz mnoho faktorů ovlivňujících tento řetězec. Zejména při obrábění dílců s tvarově složitou geometrií je možné, že vymyšlená technologie výroby nemusí být optimální hned při jejím prvním návrhu. Proto je důležité tyto navržené technologie optimalizovat. Za neoptimální navrženou technologii je považována ta, kde není např. dosaženo požadované přesnosti nebo kvality obrobeného povrchu, nebo kde dochází ke vzniku vibrací, teplotnímu ovlivnění obrobku, nadměrnému opotřebení nástrojů. Tyto často vyskytující se jevy mají negativní vliv na průběh, stabilitu a cenovou náročnost celého procesu.

6.5.1 Standardní způsob optimalizace

V praxi je prováděna tak, že se vygeneruje NC kód prvotního návrhu výroby a spustí se na stroji. Až při samotném obráběcím procesu se začnou vyskytovat nedostatky, které daná technologie má. Následuje tedy úprava NC kódu (úprava drah, změna nástroje, změna řezných podmínek, či dokonce změna celé strategie obrábění). Upravený NC kód je poté opět implementován do řídicího systému stroje a proces obrábění se opakuje. To se provádí pořád dokola, dokud není vyrobený dílec v požadované kvalitě.

Je ale zřejmé, že tento způsob optimalizace sebou nese řadu nevýhod. Například se zde projeví vysoké strojní náklady, kdy stroj pracuje „naprázdno“, dokud není vyrobena finální součást. Jde tedy o poměrně neefektivní způsob optimalizace, který je v dnešní době je zastíněn moderními metodami. Přesto se stále používá hlavně při kusové a malosériové výrobě.

6.5.2 Moderní způsob optimalizace

Jedná se o souhrn velkého množství optimalizačních metod, pomocí kterých se docílí požadovaného výsledku, kdy není zapotřebí odladění výroby na stroji. Podle toho, do jakého úseku řetězce tyto metody vstupují, se dají rozdělit na:

Použití produktivnějších technologií zvyšující efektivitu (kap. 4.3)

Optimalizace řezných podmínek na základě přímého měření při obrábění

Tato kategorie představuje ty způsoby optimalizace, které souvisejí s měřením a posléze optimalizací přímo na stroji. Je zde využito snímačů pro měření prostorových, tvarově složitých

ploch. Snímače měření bývají umístěny na upínače nástrojů, ale také na upínače obrobků. Po naměření neuspokojivých hodnot některého z jevů obrábění, dochází k úpravě řezných podmínek. Tím se může předejít situacím, kterými mohou být např. úplná destrukce nástroje, vznik vibrací, aj.

Optimalizace řezných podmínek na základě simulace obráběcího procesu

Tyto optimalizace vstupují do CAD/CAM/CNC řetězce za postprocesorem. Jde tedy o optimalizaci na základě simulace CL (Cutter Location Data-data obsahující informace o poloze řezného nástroje) dat nebo NC programu. Za pomoci těchto simulačních metod je dosahováno optimalizace navržené technologie dřív, než je uvedena do provozu. Tím dochází k úspoře velkého množství nákladů. Tyto optimalizace jsou prováděny většinou samostatně pracujícími softwary, které díky vnitřním algoritmům a analýze parametrů obrábění dokážou upravit řezné podmínky a dráhy nástroje.

Zvýšení funkčních vlastností strategií

Tento typ optimalizace řetězce je zaměřen na úpravu drah nástrojů s využitím kontroly zatížení nástroje. „*V praxi jsou nejčastěji využívány adaptivní dráhy nástrojů, a to v kombinaci s tvarem tzv. morfující spirály nebo trochoidním tvarem drah. Obě zmíněné vlastnosti přinášejí určité benefity pro zvyšování efektivity a jejich kombinací vzniká velice silný aparát, kterým je možné dosáhnout požadovaných optimalizačních výsledků. Využití tvaru morfující spirály při generování drah nástroje je v současnosti umožněno především díky vysokému výpočetnímu výkonu počítačové techniky, obdobně jako generování drah adaptivním způsobem.*“ [41]

7 Software *hyperMILL*

Program *HyperMILL*[®] od společnosti OPEN MIND Technologies AG, sídlící v německém Weßlingu, je moderní a flexibilní CAM software, umožňující 2,5D, 3D a pětiosé frézování. Rovněž nabízí i programování soustružnicko-frézovacích operací a technologií, kterými jsou např. vysokorychlostní HSC a vysokovýkonné HPC obrábění (kap. 4.3). Nejmodernější verze tohoto programu je navíc obohacena o speciální aplikace, mezi které patří frézování lopatkových kol, lopatek turbín, tvarových kanálů a forem pneumatik.

Jedná se o hybridní software. Znamená to, že je k dispozici vždy s výkonným CAD systémem, kterým bývá *hyperCAD*^{®-S}, avšak volba modelářského systému záleží pouze na zákazníkovi. Důvodem pro vývoj *hyperCAD*^{®-S} byla především snaha o urychlení a zjednodušení postupů v CAD prostředí pro přípravu programování. Programátor tak pracuje v již známém prostředí a souvislé pracovní postupy plynoucí z homogenity rozhraní dvou systémů napomáhají předcházet výskytu chyb. *HyperMILL* je snadno integrován i do alternativních CAD systémů, jako je Autodesk Inventor firmy Autodesk Inc, či SolidWorks společnosti SOLIDWORKS corporation.

Program *hyperMILL* je dostupný v následujících základních balíčcích.

- *hyperMILL* 2.5D (jedná se o základní balíček)
- *hyperMILL* Classic (obsahuje 2.5D a 3D strategie obrábění)
- *hyperMILL* Expert (rozšíření předchozích strategií)

Je však libovolně rozšiřitelný. Přídavnými balíčky jsou:

- *hyperMILL* 5AXIS (obsahující strategie obrábění v pěti osách)
- *hyperMILL* millTURN (kombinace soustružnicko-frézovacích strategií)
- MAXX Machining (zahrnuje produktivnější metody hrubování, dokončování a vrtání)
- Speciální aplikace (výroba lopatek a oběžných kol, trubek a forem). [44]

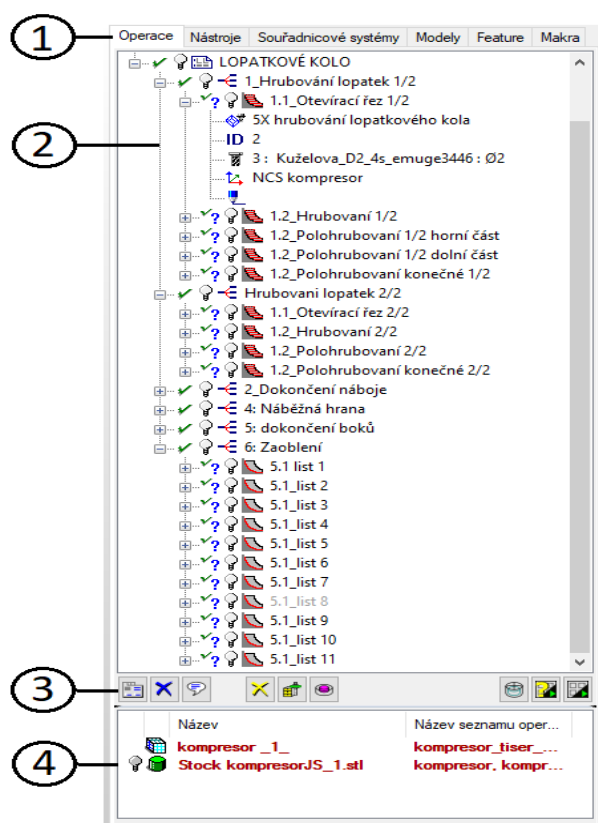
V Praktické části diplomové práce, zabývající se výrobou lopatkového kola za pomoci víceosého obrábění, byl použit program *hyperMILL* for *hyperCAD*^{®-S}, verze 2020.1 SP3 a posléze přechod na aktuální verzi programu 2020.2 SP1, s přidaným balíčkem *hyperMILL* 5AXIS.

7.1 Uspořádání prohlížeče

V prohlížeči aplikace *hyperMILL* se definují samotné operace, seznamy operací, řezné nástroje, souřadné systémy polotovarů a obrobků, makra pro automatizaci pracovních postupů a feature, což je technologie zpracovávající informace geometrie CAD modelu pro CAM programování, za účelem snížení nároků na programování a docílení tak vyšší efektivity a časové úspory během výroby. Názorná ukázka, jak tento prohlížeč vypadá je na obrázku 7-1, kde jednotlivá čísla značí:

- ① Karta zahrnující seznam a jednotlivé operace, souřadné systémy, nástroje, modely, feature a makra.
- ② Horní okno prohlížeče, ve kterém jsou ve stromové struktuře definovány jednotlivé operace
- ③ funkce panelu nástrojů, kterými jsou úprava a odstranění operací, zprávy o dané operaci (např. chybové a kolizní hlášení), zobrazení odebíraného materiálu atp.
- ④ spodní okno prohlížeče, zahrnující informace o modelu polotovaru a oblasti obrábění

[50]



Obrázek 7-1 - Uspořádání prohlížeče

7.2 Frézovací cykly při obrábění vícelopatkových kol v softwaru *hyperMILL*

V softwarové dokumentaci programu *hyperMILL*, jsou v sekci „5X obrábění“ popsány jednotlivé cykly a jejich strategie používané pro zhotovení vícelopatkových kol (dále jen VK).

Patří sem:

- 5X hrubování VK
- 5X frézování hran VK
- 5X dokončení náboje VK
- 5X obrábění zaoblení VK
- 5X bodový kontakt VK
- 5X tangenciální obrábění
- 5X frézování boků VK

Zmíněné cykly spolu s jejich strategiemi, jsou prezentovány dále.

7.2.1 Hrubování VK

Hrubováním je zde myšleno postupné obrábění mezilopatkových kapes. K dispozici jsou zde různé metody hrubování pro příslušné obráběcí úkony, kterými je možno optimalizovat jednak dráhy a sklon nástrojů, ale také jejich délku, velikost posuvů, velikost současně obráběné oblasti a jiné podrobné funkce.

Aplikováním různých hrubovacích operací ve vhodném sledu je možné v jednotlivých případech dosáhnout nejefektivnějšího a spolehlivého využití co nejrobustnějších nástrojů. To se v konečném důsledku příznivě projeví na optimálnosti strojního času během obrábění. Vybraná strategie frézování určuje sklon nástroje a axiální rozložení drah.

Strategie ofset náboje

Sklon nástroje vychází z informací o vektorech náboje. Dělení záběru se vypočte jako ofset od náboje (obr. 7-2 a).

Strategie ofset krytí (první dráha)

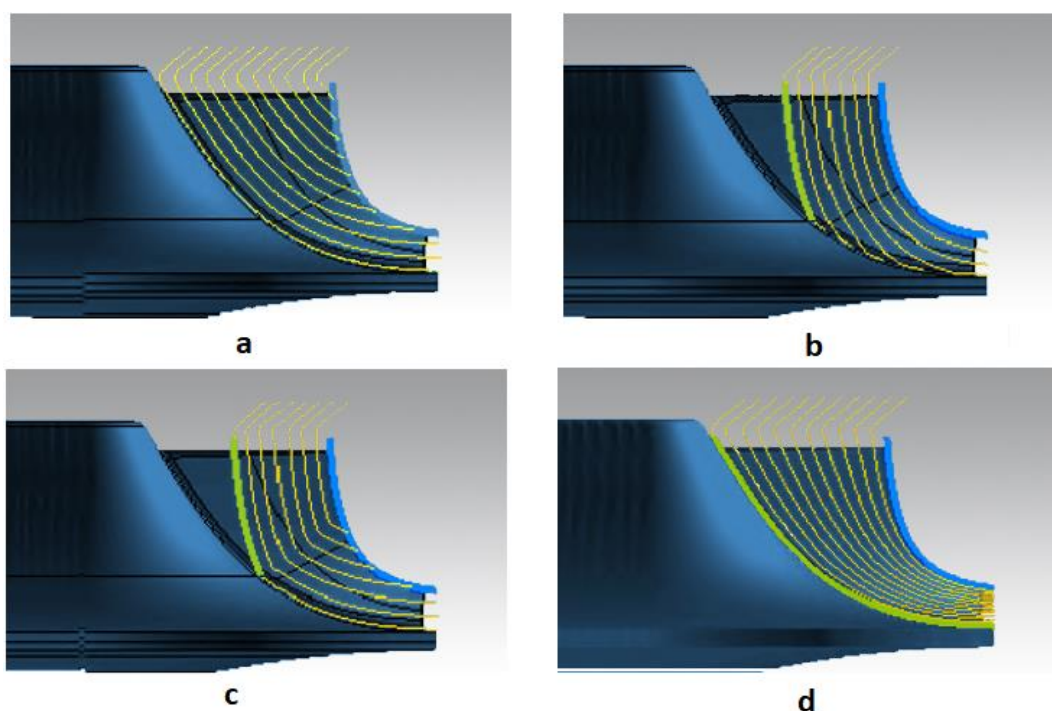
Dělení záběru se vypočítává jako ofset od krycí plochy začínající u první dráhy. Dráhy jsou oříznuty u povrchu náboje a od tohoto povrchu jsou prodlouženy vždy k nejbližší vyšší dráze (obr. 7-2 b).

Strategie ofset krytí (poslední dráha)

Dělení záběru se vypočte jako ofset od poslední dráhy. Dělení záběru se vypočítává z hodnoty ofsetu krytí v rovině oříznutí, která odpovídá povrchu náboje (obr. 7-2 c).

Strategie plynule

Jelikož hrubování může být přesné předobrobení povrchu pro následnou operaci dokončení, je tato strategie zejména užitečná pro obrábění lopatkových disků, u kterých je vyžadováno střídavé hrubování a dokončování v několika krocích (obr. 7-2 d).



Obrázek 7-2 - Strategie frézování cyklu hrubování VK [50]

Pro dosažení optimálního obrábění, je kromě volby frézovacích strategií vyžadována také strategie a poloha přísuvu nástroje do řezu.

Strategie přísuvu

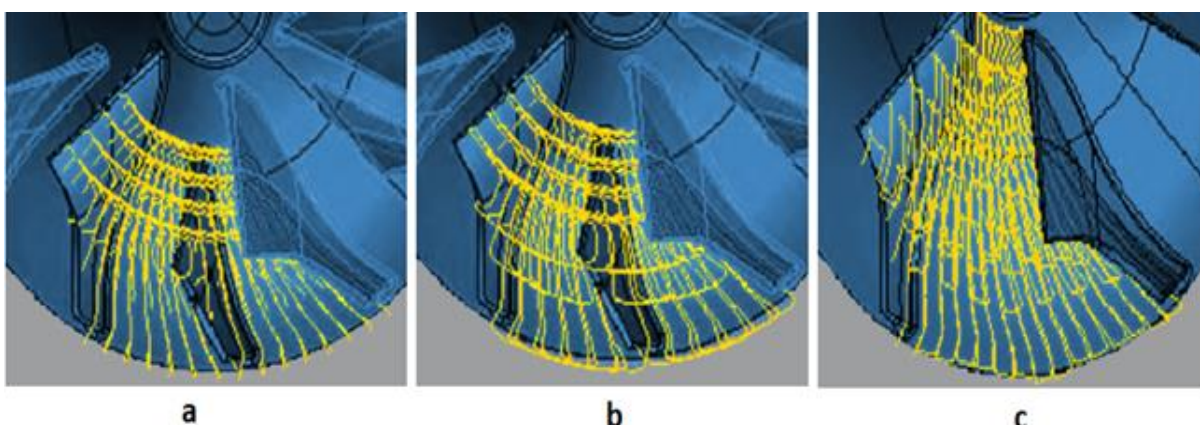
Přísuv je realizován vždy plynulým pohybem mezi hlavními lopatkami. Profil dráhy tedy sleduje proudění kapaliny. Úběru materiálu je vždy dosaženo sousledným frézováním.

Plynule střídavě: Směr záběru mezi hlavními lopatkami je střídavý (obr. 7-3 a).

Jednosměrně plynule: Směr záběru mezi hlavními lopatkami je v tomto případě stálý (obr. 7-3 b).

Plynule střídavě další: Na rozdíl od strategie ‚plynule střídavě‘, ve které jsou dráhy směřující nahoru a dolů propojeny spirálovitě zevnitř, je v této strategii uplatněno meandrovité propojení s další přímou dráhou. To má za výhodu menší počet pohybů os otáčení, i lineárních os.

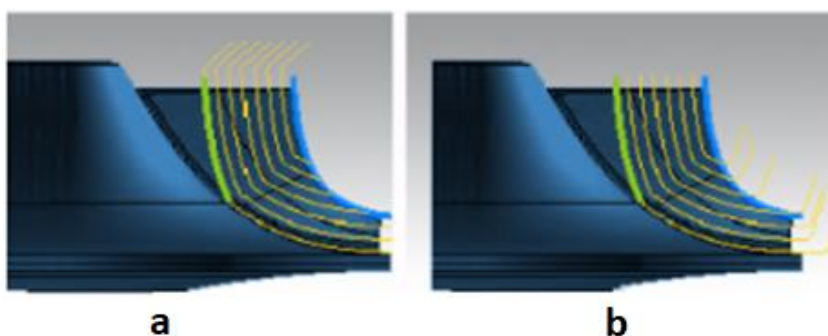
Ofset kapsy: Úběru materiálu je dosahováno ve formě kapes mezi lopatkami, při nastavené hodnotě ofsetu. Ofset se aplikuje podél vnější kontury kapsy. Tento postup zajistí, že nezůstanou zbytky obráběného materiálu na náběhové straně, které by mohli při následném obrábění odtokové strany touto metodou způsobit kolizi nástroje (obr. 7-3 c).



Obrázek 7-3 - Strategie přisuvu cyklu hrubování VK [50]

Poloha přisuvu

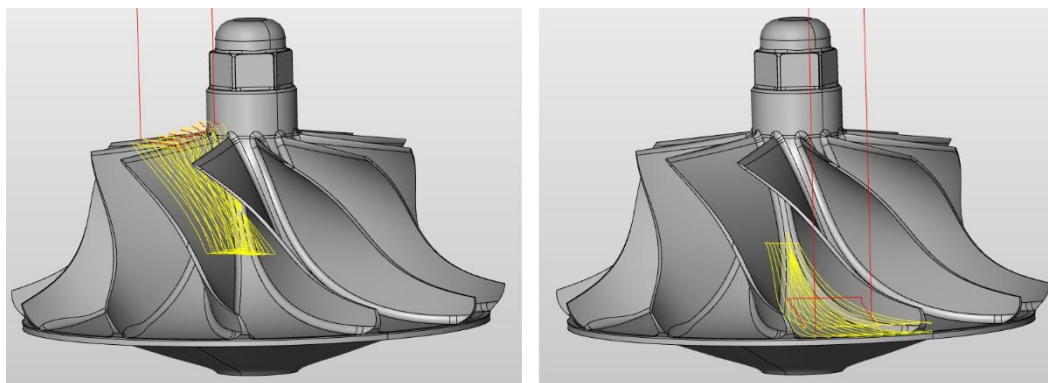
Zde připadají v úvahu dvě možnosti. První z nich je, že nástroj bude přisouván z náběžné hrany lopatky (náběhová strana, obr. 7-4 a). Druhou možností je volba přisuvu z hrany odtokové (vlečná strana, obr. 7-4, b).



Obrázek 7-4 - Polohy přisuvu hrubovacího cyklu VK [50]

Je-li při obrábění zvolena strategie obrábění se střídavým pohybem, mělo by se přednostně začínat u náběžné hrany. Při jednosměrném způsobu obrábění je poloha přisuvu obecně závislá na co nejlepším úhlu stoupání.

Dále software umožňuje rozdělit kapsu mezi sousedícími lopatkami na dvě části. To má za následek možnost použití odlišných nástrojů, vedoucí ke zkrácení obráběcího procesu a zvýšení jeho efektivity. Programátor se tak může sám rozhodnout, zdali bude obráběna pouze náběhová, či vlečná strana. Z obrázku 7-5, kde jsou znázorněny dráhy nástrojů je patrné, že náběhová strana bude obráběna menším nástrojem než strana vlečná.



Obrázek 7-5 - Rozdělení mezilopátkové kapsy

7.2.2 Dokončování nábojů VK

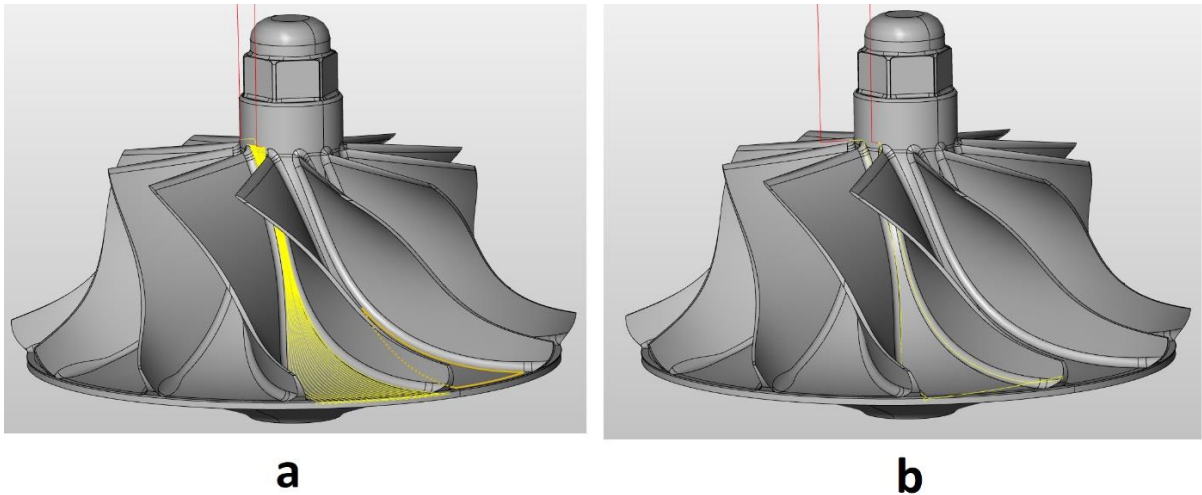
Obdobně jako u hrubovacího cyklu, i zde je možnost výběru frézovací strategie. Různé strategie dokončovacího obrábění optimalizují výpočet rozložení drah a sklon nástroje pro příslušné obráběcí úkony.

Strategie kompletní obrábění

Během této strategie nástroj odstraní rezidua vzniklá po hrubovacím cyklu v celém mezilopátkovém prostoru. Navíc poskytuje funkci optimalizovat, díky které je každá druhá dráha na odtokové straně zkrácena o definovanou velikost.

Strategie částečné obrábění

V této strategii dokončovacího obrábění náboje kola je nutné zadat omezení počtu prvních drah. Tuto funkci je možno používat k provádění obrábění zbytkového materiálu, které se omezuje na oblast náboje.

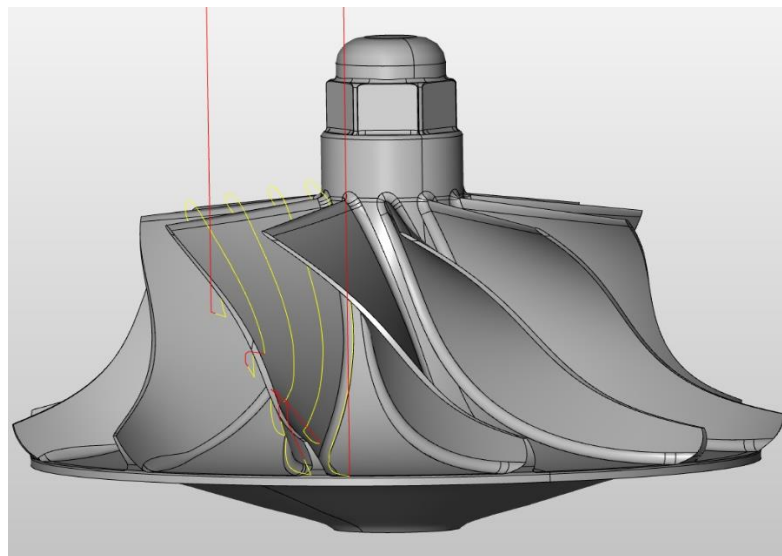


Obrázek 7-6 – Strategie frézování cyklu dokončování nábojů VK

V obou zmíněných strategiích sledují dráhy nástroje profil proudění. Znázornění kompletního, resp. částečného obrábění, je na obrázku 7-6 a, resp. 7-6 b. Poloha a strategie přísuvu při dokončování náboje jsou stejné, jako je tomu v hrubovacím cyklu.

7.2.3 Frézování boků VK

Principem je obvodové odebrání třísek z povrchů lopatek (obr. 7-7). Použití tohoto cyklu připadá v úvahu tehdy, umožňují-li povrchy lopatek (pravidelný povrch lopatek, vybrané povrchy lopatky nesmí obsahovat poloměr přechodu k náboji) použít vhodný, dostatečně přesný nástroj. Oproti bodovému frézování poskytuje tento cyklus kratší výrobní časy.



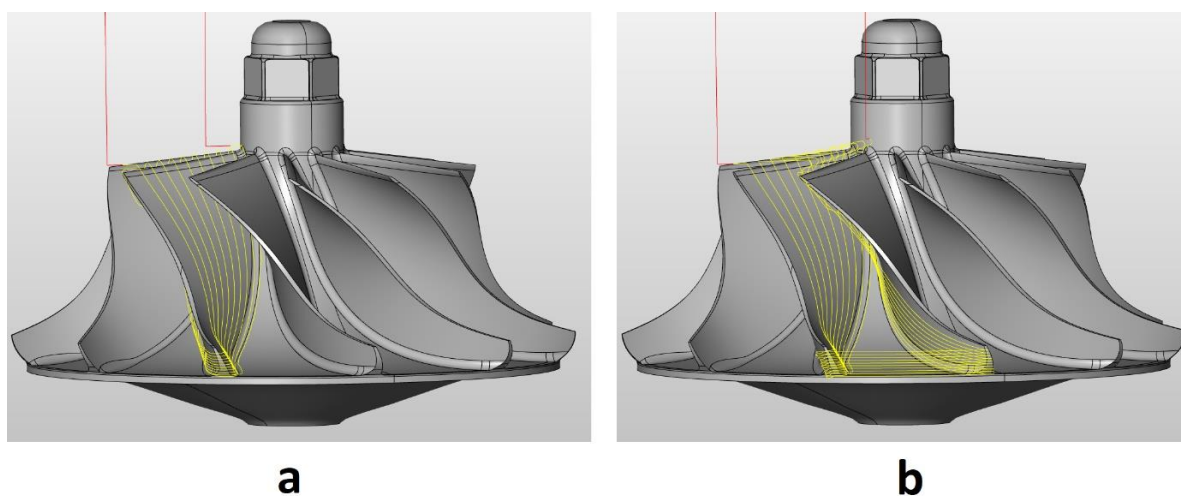
Obrázek 7-7 - Zobrazení cyklu frézování boků VK

7.2.4 Bodové frézování VK

V tomto cyklu je materiál z povrchu lopatky odebírán bodovým stykem s nástrojem, pohybující se po šroubovitě obvodové dráze. Bodové frézování se uplatňuje přednostně tehdy, jsou-li povrchy lopatek zatočeny v takové míře, že není možné použít cyklus frézování boků.

Režim kapes

Obrábění hlavních lopatek probíhá v kapse, kdy se pravý povrch levé lopatky a levý povrch pravé sousední lopatky obrábí v jedné operaci. Na obr. 7-8 a, resp. 7-8 b, je znázorněna neaktivovaná, resp. aktivovaná funkce režimu kapes.



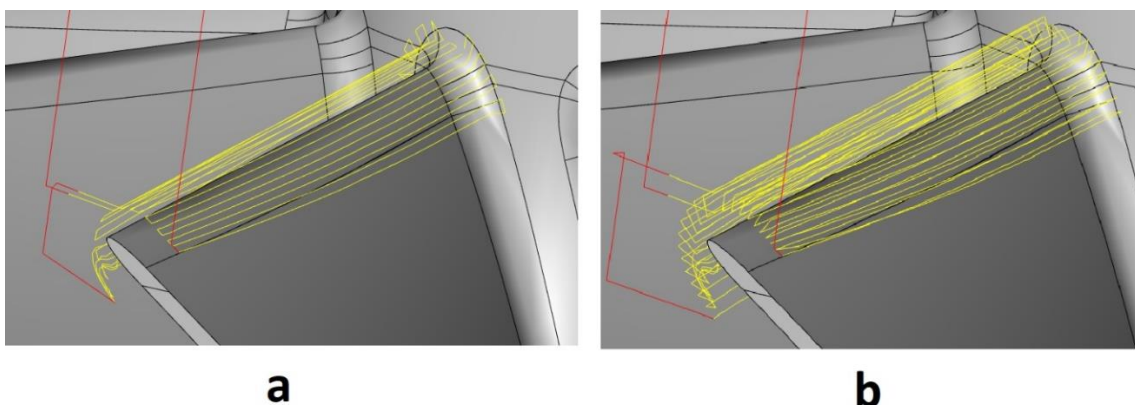
Obrázek 7-8 - Zobrazení funkce režim kapes

7.2.5 Frézování hran VK

Cyklus frézování hran, jak již název napovídá, je určen pro obrábění náběžné a odtokové hrany lopatkového kola. Přisuv může být buď střídavý (obr. 7-9 a), či jednosměrný (obr. 7-9 b). U jednosměrného přisuvu je obrábění hrany započato ve středu nad povrchem hrany. Materiál je odebírán vždy sousledným frézováním následujícím způsobem:

- Pomocí tažného řezu – v oblasti vlevo od středu se materiál odebírá směrem od náboje ke krycí ploše.
- Pomocí vnořovacího řezu - v oblasti vpravo od středu se materiál odebírá směrem od krycí plochy k náboji.

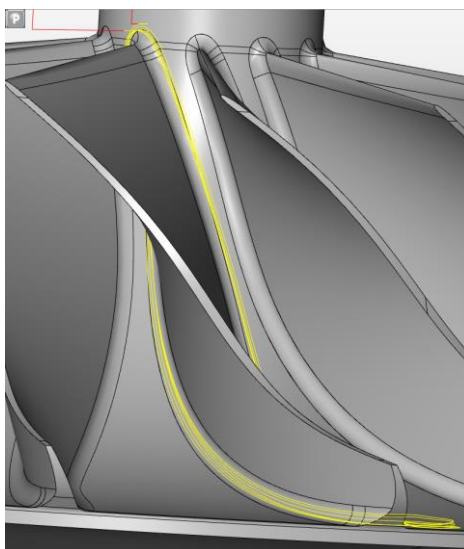
Dráhy zpětného pohybu jsou projížděny rychlostmi posuvu, jež všechny lze samostatně definovat pomocí zadané bezpečnostní vzdálenosti, a to rovnoběžně s dráhou řezného nástroje.



Obrázek 7-9 - Strategie přisuvu cyklu frézování hran VK

7.2.6 Frézování zaoblení VK

Frézování zaoblení VK je možno využít k frézování zaoblení mezi povrchem lopatky a povrchem náboje (obr. 7-10). Podstatou tohoto cyklu je generování proměnlivých zaoblení a odebrání zbytkového materiálu. Díky tomuto cyklu je možné efektivnější použití větších nástrojů při frézování povrchů lopatek a náboje.



Obrázek 7-10 - Zobrazení cyklu frézování zaoblení VK

8 Experimentální část

Jak již bylo řečeno v úvodu práce, hlavním cílem experimentální části je seznámení se s CAM softwarem hyperMILL, návrh a realizace NC programu pro výrobu lopatek prototypového radiálního kompresorového kola do turbodmychadla nákladního automobilu, následná optimalizace strategií obrábění a parametrů obrábění a posléze samotná výroba součásti.

8.1 Materiál polotovaru

Zvolený materiál pro výrobu lopatkového kola měl být původně EN AW 2024 T351 (dle ČSN 42 4203 AlCu4Mg1). Jedná se o jednu z nejvýznamnějších slitin hliníku vůbec. Dle [45] jde o nejhojněji používanou hliníkovou slitinou v leteckém a automobilovém průmyslu. Vyznačuje se velmi dobrou obrobitelností, přijatelnou korozní odolností, ale také špatnou svařitelností a nevhodností k eloxování. Díky své vysoké pevnosti a nízké měrné hmotnosti, se používá při výrobě výztuží i samotných trupů letadel, plášťů kokpitů a dveří, náběžných hran atd. Rozbor tohoto materiálu je uveden níže.

Značení

První písmeno A symbolizuje, že se jedná o hliník (Aluminium). Druhé písmeno W (Wrought) značí, že se jedná o tvářenou slitinu. První číslice pak označuje slitinovou skupinu. V tomto případě tedy číslice 2 reprezentuje slitinu hliníku, kde je hlavním legujícím prvkem měď. Slitiny třídy 2000 jsou spíše známé pod obchodním názvem dural, duralminum, či superdural. Druhá číslice se vztahuje ke změně legování ve vztahu k původnímu legování. Poslední dvě číslice v tomto čtyřčíslí nemají žádný zvláštní význam, slouží pouze k identifikaci různých druhů legování. Písmeno T sděluje, že bylo dosaženo vytvrzení tepelným zpracováním. Následující číslice za písmenem značí specifický sled tepelného zpracování. Zde číslice 3 říká, že tepelné zpracování bylo realizováno nejprve rozpouštěcím žiháním, při teplotě asi 495°C. Následuje ochlazení ve vodě při teplotě 25÷35°C. Poté je materiál tvářen za studena a finálním procesem je přirozené stárnutí, trvající 4 dny. [46], [47], [48]

Mechanické vlastnosti ve stavu T351 jsou následující:

- | | | | |
|----------------------------|--------|-------------------|---------|
| • Modul pružnosti v tahu E | 71 GPa | • Mez pevnosti Rm | 460 MPa |
| • Tvrdost dle Brinella | 120 | • Mez kluzu Re | 330 MPa |

Tabulka 8-1 Chemické složení slitiny EN AW 2024 T351 [46]

Legující prvky	Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Zr	Ti	Cr
Minimum [%]	90,7	3,8	1,2	0,3	0	0	0	0	0	0
Maximum [%]	94,7	4,9	1,8	0,9	0,5	0,5	0,25	0,2	0,15	0,1

Z důvodu dostupnosti byla však nakonec zvolena slitina EN AW 7075 T6511 (dle ČSN 42 4222 AlZn5,5MgCu), kde je hlavním legujícím prvkem zinek. Tato slitina vykazuje podobné vlastnosti, jako EN AW 2024 T351. [59]

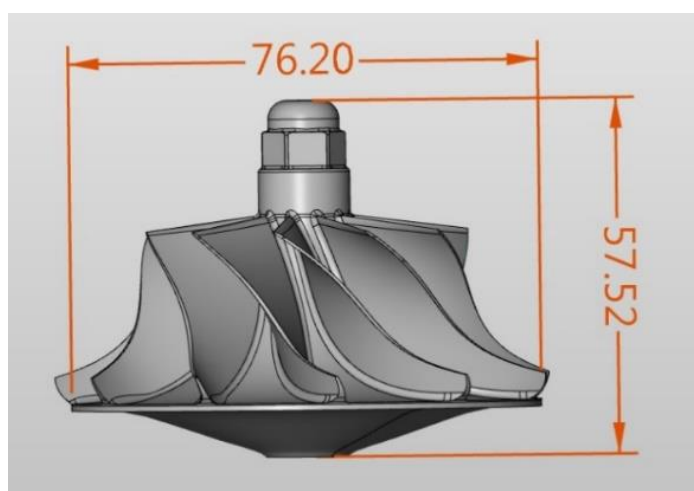
- Modul pružnosti v tahu E ~ 70 GPa
- Mez pevnosti Rm 470÷560 MPa
- Tvrdost dle Brinella 150
- Mez kluzu Re 400÷500 MPa

Tabulka 8-2 Chemické složení slitiny EN AW 7075 T6511 [60]

Legující prvky	Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Zr	Ti	Cr
Minimum [%]	86,9	1,2	2,1	0	0	0	5,1	0	0	0,18
Maximum [%]	91,4	2	2,9	0,3	0,4	0,5	6,1	0,25	0,2	0,28

8.2 CAD model lopatkového kola

Vybraný model experimentálního kompresorového kola (obr. 8-1) má největší průměr 76,2 mm, a to u kořene lopatek. Celková výška je dána hodnotou 57,52 mm. Kolo je tvořeno 11 identicky zakřivenými hlavními lopatkami po svém obvodu, bez lopatek dělicích. Hlavní lopatky jsou tvořeny NURBS křivkami (NeUniformní Racionální B-spline křivky). Stejným způsobem je tvořen náboj i plocha spodní strany kola.



Obrázek 8-1 - CAD model lopatkového kola a zobrazení hlavních rozměrů

8.3 Použité zařízení

Experiment byl proveden v halových laboratořích na ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie na strojní fakultě ČVUT v Praze. Strojem, na kterém byl experiment realizován, je pětiosé svislé obráběcí centrum Okuma MU-400V II s konfigurací stůl-stůl (kolébka), jehož některé technické údaje jsou níže v tabulce 8-3 spolu s fotografií stroje na obrázku 8-2. Podrobnější informace o tomto stroji poskytuje např. [55].

Tabulka 8-3 Technická data použitého stroje (výběr) [55]

Pracovní stůl	
Průměr upínací plochy [mm]	400
Max. otáčky [ot*min ⁻¹]	50
Rozsah pojezdů os	
Osa X [mm]	762
Osa Y [mm]	460
Osa Z [mm]	460
Osa A [°]	+20 až -110
Osa C [°]	360
Posuvy	
Rychloposuv [m*min ⁻¹]	X/Y/Z: 40/40/32
Rychloposuv rotačních os [°*min ⁻¹]	A/C: 18.000/14.400
Max. pracovní posuv [m*min ⁻¹]	X/Y/Z: 32
Pracovní vřeteno	
Rozsah otáček [ot*min ⁻¹ * 10 ³]	15
Výkon motoru (10 min/trvale) [kW]	22/18,5
Nástrojový zásobník	
Počet nástrojových míst	32
Max. průměr nástroje [mm]	90
Max. délka nástroje (od konce vřetena) [mm]	240
Max. hmotnost nástroje [kg]	8
Strojní data	
Výška [mm]	2946
Šířka [mm]	2160
Hloubka [mm]	2810
Hmotnost [kg]	7700

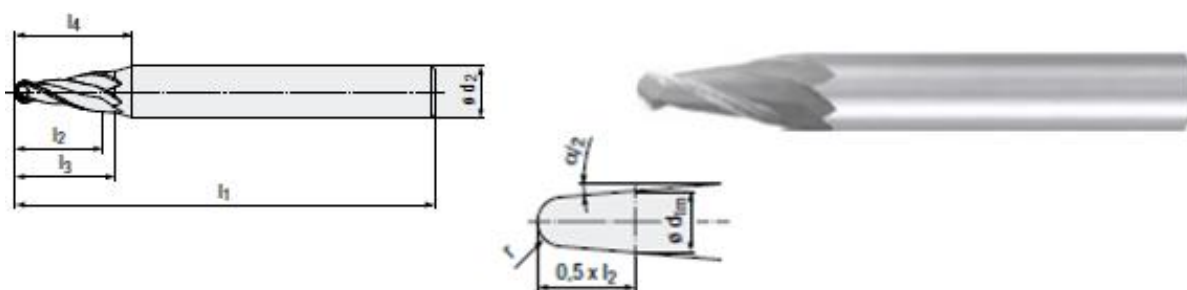


Obrázek 8-2 - Pětiosé svislé obráběcí centrum Okuma MU-400V II [55]

8.4 Použité nástroje a upínače

Nástroje použité při obrábění byly dodány firmou EMUGE FRANKEN, která se mimo jiné zaměřuje také na výrobu nástrojů pro obrábění lopatek turbín a lopatkových kol. Vzhledem k obráběnému materiálu, rozměrům a geometrii kola, byly z katalogů „frézy pro oběžná kola a lopatky turbín“ a „univerzální čelní frézy pro výrobu zápustek a forem“ vybrány následující nástroje.

Pro hrubovací operace byla zvolena kuželová monolitní fréza, jejíž tvar a rozměry jsou uvedeny na obrázku 8-3 a v tabulce 8-4. Důvodem pro vybrání této frézy byl fakt, že pro hrubování se zpravidla volí nástroje s malým počtem zubů (Z), a tím pádem větší zubovou mezerou pro lepší odvod třísek z místa řezu. Dále pak snaha zvolit úhel kužele ($\alpha/2$) pokud možno co největší, aby bylo odebíráno co nejvíce materiálu. Tato fréza je při vhodné úpravě podmínek vhodná i pro dokončovací obrábění.

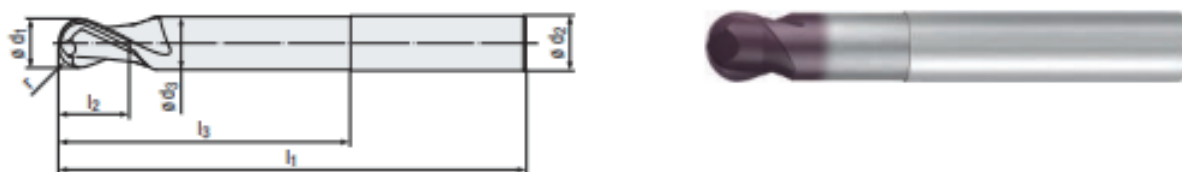


Obrázek 8-3 – Kuželová fréza 3446.04010A [51]

Tabulka 8-4 Rozměry kuželové frézy 3446.04010A [51]

$\alpha/2$ [°]	$r \pm 0,01$ [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	l_1 [mm]	l_4 [mm]	d_{1m} [mm]	$\varnothing d_2$ [mm]	Z
4	1	20	20	62	24	3,26	6	2

Pro dokončovací obrábění náboje kola a zaoblení mezi tímto nábojem a lopatkou, byla zvolena rovněž monolitní fréza, tentokrát kulová, opatřena povlakem TiAlN. Informace o této fréze jsou na obrázku 8-4 a v tabulce 8-5.

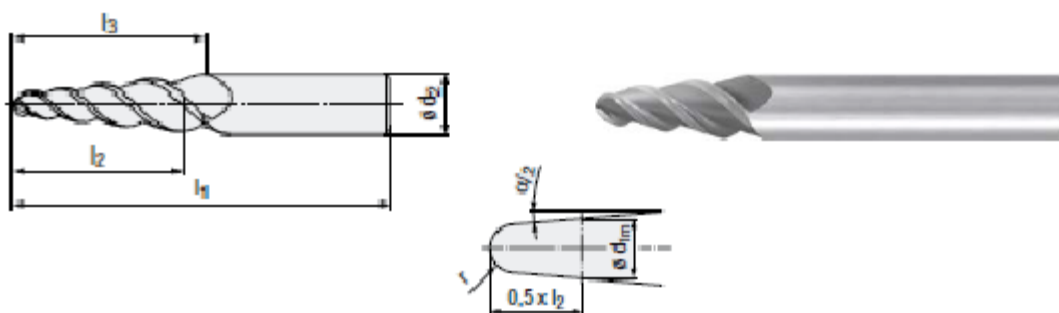


Obrázek 8-4 - Kulová fréza 2550A.002 [56]

Tabulka 8-5 Rozměry kulové frézy 2550A.002 [56]

$\varnothing d_1 \pm 0,01$ [mm]	$r \pm 0,005$ [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	l_1 [mm]	$\varnothing d_3$ [mm]	l_4 [mm]	$\varnothing d_2$ [mm]	α [°]	β [°]	Z
2	1	3	8	57	1,8	20	6	12	6,5	2

Posledním nástrojem, který byl pro obrábění zvolen, je fréza opět kuželového typu, nyní tříbřitá (obr. 8-5), jejíž rozměry jsou v následující tabulce 8-6. Byla použita na dokončovací obrábění boků jednotlivých lopatek, a také na frézování jejich náběžných hran.



Obrázek 8-5 - Kuželová fréza 3440.04010A [51]

Tabulka 8-6 Rozměry kuželové frézy 3440.04010A [51]

$\alpha/2$ [°]	$r_{\pm 0,01}$ [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	l_1 [mm]	l_4 [mm]	d_{1m} [mm]	$\varnothing d_2$ [mm]	Z [-]
4	1	20	20	62	24	3,26	6	3

Kuželové frézy byly upnuty do tepelných upínačů DIN 69893-1 HSK-A63 od společnosti Haimer. Délka těla upínače je 200 mm, délka vyložení nástrojů byla stanovena na 30 mm. Tyto upínače poskytují vysokou přesnost obvodového házení.

Kulová fréza byla upnuta do hydraulického upínače od společnosti Schunk, jehož délka je rovněž 200 mm, a délka vyložení byla stanovena na 25 mm. Oba druhy upínačů s upínacím otvorem pro stopkové frézy o průměru 6 mm jsou na obr. 8-6.



Obrázek 8-6 - Tepelný upínač Haimer (vlevo) a hydraulický upínač Schunk (vpravo)

8.4.1 Řezné podmínky doporučené výrobcem

V katalogu nástrojů jsou ve skupině obráběných materiálů z neželezných kovů (označené písmenem N), uvedeny dva typy hliníkových slitin – tvářené a slévárenské. Materiál, ze kterého bude lopátkové kolo vyrobeno, se svými vlastnostmi nejvíce podobá materiálu EN AW-7022, který dle katalogu spadá do kategorie N 1.3, s mezí pevnosti $R_m \leq 550 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Doporučené hodnoty řezných podmínek jsou v tabulce 8-7.

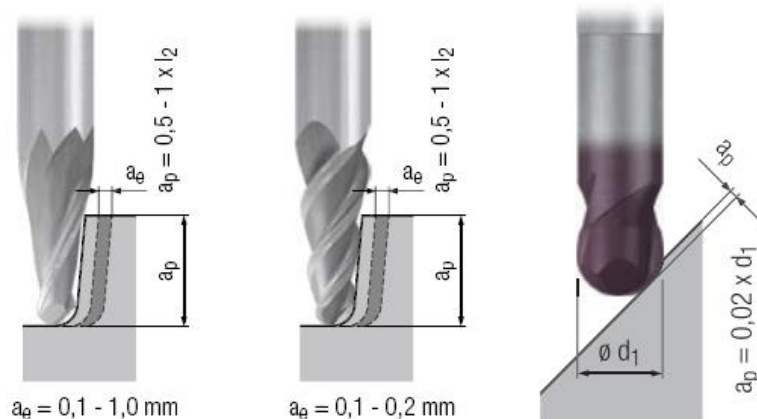
Tabulka 8-7 Doporučené hodnoty řezných podmínek [51]

nástroj	v_c [m*min ⁻¹]	f_z [mm]	n [min ⁻¹]	a_p [mm]	a_e [mm]
Kuželová fréza 3446.04010A	270	0,017	26363	10÷20	0,1÷1
Kulová fréza 2550A.002	1200	0,024	190986	0,04	-
Kuželová fréza 3440.04010A	180	0,012	17575	10÷20	0,1÷0,2

Počet otáček n se vypočte dle vztahu (7).

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d_m} \quad (7)$$

Kde d_m je průměr řezné části frézy měřený ve vzdálenosti a_p (pro kuželové frézy). Na obr. 8-7 jsou znázorněny axiální, resp. radiální hloubka řezu, a jejich hodnoty pro vybrané nástroje.



Obrázek 8-7 - Zobrazení axiální a_p a radiální a_e hloubky řezu a jejich hodnoty [51], [56]

Z důvodu omezeného výkonu stroje a pracovních otáček vřetene bylo však zapotřebí doporučené otáčky pro tyto nástroje redukovat, a to tím způsobem, že se snižovala řezná rychlost. Limitní počet otáček, který je obráběcí centrum schopné poskytnout, je 15 000 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Z tohoto důvodu byla stanovena řezná rychlost na 90 $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, a odpovídajících 14 324 $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$.

8.5 Tvorba NC programu

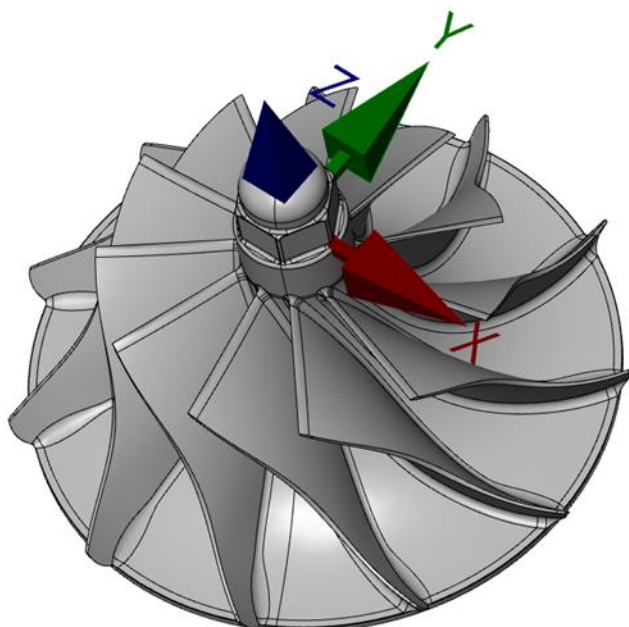
Před samotnou tvorbou NC programu je zapotřebí učinit jisté kroky, kterými bude jednoznačně definován celý proces.

Po importu CAD modelu do CAM prostředí, byl vytvořen model polotovaru s tolerancí 0,01 mm, vzniklý na základě profilu geometrie naimportovaného modelu, jak lze vidět z obrázku 8-8. Tolerance modelu je 0,005 mm.



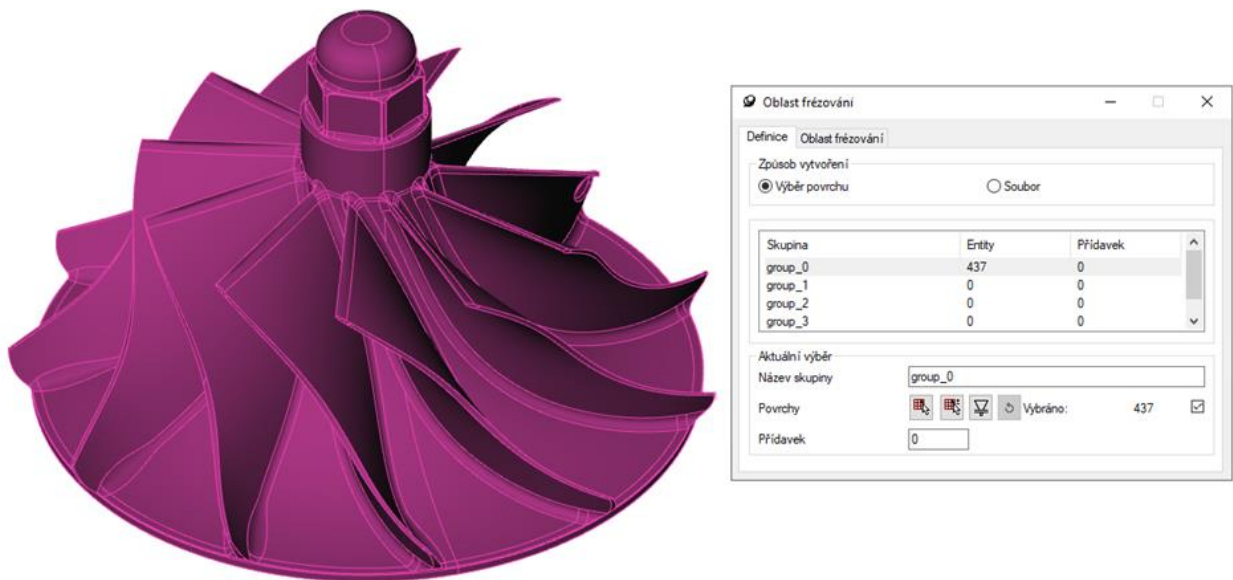
Obrázek 8-8 – Model polotovaru pro frézování

Následně byl stanoven nulový bod (NCS) souřadnicového systému polotovaru, pomocí tří bodů. Osa Z je totožná s osou otáčení modelu. Stanovený souřadnicový systém lze vidět na obrázku 8-9. Bezpečnostní rovina byla nastavena na 20 mm nad nulovým bodem.



Obrázek 8-9 - Stanovení souřadného systému pro seznam operací

Poté bylo nezbytné určit oblast frézování. V našem případě byl vybrán model celého lopatkového kola, sestávající se celkem z 437 entit (obr. 8-10).



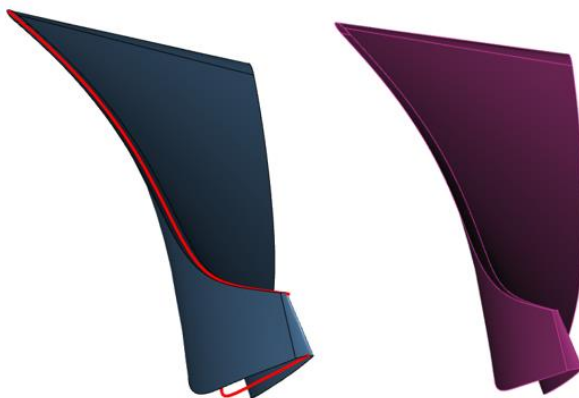
Obrázek 8-10 - Oblast frézování

Po učinění zmíněných kroků je možné přejít k samotné tvorbě programu.

8.5.1 Výběr geometrie

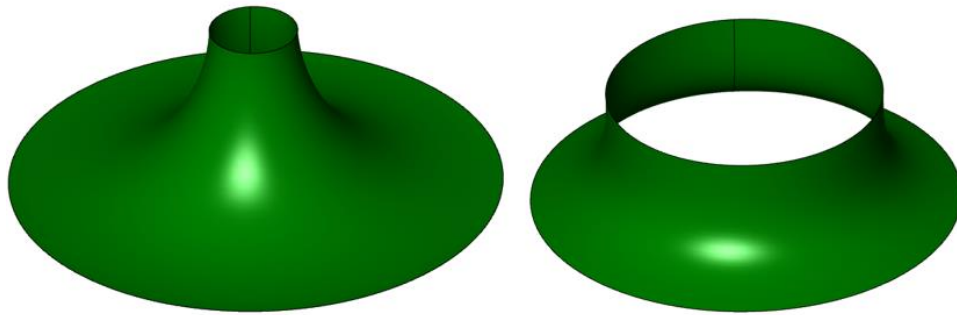
Nezbytným krokem pro správnou definici drah nástrojů je jednoznačné určení geometrie. Tato geometrie je pro všechny dále popsané operace totožná.

Nejprve se určí počet hlavních lopatek (11). Následuje výběr křivek skeletu lopatky, které vymezují tzv. ISO povrch. Tento povrch v dostatečné míře odpovídá zakřivení lopatky (červené křivky na obr. 8-11).



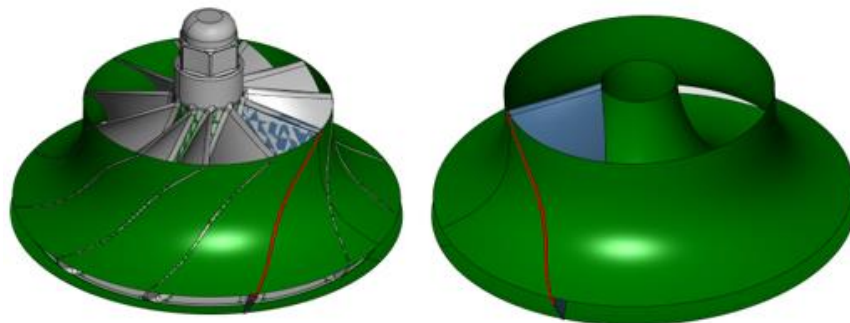
Obrázek 8-11 - Výběr Křivek skeletu a povrchu hlavní lopatky

Poté se určí povrch hlavních lopatek. Zde je to povrch skládající se z pěti NURBS ploch, jak je patrné na obrázku 8-11 vpravo. Následně se definuje povrch náboje a krycí povrch kola, představujících omezení oblasti frézování (obr. 8-12).



Obrázek 8-12 - Výběr povrchu náboje (vlevo) a krycího povrchu (vpravo)

Výsledná ohraničující geometrie frézovacích strategií je na obr. 8-13.



Obrázek 8-13 - Geometrie omezující frézovací strategie

8.5.2 Hrubovací frézování

Ve snaze o eliminaci, či alespoň částečnou redukci možného vzniku kmitavých pohybů lopatek, zapříčiněných obráběnou geometrií a relativně nízkými hodnotami některých materiálových vlastností (např. Youngův modul pružnosti), byl soubor následujících hrubovacích operací rozdělen do dvou vrstev.

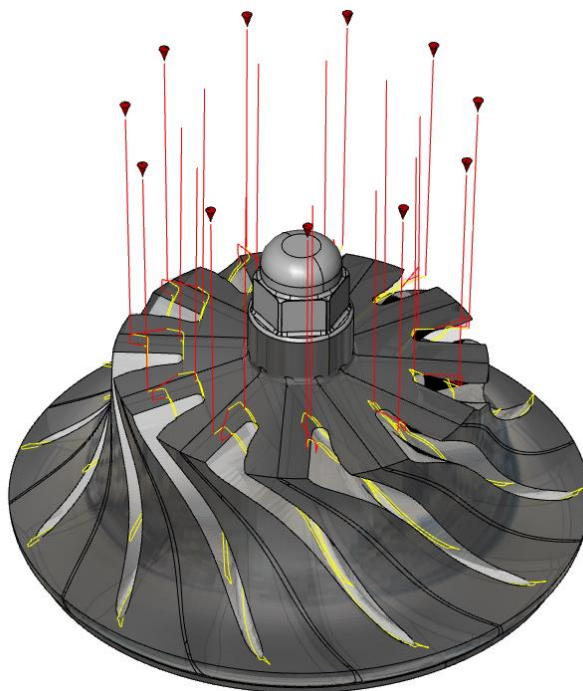
V prvním kroku byl proveden pouhý řez, otevírající kapsu v mezilopátkovém prostoru, navíc veden jen do jedné poloviny šířky lopatky (obr. 8-14), kvůli obavám z možné destrukce nástroje při větší axiální hloubce řezu do plného materiálu. Přísuv nástroje do řezu byl volen z náběžné hrany.

Parametry jednotlivých operací budou uvedeny vždy v tabulce u příslušné operace.

Tabulka 8-8 Parametry otevíracího řezu první poloviny kapsy

Max. krok [mm]	Přísuv [mm]	Přídavek náboje [mm]	Přídavek na lopatku [mm]	Ofset krytí [mm]	Ofset náboje [mm]
5	1	5	0,3	0	10

Tato operace je výhodná z hlediska lepšího odvodu třísek z místa řezu pro následující hrubovací operace. Z důvodu omezenosti sortimentu řezných nástrojů, byl použit identický nástroj, jako v následujících operacích, tedy dvoubřitá kuželová fréza, avšak obvykle je výhodné volit tužší frézy větších rozměrů s větším vrcholovým úhlem α .



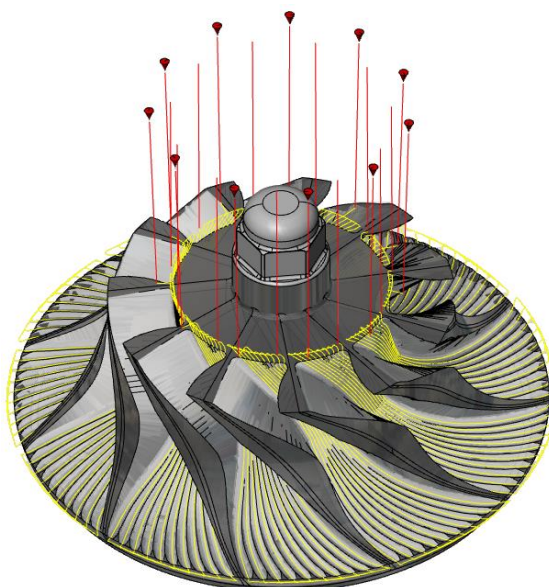
Obrázek 8-14 - Otevírací řezy první poloviny kapsy

Na obr. 8-14 je také možné vidět dráhy nástroje. Žluté dráhy představují pracovní posuv (funkce G1), červené dráhy představují rychloposuv (funkce G0), začínající v bodech, určujících bezpečnostní rovinu.

Následně byla vytvořena hrubovací operace, odebírající materiál rovněž pouze v jedné polovině šíře lopatek, se střídavým plynulým přísuvem z náběžné hrany (obr. 8-15).

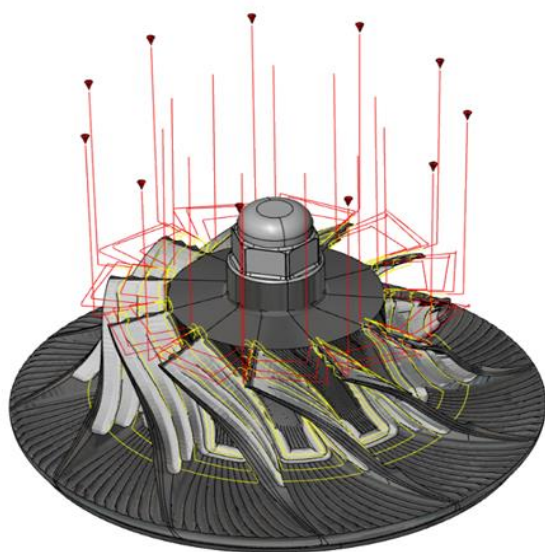
Tabulka 8-9 Parametry hrubování první poloviny kapsy

Max. krok [mm]	Přísuv [mm]	Přídavek náboje [mm]	Přídavek na lopatku [mm]	Ofset krytí [mm]	Ofset náboje [mm]
15	2	4	0,3	0	10

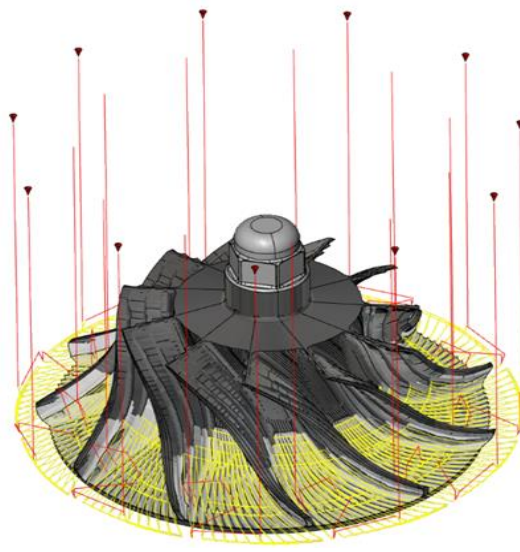


Obrázek 8-15 - Hrubování první poloviny kapsy

Z obr. 8-15 jsou patrné vrstvy nadměrného materiálu v oblastech okolo náběžné hrany a skeletu lopatky, který byl částečně odstraněn dvěma polohrubovacími operacemi horní a dolní poloviny kapsy v dalším kroku, obr. 8-16, 8-17.



Obrázek 8-16 - Polohrubování horní poloviny kapsy



Obrázek 8-17 - Polohrubování dolní poloviny kapsy

Tabulka 8-10 Parametry polohrubování horní poloviny kapsy

Max. krok [mm]	Přísuv [mm]	Přídavek náboje [mm]	Přídavek na lopatku [mm]	Ofset krytí [mm]	Ofset náboje [mm]
10	3	0,1	0,05	0	10

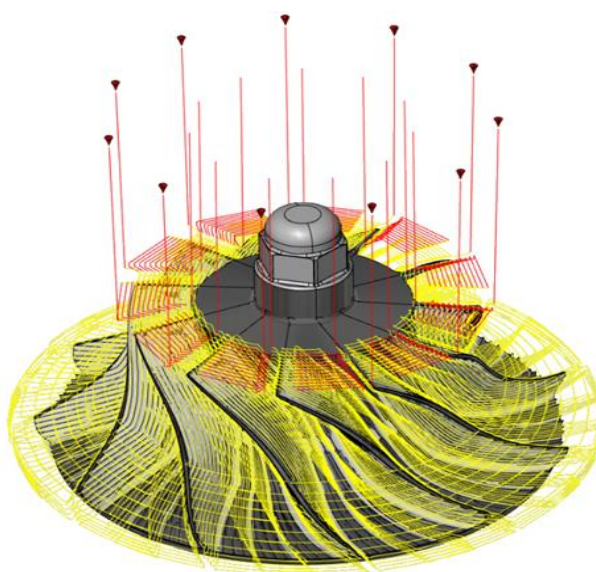
Tabulka 8-11 Parametry polohrubování dolní poloviny kapsy

Max. krok [mm]	Přísuv [mm]	Přídavek náboje [mm]	Přídavek na lopatku [mm]	Ofset krytí [mm]	Ofset náboje [mm]
2	3	0,1	0,05	0	10

Poslední hrubovací operací, provedenou v první vrstvě (vrstva do ½ šířky lopatky), bylo konečné polohrubování pro sjednocení přídavek. Vygenerované dráhy a polotovaru po této operaci jsou na obr. 8-18.

Tabulka 8-12 Parametry konečného polohrubování první poloviny kapsy

Max. krok [mm]	Přísuv [mm]	Přídavek náboje [mm]	Přídavek na lopatku [mm]	Ofset krytí [mm]	Ofset náboje [mm]
10	0,8	0,1	0,05	0	10

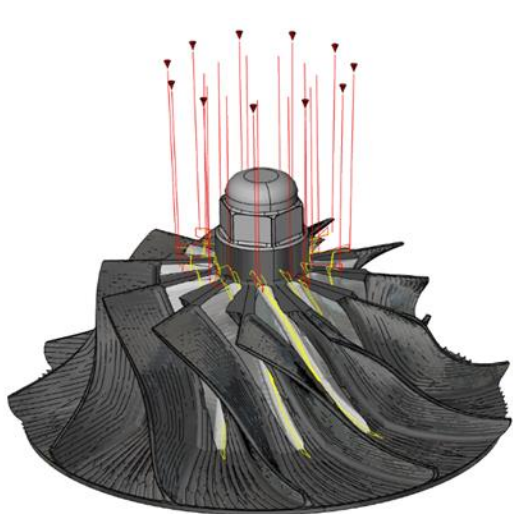


Obrázek 8-18 - konečné polohrubování první poloviny kapsy

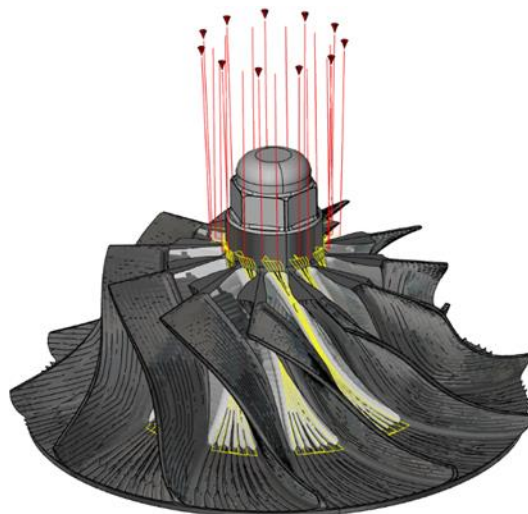
Nyní je jedna polovina kola vyhrubována se stejným přídavkem na náboji a lopatkách. Materiál v druhé, ještě neobrobené polovině kola (od středu šíře lopatky k náboji) po celou dobu obrábění první poloviny napomáhal k vyšší tuhosti polotovaru.

Následující operace jsou obdobou operací výše popsaných, tentokrát pro odebrání materiálu v druhé vrstvě. Opět byl jako první proveden otevírací řez (obr. 8-19), a následné hrubování druhé poloviny mezilopatkové kapsy, obr. 8-20. V obou případech byla zvolena strategie frézování ofset krytí-první dráha (kap. 8.2.1), kdy je záběr rozdělen dle zadané hodnoty přísuvu

jako ofset od první dráhy (pouze v případě otevíracího řezu, neboť při hrubování byla zvolena hodnota přísluvu tak, že nástroj odebral materiál pouze na jeden záběr). Přísluv byl opět volen z náběžné hrany s plynulou střídavou strategií.



Obrázek 8-19 - Otevírací řez druhé poloviny kapsy



Obrázek 8-20 - Hrubování druhé poloviny kapsy

Tabulka 8-13 Parametry otevíracího řezu druhé poloviny kapsy

Max. krok [mm]	Přísluv [mm]	Přídavek náboje [mm]	Přídavek na lopatku [mm]	Ofset krytí [mm]	Ofset náboje [mm]
1	5	0,3	0,3	10	20

Tabulka 8-14 parametry hrubování druhé poloviny kapsy

Max. krok [mm]	Přísluv [mm]	Přídavek náboje [mm]	Přídavek na lopatku [mm]	Ofset krytí [mm]	Ofset náboje [mm]
2	15	0,3	0,3	10	20

Polohrubování nebylo nyní rozděleno na horní a dolní polovinu, jako tomu bylo v předchozí polohrubovací operaci, neboť objem přebytečného materiálu není již tak značný.

Naproti tomu byl volen menší přísluv, a tím vzniklo více drah ve směru osy Z, obr. 8-21. Strategie frézování je tentokrát realizována jako ofset od poslední dráhy.

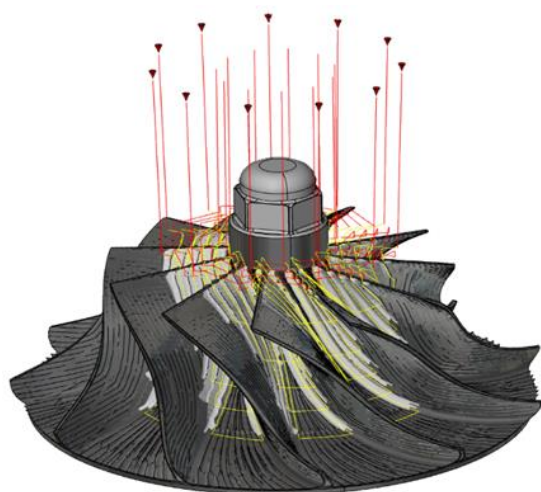
Tabulka 8-15 Parametry polohrubování druhé poloviny kapsy

Max. krok [mm]	Přísluv [mm]	Přídavek náboje [mm]	Přídavek na lopatku [mm]	Ofset krytí [mm]	Ofset náboje [mm]
10	2	0,1	0,05	10	20

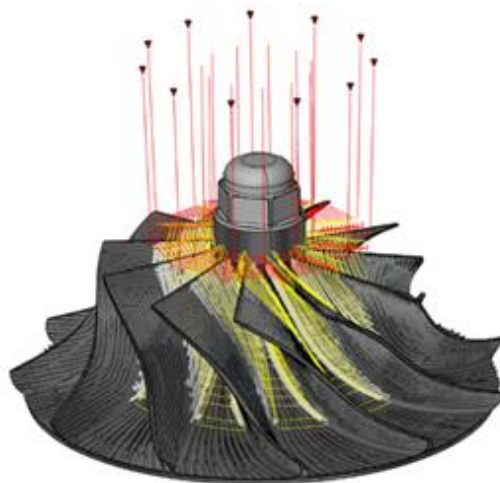
Závěrečným cyklem z bloku hrubovacích strategií bylo konečné polohrubování druhé poloviny mezilopatkové kapsy s ještě menším přísuvem, opět za účelem sjednocení přídávku, zejména na bocích lopatek, obr. 8-22.

Tabulka 8-16 Parametry konečného polohrubování druhé poloviny kapsy

Max. krok [mm]	Přísuiv [mm]	Přídavek náboje [mm]	Přídavek na lopatku [mm]	Ofset krytí [mm]	Ofset náboje [mm]
10	0,8	0,1	0,05	10	20



Obrázek 8-21 - Polohrubování druhé poloviny kapsy



Obrázek 8-22 - Konečné polohrubování druhé poloviny kapsy

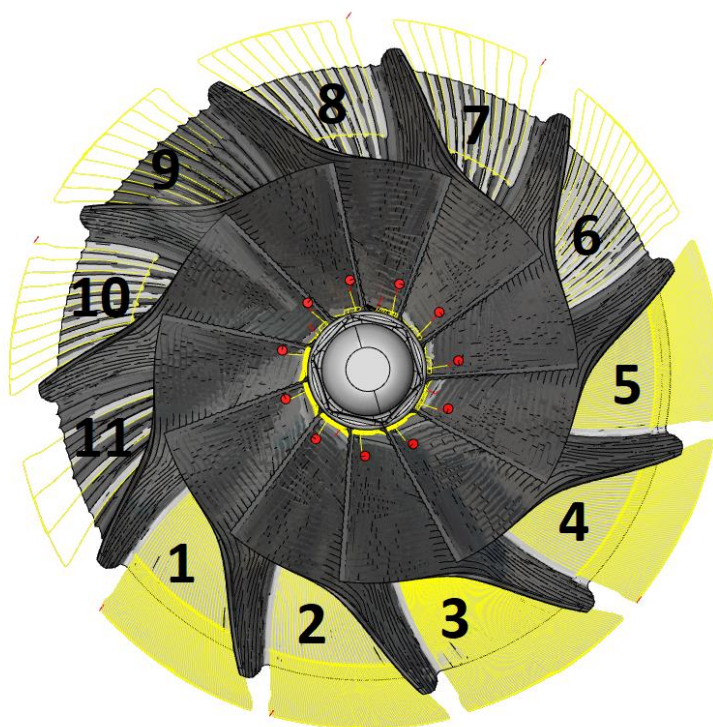
Hrubovací operace byly vytvořeny na jedné lopatce a následnou transformací přes kruhovou síť rozkopírovány na zbylé lopatky. Celkový čas všech hrubovacích operací je 1 hodina 52 minut 37 sekund. Na takto vyhrubovaný polotovár byly nasazeny dokončovací operace.

8.5.3 Dokončovací frézování náboje

V této operaci, kdy byl postupně obráběn náboj jednotlivých mezilopatkových kapes kulovou frézou, již docházelo k různým modifikacím, co se parametrů procesu týče (obr. 8-23). Frézovací strategie je ve všech kapsách stejná, tj. kompletní obrábění (kap. 7.2.2., obr. 7.6) s možností optimalizování drah. Stejně tak i poloha přísuvu z náběžné hrany s plynulou střídavou strategií přísuvu. Přídavek na náboj je nulový.

U první kapsy bylo využito optimálního rozložení drah na odtokové hraně. Kvůli výskytu kolizí v okolí místa zaoblení u odtokové hrany byly vynechány poslední dráhy této strategie. Přísuiv byl odvozen na základě zadaných hodnot o drsnosti povrchu, které se pohybují v rozmezí

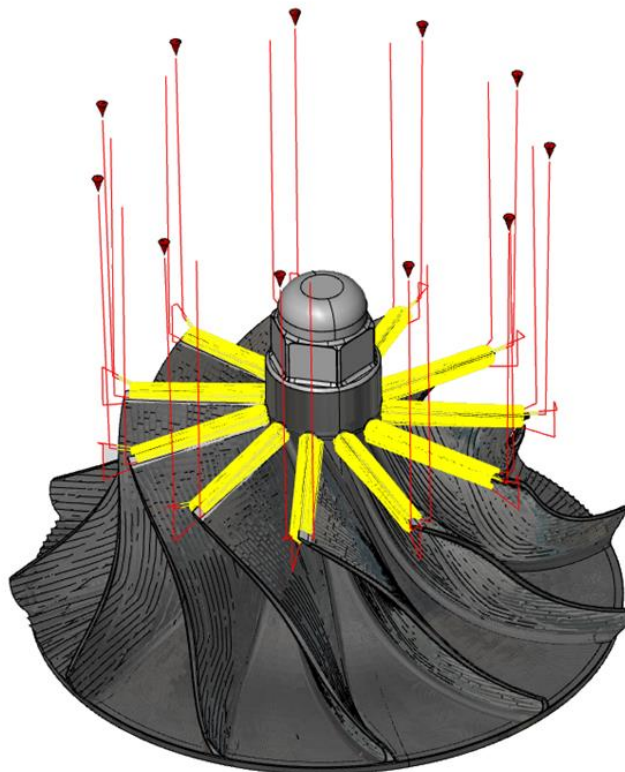
0,01±0,005 (hodnotu určující minimální výšku nerovnosti povrchu je možné zadávat pouze s aktivní optimalizací drah na odtokové hraně). Ve druhé kapse zůstaly parametry obrábění nezměněny. Jediný rozdíl oproti předchozí kapse je v tom, že byla změněna tolerance obrábění z 0,05 na 0,01 mm. V podstatě jde o přesnost, se kterou je proveden výpočet drah při jejich vytváření. Od kapsy 2 do kapsy 11 (vyjma kapsy 9, u které bylo dno úmyslně nedokončeno), byla tato hodnota již nezměněna. U kapsy 3 nebylo využito optimalizace drah. Maximální výška nerovnosti povrchu má hodnotu 0,01. Náboj kapsy 4 byl obroben se záporným přídavkem o velikosti -0,05 mm. V pátém případě byl přídavek ještě snížen, a to na hodnotu -0,1 mm. Dokončování dna s konstantním přísuvem o velikosti maximálního kroku 1,5 mm proběhlo u lopatky 6. Dno lopatky 7 bylo obrobena optimalizovanou strategií drah, nyní však s maximálním krokem 2 mm a minimálním krokem 1 mm. Dráhy v 8. a 10. případě jsou s dráhami u lopatky 7 totožné. Dokončení poslední kapsy proběhlo s krokem o maximálním přísuvu 4 mm.



Obrázek 8-23 – Půdorysné zobrazení drah pro jednotlivá dna mezilopatkových kapes

8.5.4 Frézování náběžné hrany

Další operací obsaženou v NC programu, je frézování náběžných hran (obr. 8-24). K tomuto účelu byla využita tříbřitá kuželová fréza.



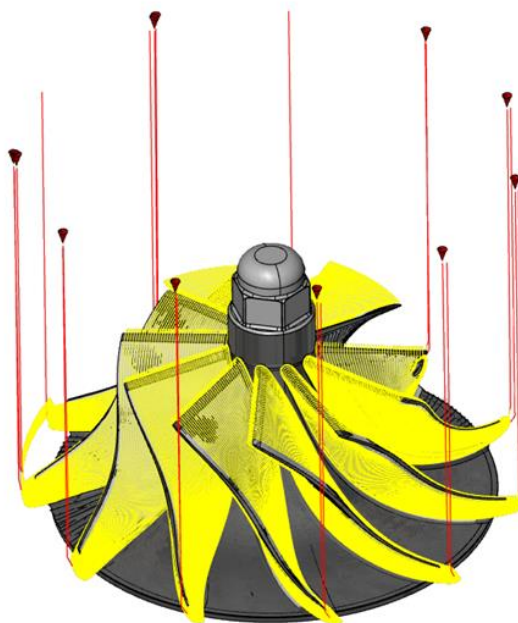
Obrázek 8-24 - Frézování náběžných hran

U této operace není výběr strategie obrábění tak rozličný, jako tomu bylo v operacích předchozích. Jedinou možností volby je u strategie přísuvu, kdy přísuv nástroje může být buď jednosměrný, či střídavý. Aby se předešlo možnému vzniku vibrací na hranách lopatky, způsobených značně sníženou tuhostí obrobku po hrubovacích operacích, byl zvolen přísuv jednosměrný, s tlačným posuvem nástroje. Náběžné hrany všech lopatek byly obrobena s hodnotou výšky nerovnosti povrchu 0,01, udávající přísuv (vyjma lopatky 6, zde byla hodnota výšky nerovnosti povrchu 0,005). Tolerance obrábění má hodnotu 0,01 mm u všech lopatek.

Při samotné tvorbě drah vznikaly kolize, kdy nástroj odebíral materiál i ze samotného modelu kola, což je nepřijatelný stav. Tento problém se vyřešil vhodnou úpravou náklonu nástroje vzhledem k povrchu lopatky. Úhel náklonu byl zvolen 20°. Rovněž bylo zapotřebí změnit hodnotu úhlu náklonu kolébky stroje z přednastavených 90° na 110° (osa rotace A).

8.5.5 Bodové frézování lopatek

Při dokončovacím frézování boků lopatek dojde k úběru většího objemu materiálu než u frézování náběžných hran. Proto je z důvodu snížení rizika pro výskyt vibrací, které mají nepříznivý vliv na kvalitu již obrobené plochy a zachování vyšší tuhosti lopatek, bodové frézování až na tomto místě (obr. 8-25).



Obrázek 8-25 - Bodové frézování lopatek

Z omezenosti pracovním prostorem byl přísuv s plynulou strategií v tomto případě volen od vlečné hrany, a to u všech lopatek. Tolerance obrábění byla u lopatek 1 až 8 shodná, s hodnotou 0,01 mm. U lopatek 10 a 11 měla hodnotu 0,05 mm. Pro porovnání výsledků obrábění nebyl u lopatky 9 vytvořen NC soubor. Radiální vzdálenost mezi jednotlivými drahami byla u všech lopatek určena hodnotou výšky nerovnosti povrchu. Tato hodnota byla pro jednotlivé lopatky následující:

Lopatky 1, 3, 4, 5, 7, 10, 11 - max. výška nerovnosti 0,03

Lopatky 2, 8 - max. výška nerovnosti 0,01

Lopatka 6 - max. výška nerovnosti 0,005

Dále byla pro lopatky 8 a 10 aktivována možnost frézování v režimu kapes (kap. 8.2.4), aby bylo možné porovnat časovou náročnost operace oproti klasickému bodovému frézování obou povrchů jedné lopatky. Z důvodu vznikajících kolizí, kdy nástroj najížděl do dna modelu, byl u lopatek zvolen přídavek na náboj. Jeho hodnoty jsou pro tyto lopatky následující:

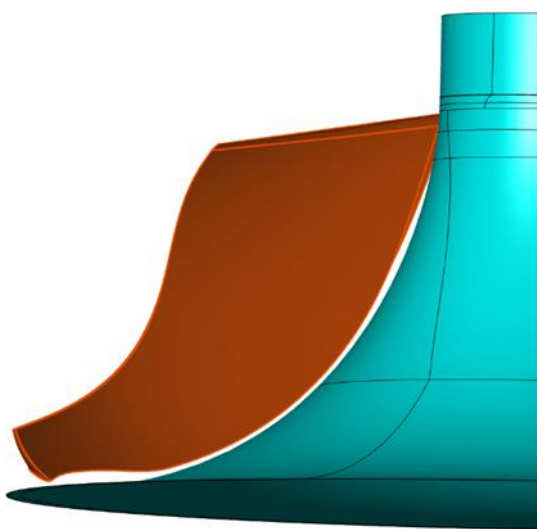
Lopatky 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11 - 0,25 mm

Lopatka 6 - 0,3 mm

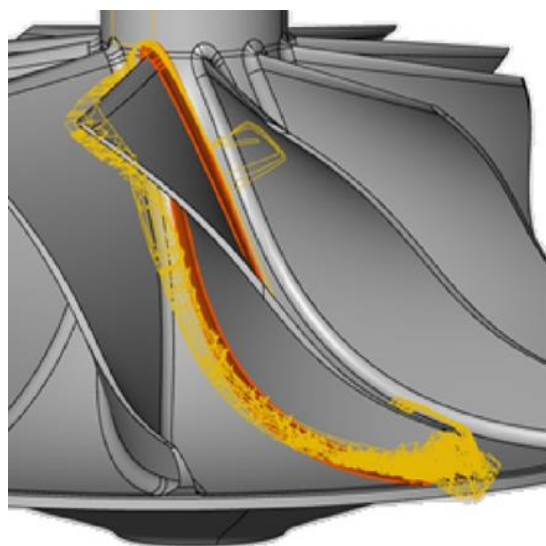
Bodové frézování boků u lopatky 7 proběhlo bez chlazení.

8.5.6 Frézování zaoblení

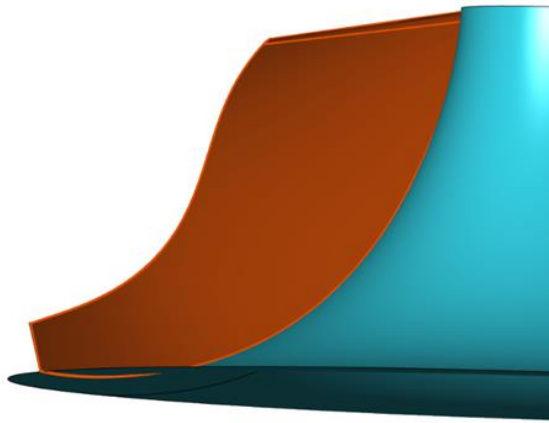
Poslední operací tvořící NC program, která je v tomto procesu nezbytná, je frézování zaoblení mezi lopatkou a nábojem kola. Při snaze o vytvoření drah pro obrobení rádiusů software tyto dráhy generoval značně chaoticky (obr. 8-27), ačkoli geometrie pro tvorbu této operace byla zadána správně. To bylo způsobeno chybou v modelu, neboť lopatka s nábojem kola netvoří jeden celistvý model (obr. 8-26). Proto bylo zapotřebí nejprve v CAD prostředí lopatku upravit, a to tím způsobem, že se zkonstruovaly tečně navazující plochy na stávající lopatku, které již přilnuly k povrchu náboje (obr. 8-28).



Obrázek 8-26 - Chyba v modelu lopatkového kola



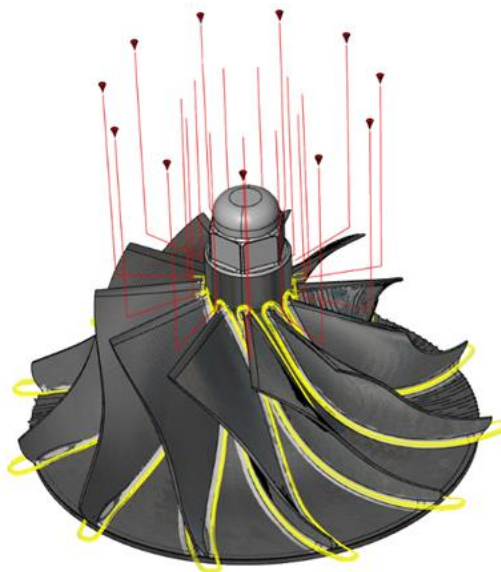
Obrázek 8-27 - Chybně vygenerovaná dráha pro frézování zaoblení



Obrázek 8-28 - Upravený model lopatkového kola

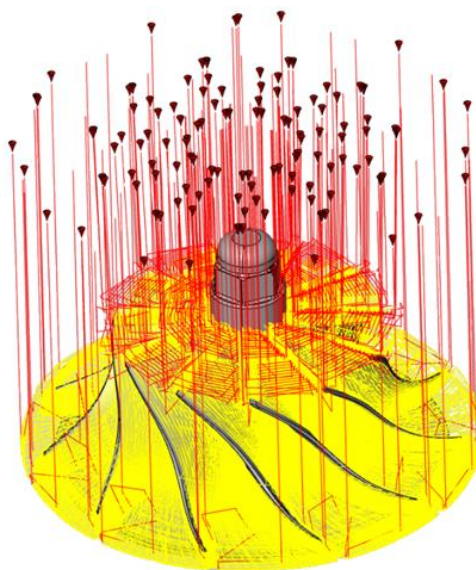
Po takto utvořené modifikaci již software dokázal správně vygenerovat nástrojové cesty, jak je patrné z obr. 8-29. Výskyt kolizí při tvorbě drah byl odstraněn změnou úhlu náklonu tak, jak tomu bylo i v případě frézování náběžné hrany.

Poloha přísuvu byla volena u všech lopatek od náběžné hrany, neboť vzdálenost od bezpečnostní roviny do řezu je tak kratší, než kdyby byla poloha přísuvu volena od hrany odtokové. Tím se zkrátí celkový čas, potřebný pro vykonání této operace. Nástroj se pohyboval po dráze ve tvaru šroubovice, která začíná u lopatky a je vedena směrem k náboji, tj. strategie přísuvu „spirálovitě dolů“. Tolerance obrábění je u všech lopatek totožná - 0,005 mm. Stejně tak i hodnota maximální výšky nerovnosti povrchu, určující radiální vzdálenost mezi jednotlivými drahami – 0,01 mm. Přídavky na náboji a lopatce jsou nulové. U lopatky 8 nebyl vytvořen NC soubor, aby bylo možné pozorovat změnu povrchu po aplikaci této operace.



Obrázek 8-29 - Frézování zaoblení

Po vytvoření bezkolizního NC programu pro frézování lopatkového kola a jeho verifikaci, byly data z CAM systému postprocesorem převedeny do datového jazyka CNC centra. Všechny použité operace, potřebné pro výrobu lopatkového kola lze vidět na obr. 8-30.



Obrázek 8-30 – Zobrazení frézovacích operací

8.6 Realizace výroby lopatkového kola

Vstupní polotovar byl dodán ve formě přířezu z kruhové tyče lisované o průměru 90 mm. Následně ještě bylo zapotřebí vytvořit NC program pro vysoustružení polotovaru do požadovaného tvaru (vnější kontura lopatky dle obr. 8-8). Tohoto problému se ujal vedoucí diplomové práce, Ing. Jiří Sommer. Tvorba programu probíhala v softwaru Autodesk Fusion 360, od společnosti Autodesk, Inc. Strojem, na kterém soustružení probíhalo, je OKUMA GENOS L200 E-M. Předsoustružený polotovar pro následné frézovací operace lze vidět na obr. 8-31.



Obrázek 8-31 – Předsoustružený polotovar

Následně byly na válcové části polotovaru vyfrézovány drážky pro jeho upnutí do svěráku. Upnutý polotovaz lze vidět na obr. 8-32.



Obrázek 8-32 - Upnutí polotovaru pro následné frézování

Před samotným spuštěním programu bylo ještě zapotřebí v řídicím systému sestavit nástroje a zaměřit je. To se provedlo nástrojovou sondou, měřící délkou nástrojů. Poté se musel zaměřit i obrobek, aby bylo obrábění přesné. To se provedlo obrobkovou bezdrátovou sondou, kterou je definován i hlavní souřadnicový systém. Preventivně proběhlo i odzkoušení programu „naprázdno“, tedy proces, kdy nebyl upnut polotovaz na pracovním stole a byly sledovány pouze dráhy nástroje a polohování stolu.

Vzápětí byla potřeba zahřát vřeteno dle štítku od výrobce, neboť po celou dobu chodu stroje pracovalo s téměř maximálními otáčkami. Zahřívání bylo provedeno nejprve setrváním na $4\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ po dobu 10 minut, poté se otáčky navýšily na $9\,000\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$, rovněž po dobu 10 minut. Po zahřátí vřetene bylo možné polotovaz upnout a začít frézovací proces. Některé operace z reálného procesu lze vidět na následujících obrázcích.



Obrázek 8-33 – Hrubování - otevírací řez



Obrázek 8-35 - Vyhrubované lopatkové kolo



Obrázek 8-34 - Polohrubování první poloviny



Obrázek 8-36 - Dokončené lopatkové kolo

8.7 Vyhodnocení výsledků

Po skončení frézovacího cyklu bylo možné přejít k vyhodnocení výsledků. Vzniklé nedostatky na povrchu lopatek jsou součtem tuhostí nástroje a obrobku, iniciujících výskyt vibrací, kinematikou a dynamikou CNC obráběcího centra, řeznými podmínkami aj. Na lopatce č. 1 (obr. 8-37) lze pozorovat vzniklé rýhy v náboji kola po nástroji. Důvodem je s největší pravděpodobností špatně zvolený přídavek na náboj v hrubovacích operacích, který činil 0,1 mm. Dále má na vzniku těchto rýh podíl i zadaná hodnota tolerance (0,05 mm) samotného

obrábění při dokončovacím frézování. Z obrázku 8-37 je rovněž patrna oblast u odtokové hrany, lišící se svým povrchem od zbytku plochy lopatky. Této změně je přisuzován fakt, že při spuštění programu byly nedopatřením zaměněny řezné nástroje, tudíž bok lopatky byl v tomto případě obroben kulovým nástrojem, který má menší tuhost než nástroj kuželový. V důsledku toho došlo k výskytu vibrací, které zapříčinily lokální obrobení samotného modelu lopatky.

V náboji lopatky č. 2 (obr. 8-38) lze vidět ty samé stopy po nástroji, jako u lopatky č. 1, avšak ne tak hluboké. Opět je to způsobeno malým přídavkem na náboj v hrubovacích operacích. Mělké dráhy jsou způsobeny zmenšením tolerance obrábění, která oproti předchozí lopatce činila 0,01 mm. Povrch lopatky se zdá být v pořádku. Hodnota maximální výšky nerovnosti udávající přísluv, zde byla snížena na 0,01.

U lopatky č. 3 (obr. 8-39) je oproti předchozí lopatce znatelný rozdíl u náběžné hrany. Ta byla namísto kulovou frézou obrobena frézou tříbřitou kuželovou, se stejným přísluvem.

Náboj u lopatky č. 4 (obr. 8-40) již není poškozen stopami po nástroji z hrubovacích operací. Stalo se tak kvůli zápornému přídavku na náboji -0,05 mm (tudíž byla záměrně odebrána vrstva ze samotného modelu). Zároveň je možno vidět na náboji stopy po nástroji u odtokové hrany, způsobené optimalizovanou frézovací strategií. Zavádějící jsou zde však rýhy na povrchu lopatky v blízkosti rádiusu. Ty však vznikly špatným vygenerováním nástrojových drah, kdy zde namísto kuželové tříbřité frézy byla použita fréza kulová. Podstata proč se tomu tak stalo, je ovšem neznámá, neboť kromě změny nástroje jsou všechny ostatní parametry totožné s dokončovacím frézováním předchozí lopatky.

Lopatka č. 5 (obr. 8-41) společně s lopatkou č. 4 mají nejlépe obroběný povrch náboje. Kromě ještě většího záporného přídavku (-0,1 mm) pro odstranění rýh v náboji zde nedošlo k žádné jiné úpravě.

Lopatka č. 6 vykazuje nejlepší povrch (obr. 8-42). To je dáno extrémně nízkou hodnotou maximální výšky nerovnosti určující přísluv (0,005). Na povrchu lopatky tak bylo vytvořeno velké množství sousedních drah, díky kterým má povrch nejlepší drsnost. Obdobně tomu tak je i u náběžné hrany. To se však neblaze projeví na výrobním čase, kdy dokončování boků této lopatky trvalo o celých 10 minut déle, než u lopatky č. 5, u které byl čas softwarem vypočten na 7 minut 27 sekund.

Dna u lopatek 7 (obr. 8-43), 8 (obr. 8-44) a 10 jsou obrobena se stejným maximálním krokem 2 mm. Lopatka č. 9 (obr. 8-45) má obrobenu pouze náběžnou hranu a zaoblení mezi lopatkou a nábojem. Boky lopatek 19, 10 a 11 jsou pouze vyhrubovány.

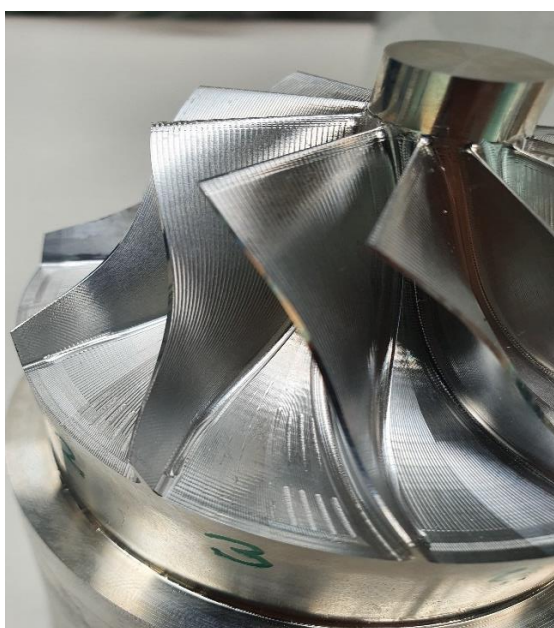
Naměřené hodnoty drsností povrchu vybraných lopatek lze nalézt v příloze 3. Rozdíl skutečných časů a časů vypočtených softwarem hyperMILL je způsoben tím, že software do výpočtu nezahrnuje časy potřebné pro polohování obrobku, výměnu nástrojů a také tím, že na začátku spuštění programu na obráběcím centru byl chvilkově snížen posuv na 70 %.



Obrázek 8-37 - Lopatka č. 1



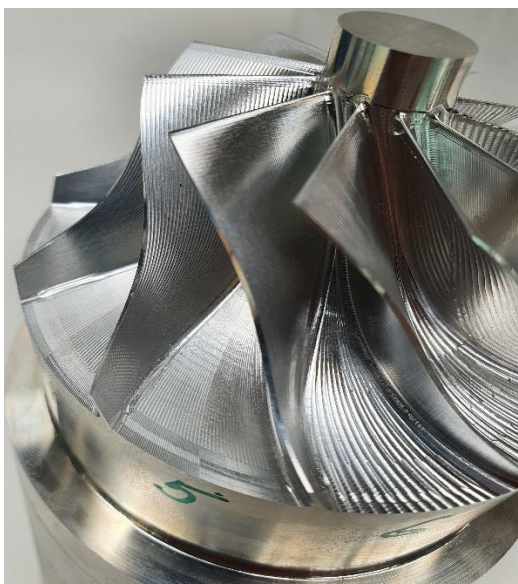
Obrázek 8-38 - Lopatka č. 2



Obrázek 8-39 - Lopatka č. 3



Obrázek 8-40 - Lopatka č. 4



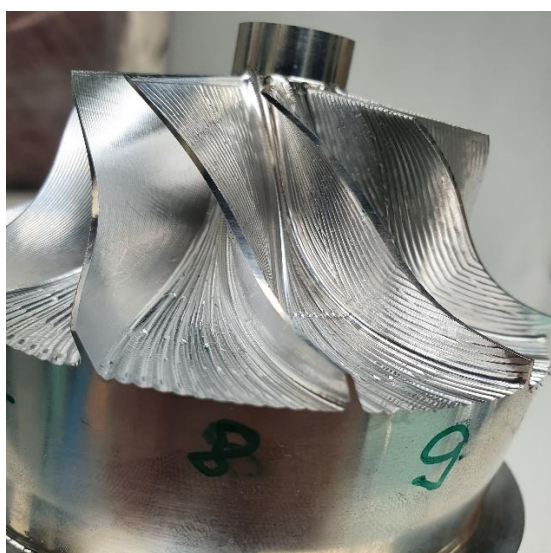
Obrázek 8-41 - Lopatka č. 5



Obrázek 8-42 - Lopatka č. 6



Obrázek 8-43 - Lopatka č. 7



Obrázek 8-44 - Lopatka č. 8



Obrázek 8-45 - Lopatka č. 9

9 Závěr

Ačkoli je problematika výroby lopatkových kol za pomoci technologie víceosého frézování známa již řadu let, volně přístupných publikací, zabývajících se právě touto problematikou, je poskromnu. Navíc drtivá většina těchto dostupných zdrojů se zabývá pouze experimentálním měřením určitých parametrů během tohoto procesu (především stanovení rezných podmínek, jakosti, drsnosti, teploty, řezné síly aj.) v závislosti např. na obráběném materiálu, či tvaru, rozměrech a materiálu řezného nástroje. Chybí tak ucelenější zásady, kterých je třeba se během třískového obrábění lopatkových kol držet.

Teoretická část této práce nabízí přehled o použitelnosti lopatkových kol v různých odvětvích průmyslu. V úvodu práce je vysvětlen princip proudového motoru a turbodmychadla, ve kterých se lopatková kola nacházejí a mají zásadní vliv na jejich účinnost. Dále jsou popsány jednotlivé typy těchto kol a materiály, ze kterých jsou kola vyráběna. Následně je zde vysvětlena problematika víceosého frézování a progresivní strategie obrábění, které jsou s touto technologií spojené – jedná se o HSC, HFC, HPC frézování. Dále jsou popsány strategie frézování pro výrobu lopatkových kol. Další kapitola je věnována progresivním nástrojům, používaných při výrobě těchto dílců. Posléze je zde vysvětlen řetězec CAD/CAM/CNC, představující jakýsi sled operací od návrhu modelu, až po jeho samotnou výrobu, a také způsoby jeho optimalizace. Závěrečná kapitola teoretické části je věnována CAD/CAM softwaru *hyperMILL*. Blíže pak vysvětlení frézovacích strategií v modulu pětiosého frézování.

Praktická část byla postavena na návrhu výroby experimentálního radiálního kompresorového kola z hliníkové slitiny EN AW 7075 T6511. K tomu bylo zapotřebí seznámení se s výše zmíněným softwarem a vytvoření bezkolizního NC programu pro jeho výrobu. Z důvodu tvarové složitosti tohoto kola, byla vytvořena posloupnost hrubovacích a polohrubovacích operací, za účelem sjednocení přídavek. Vzápětí byly aplikovány dokončovací operace a jejich vyhodnocení. Výstupem této práce je fyzický model obrobeneho prototypového kola. Ten se však oproti poskytnutému CAD modelu liší, neboť předmětem práce bylo navrhnout strategie pro výrobu lopatek, nikoliv spodní plochy, či hlavy nad lopatkami.

Dle vyhodnocených výsledků zde uvádím některá doporučení, která by mohla být v budoucnu přínosem pro podobné práce zabývajících se touto problematikou. V první řadě bych při hrubovacích operacích doporučil volit větší přídavek na náboj (0,2-0,3 mm), aby nenastala situace jako u lopatek 1 až 3, kde v náboji kola vznikly rýhy po hrubovacím nástroji, a také zkusit zvýšit přídavek při polohrubování. Dalším doporučením je, pokud to geometrie kola umožňuje, použití inovativních soudečkových nástrojů. Ty mohou díky volbě větší axiální hloubky řezu urychlit hrubovací operace. Rovněž pokud to geometrie dovoluje, je výhodnější frézovat lopatky bokem těchto nástrojů, a to jak z časového, tak i kvalitativního hlediska. To však u toho lopatkového kola nebylo možné. Závěrem bych doporučil možnost optimalizace řezných podmínek a použití více nástrojů, čímž by se mohlo zabránit výskytu vibrací, které při obrábění odtokových hran lopatek vznikaly.

10 Seznam použité literatury

- [1] PLŠEK, P. *Lopatkové stroje* [online]. Brno, 2013. Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Brno, Sokolská. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z WWW: http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_09-01.pdf
- [2] ŠKORPÍK, Jiří. *Lopatkový stroj*, Transformační technologie, 2009-08, [last updated 2018-09-26]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/11.html>
- [3] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Lopatkové stroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 8072042971.
- [4] WIKIPEDIA: The Free Encyclopedia. Jet engine [online]. [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Jet_engine#/media/File:Turbofan_operation_lbp.svg
- [5] GONGOL, J. Návrh malého proudového motoru do 1kN tahu [online]. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65773
- [6] Garrett motion. Turbo Tech 102 | Advanced: Understanding Air Flow [online]. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: https://www.garrettmotion.com/wp-content/uploads/2019/10/GAM_Turbo-Systems-102_Advanced.pdf
- [7] GRYGAŘÍK, V. Návrh turbínové skříně pro diagonální turbínové kolo [online]. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/reader/44402944>
- [8] Oil consumption caused by unfavourable operating conditions for turbocharger [online]. [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www.ms-motorservice.com/en/technipedia/post/oil-consumption-caused-by-unfavourable-operating-conditions-for-turbocharger/>
- [9] KŘEČEK, M. Racionalizace výroby odlitku turbodmyhadla [online]. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66286/F2-DP-2016-Krecek-Michal-DP_Michal_Krecek.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [10] BorgWarner. Design and function of a turbocharger: Compressor [online]. [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <http://www.turbos.bwauto.com/en/products/turbochargerCompressor.aspx>
- [11] SOROKES, J. M. Selecting a Centrifugal Compressor [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.aidhe.org/sites/default/files/cep/20130644.pdf>
- [12] Dr. Bertold Engels. Lifetime prediction for Turbocharger Compressor Wheels - Why Use Titanium? BorgWarner Turbo Systems. [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://www.turbos.bwauto.com/tools/download.aspx?t=document&r=107&d=109>
- [13] MakeitFrom – Euronorm (EN) Cast Aluminium. [online]. [cit-2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-AC-45300-ALSi5Cu1Mg-Cast-Aluminum>
- [14] 10 Ways to Improve Your Impeller. [online]. [cit-2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.pumpsandsystems.com/10-ways-improve-your-impeller>
- [15] Impellers. www.industrialpumpsindia.com [online]. [cit-2020-04-06]. Dostupné z: <http://www.industrialpumpsindia.com/impellers.html>
- [16] Closed impeller. www.3dmetalforge.com [online]. [cit-2020-04-06]. Dostupné z: <https://3dmetalforge.com/en/portfolio-item/impeller-closed/>
- [17] DOMANSKÝ, D. Návrh kompresoru turbodmychadla [online]. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. [cit. 2020-04-8]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/8329/83f44c20bc0e19cb4e305c5d84900712c660.pdf>
- [18] Nuclear Power. Types of Impellers in Centrifugal Pumps. [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/centrifugal-pumps/impeller-types-of-impellers/>
- [19] LEUFVÉN, O. Compressor Modeling for Control of Automotive Two Stage Turbochargers [online]. Linköping, 2010. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:389592/FULLTEXT01.pdf>

- [20] ŠOCHMAN, F. Jednorozměrný model průtoku radiálním kompresorem [online]. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/80fc/cf7c893d6da69d56e77d9c4c502062f429f9.pdf>
- [21] Smith, A. Turbo Technologies. Advances in Turbocharger Impeller Materials. [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: http://caboturbo.nl/wp/wp-content/uploads/2012/03/HTi_07.pdf
- [22] Azo Materials. Aluminium/Aluminium 2618 Alloy (UNS A92618). 2012 [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6617>
- [23] CarTech. Auto Books & Manuals. ANATOMY OF TURBOCHARGER: WHAT'S INSIDE AND HOW IT WORKS. 2015 [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.carttechbooks.com/techtips/anatomy-of-a-turbocharger-whats-inside-and-how-it-works>
- [24] MakeitFrom – Grade C-5 Cast Titanium. [online]. [cit-2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Grade-C-5-Cast-Titanium>
- [25] MakeitFrom – Nickel Alloy 718 (NO7718, NA51). [online]. [cit-2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Nickel-Alloy-718-NO7718-NA51>
- [26] E. hosseini, V.A. Popovich. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718. 2019 [online]. [cit-2020-04-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221486041930226X>
- [27] POKORNÝ, P., KUBEK, A. Problematika opotrebenia pri 5-osovom frézovaní [online]. [cit-2020-04-17]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/16378/1/Kubek.pdf>
- [28] WayKen Rapid Manufacturing. 3 Aspects of 5-Axis CNC Machining. 2020 [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z <https://www.waykenrm.com/5-axis-cnc-machining.html>
- [29] APRO, Karlo. Secrets of 5-axis machining. New York: Industrial Press, c2009. ISBN 978-0-8311-3375-7.

- [30] BRYCHTA, J., SADÍLEK, M., ČEP, R., PETRŮ, J. Progresivní metody v obrábění [online]. Ostrava, 2011. Studijní opora. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/10240/1/DP_Bouril_2013.pdf
- [31] 4-axis machining center. [online]. [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/34384/ko%C5%88a%C5%99%C3%ADk_2015_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [32] 4 Axis CNC Machining in 2020: The Definitive Guide. 2020 [online]. [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://www.cnccookbook.com/4-axis-cnc-in-2020-the-definitive-guide/>
- [33] Boz, Y., Erdim, H., Lazoglu, I. Modeling Cutting Forces For 5-Axis Machining of Sculptured Surfaces. MITSUBISHI ELECTRIC RESEARCH LABORATORIES. 2011 [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://www.merl.com/publications/docs/TR2011-043.pdf>
- [34] DVOŘÁČEK, Jan. Analýza silového zatížení frézovacího nástroje při pětiosém frézování. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 92 s., příloh 12. Polzer Aleš. [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17131
- [35] ANDRLÍK, J. Návrh strategie dokončování tvarových ploch: Diplomová práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2017. [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27901/1/Diplomova%20prace_Jiri%20Andrlik_2017.pdf
- [36] SADÍLEK, M.: Strategie frézování naklopeným nástrojem. MM Průmyslové spektrum, 11/2005, s. 52, ISSN 1212-2572.
- [37] SANDVIK Coromant. Frézování tvarových ploch. [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>
- [38] POLZNER, A. Technický týdeník. Akademie CNC obrábění (12), 2009. [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-12_8547.html

- [39] MAREK, Jiří a Petr BLECHA. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [40] POLZNER, A. Technický týdeník. Akademie CNC obrábění (13), 2009. [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/akademie-cnc/akademie-cnc-obrabeni-13_8548.html
- [41] KROFT, L. Optimalizace strategie obrábění složitých prostorových ploch. Disertační práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2018. [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/33625/1/Dizertacni_prace_KROFT_2017_2018.pdf
- [42] CHUANG, Li-Chang, YOUNG, Hong-Tsu. Integrated rough machining methodology for centrifugal impeller manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol*. 2007, no. 34, s. 1062-1071. [online]. [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-006-0675-3.pdf>
- [43] QI, R., LIU, W., BIAN, H., LI, L. Five-axis rough machining for impellers. *Front. Mech. Eng. China* 2009, 4(1): 71–76 DOI 10.1007/s11465-009-0010-4 [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11465-009-0010-4.pdf>
- [44] CAD/CAM systém hyperMILL. WESTCAM®. [online]. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.westcam.cz/produkty/cam/hypermill/>
- [45] The Aluminium Association. [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>
- [46] MakeitFrom – Aluminum Alloy 2024-T351. [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/2024-T351-Aluminum>
- [47] RŮŽIČKA, M. Kovové letecké konstrukce část 1 Materiály. [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <http://mechanika.fs.cvut.cz/content/files/Leteck%C3%A9%20materi%C3%A1ly.pdf>

- [48] ALUNET. HLINÍKOVÉ PROFILY NA MÍRU. Normování a popis hliníku a jeho slitin. [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/normovani-a-popis-hliniku-a-jeho-slitin>
- [49] SMID, P. *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. 2nd ed. New York: Industrial Press, 2003. ISBN 0831131586.
- [50] Dokumentace k softwaru *hyperMILL* společnosti OPEN MIND Technologies AG
- [51] Katalog EMUGE-FRANKEN: Turbine - Milling Cutters for Machining of Impellers and Turbine Blades.
- [52] DAVIM, J. Paulo. *Machining of complex sculptured surfaces*. New York: Springer, c2012. ISBN 978-1-4471-2355-2.
- [53] Klein, Peter. Flank Milling – How Hard Can It Be? [online]. [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.conceptsnrec.com/blog/flank-milling-how-hard-can-it-be>
- [54] KTS Turbobillet X – Billet Compressor Wheel. [FLANK MILL vs POINT MILL...]. In: *Facebook* [online]. 3. března 2017 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/KtsTurbobilletX/posts/flank-mill-vs-point-millkts-specialise-in-flank-mill-where-blade-surfaces-are-mi/762488147243922/>
- [55] Misan s.r.o. Obráběcí stroje a nástroje – Okuma MU-400V II. [online]. [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: <http://www.misan.cz/okuma/katalog-detail/mu-400v-ii-okuma-mu-400v-ii/?viewpart=2>
- [56] Katalog EMUGE-FRANKEN: Universal End Mills for the Die and Mould Industry. [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: https://emuge-franken.cz/wp-content/uploads/2019/12/ZP20099_DEGB-Universalfr%C3%A4ser-f%C3%BCr-den-Werkzeug-und-Formenbau.pdf
- [57] BREMSTAHLER, A. Větší řádkování při obrábění načisto. MM průmyslové spektrum. 2017 [online]. [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vetsi-radkovani-pri-obrabeni-nacisto.html>
- [58] Hoffmann group: Garant PPC - Nová strategie pro nejvyšší produktivitu [online]. [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: <https://www.hoffmann->

group.com/medias/sys_master/images/images/h70/h51/9291372658718/Soudeckov-a-freza-GARANT.pdf?attachment=true

- [59] GLEICH Aluminium. EN AW 7075 [cit. 2020-07-24]. Dostupné z: https://gleich.de/cz/wp-content/uploads/sites/8/2017/04/cz_en_aw_7075-2.pdf
- [60] MakeitFrom – Aluminum Alloy 7075-T6511. [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/7075-T6511-Aluminum>

11 Seznam obrázků

Obrázek 2-1 - Rozdělení lopatkových strojů podle směru proudění k ose rotace [2].....	12
Obrázek 2-2 - Schéma dvouproudového motoru s celkovým obtokem a malým obtokovým poměrem [4].....	14
Obrázek 2-3 - Řez turbodmychadlem [8]	15
Obrázek 2-4 - Kompresorová mapa [19]	17
Obrázek 2-5 - Poměr A/R [6]	18
Obrázek 3-1 – Geometrie polootevřeného lopatkového kola [23]	19
Obrázek 3-2 - Otevřené kompresorové kolo [14]	20
Obrázek 3-3 - Polootevřené kompresorové kolo [15].....	20
Obrázek 3-4 - Uzavřené kompresorové kolo [16]	21
Obrázek 3-5 - Průběh teploty v radiálním oběžném kole [21]	22
Obrázek 3-6 - Napětí generováno vlivem odstředivého namáhání, znázorňující koncentrátoři napětí v kořeni lopatky a otvoru pro hřídel [21]	22
Obrázek 4-1 – Možné uspořádání os při čtyřosém frézování [31]	27
Obrázek 4-2 - Označení os víceosého obrábění a příklad konstrukce pětiosé frézky [27]	28
Obrázek 4-3 - Konfigurace hlava-hlava [30]	29
Obrázek 4-4 - Konfigurace stůl-stůl [30].....	29
Obrázek 4-5 - Konfigurace hlava-stůl [30]	29
Obrázek 4-6 - Konfigurace stůl-stůl (kolébka) [30].....	30
Obrázek 4-7 - Znázornění obvodové rychlosti a efektivního průměru nástroje u (a) nevykloněného; (b) vykloněného nástroje [34]	32
Obrázek 4-8 - Hrubovací strategie mezilopatkového prostoru dle Morishigeho [42]	35
Obrázek 4-9 - Porovnání bočního (vlevo) a bodového (vpravo) frézování lopatkového kola [54]	37
Obrázek 5-1 – Čtyři základní tvary soudečkových fréz [57]	39
Obrázek 5-2 - Porovnání kulové a soudečkové frézy z hlediska vzdálenosti drah [58].....	39
Obrázek 6-1 - Struktura CAD/CAM/CNC řetězce [41]	40
Obrázek 7-1 - Uspořádání prohlížeče	46
Obrázek 7-2 - Strategie frézování cyklu hrubování VK [50].....	48
Obrázek 7-3 - Strategie přisuvu cyklu hrubování VK [50].....	49

Obrázek 7-4 - Polohy přísluvu hrubovacího cyklu VK [50]	49
Obrázek 7-5 - Rozdělení mezilopatkové kapsy	50
Obrázek 7-6 – Strategie frézování cyklu dokončování nábojů VK.....	51
Obrázek 7-7 - Zobrazení cyklu frézování boků VK	51
Obrázek 7-8 - Zobrazení funkce režim kapes	52
Obrázek 7-9 - Strategie přísluvu cyklu frézování hran VK	53
Obrázek 7-10 - Zobrazení cyklu frézování zaoblení VK	53
Obrázek 8-1 - CAD model lopatkového kola a zobrazení hlavních rozměrů	55
Obrázek 8-2 - Pětiosé svislé obráběcí centrum Okuma MU-400V II [55].....	57
Obrázek 8-3 – Kuželová fréza 3446.04010A [51]	57
Obrázek 8-4 - Kulová fréza 2550A.002 [56].....	58
Obrázek 8-5 - Kuželová fréza 3440.04010A [51]	58
Obrázek 8-6 - Tepelný upínač Haimer (vlevo) a hydraulický upínač Schunk (vpravo)	59
Obrázek 8-7 - Zobrazení axiální a_p a radiální a_e hloubky řezu a jejich hodnoty [51], [56]	60
Obrázek 8-8 – Model polotovaru pro frézování	61
Obrázek 8-9 - Stanovení souřadného systému pro seznam operací.....	61
Obrázek 8-10 - Oblast frézování	62
Obrázek 8-11 - Výběr Křivek skeletu a povrchu hlavní lopatky.....	62
Obrázek 8-12 - Výběr povrchu náboje (vlevo) a krycího povrchu (vpravo)	63
Obrázek 8-13 - Geometrie omezující frézovací strategie	63
Obrázek 8-14 - Otevírací řezy první poloviny kapsy	64
Obrázek 8-15 - Hrubování první poloviny kapsy	65
Obrázek 8-16 - Polohrubování horní poloviny kapsy	65
Obrázek 8-17 - Polohrubování dolní poloviny kapsy	65
Obrázek 8-18 - konečné polohrubování první poloviny kapsy.....	66
Obrázek 8-19 - Otevírací řez druhé poloviny kapsy	67
Obrázek 8-20 - Hrubování druhé poloviny kapsy	67
Obrázek 8-21 - Polohrubování druhé poloviny kapsy	68
Obrázek 8-22 - Konečné polohrubování druhé poloviny kapsy	68
Obrázek 8-23 – Půdorysné zobrazení drah pro jednotlivá dna mezilopatkových kapes	69
Obrázek 8-24 - Frézování náběžných hran	70
Obrázek 8-25 - Bodové frézování lopatek	71
Obrázek 8-26 - Chyba v modelu lopatkového kola	72

Obrázek 8-27 - Chybně vygenerovaná dráha pro frézování zaoblení	72
Obrázek 8-28 - Upravený model lopatkového kola.....	73
Obrázek 8-29 - Frézování zaoblení	73
Obrázek 8-30 – Zobrazení frézovacích operací	74
Obrázek 8-31 – Předsoustružený polotovar	74
Obrázek 8-32 - Upnutí polotovaru pro následné frézování	75
Obrázek 8-33 – Hrubování - otevírací řez.....	76
Obrázek 8-34 - Polohrubování první poloviny.....	76
Obrázek 8-35 - Vyhrubované lopatkové kolo	76
Obrázek 8-36 - Dokončené lopatkové kolo	76
Obrázek 8-37 - Lopatka č. 1	78
Obrázek 8-38 - Lopatka č. 2	78
Obrázek 8-39 - Lopatka č. 3	78
Obrázek 8-40 - Lopatka č. 4	78
Obrázek 8-41 - Lopatka č. 5	79
Obrázek 8-42 - Lopatka č. 6	79
Obrázek 8-43 - Lopatka č. 7	79
Obrázek 8-44 - Lopatka č. 8	79
Obrázek 8-45 - Lopatka č. 9	79

12 Seznam tabulek

Tabulka 3-1 Chemické složení slitiny Inconel 718 [25].....	22
Tabulka 3-2 Chemické složení slitiny Inconel 713C	23
Tabulka 3-3 Chemické složení slitiny γ -TiAl [27].....	23
Tabulka 3-4 Chemické složení oceli X30WCrV9-3	24
Tabulka 3-5 Chemické složení slitiny C335.0 [13]	24
Tabulka 3-6 Chemické složení slitiny 2618 [22].....	25
Tabulka 3-7 Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V [24].....	25
Tabulka 6-1 Seznam používaných adres a jejich definice [49]	42
Tabulka 8-1 Chemické složení slitiny EN AW 2024 T351 [46]	55
Tabulka 8-2 Chemické složení slitiny EN AW 7075 T6511 [60]	55

Tabulka 8-3 Technická data použitého stroje (výběr) [55].....	56
Tabulka 8-4 Rozměry kuželové frézy 3446.04010A [51]	58
Tabulka 8-5 Rozměry kulové frézy 2550A.002 [56].....	58
Tabulka 8-6 Rozměry kuželové frézy 3440.04010A [51]	59
Tabulka 8-7 Doporučené hodnoty řezných podmínek [51]	59
Tabulka 8-8 Parametry otevíracího řezu první poloviny kapsy	63
Tabulka 8-9 Parametry hrubování první poloviny kapsy	64
Tabulka 8-10 Parametry polohrubování horní poloviny kapsy	65
Tabulka 8-11 Parametry polohrubování dolní poloviny kapsy.....	66
Tabulka 8-12 Parametry konečného polohrubování první poloviny kapsy.....	66
Tabulka 8-13 Parametry otevíracího řezu druhé poloviny kapsy.....	67
Tabulka 8-14 parametry hrubování druhé poloviny kapsy	67
Tabulka 8-15 Parametry polohrubování druhé poloviny kapsy	67
Tabulka 8-16 Parametry konečného polohrubování druhé poloviny kapsy	68

13 Seznam příloh

Příloha 1: Katalog nástrojů EMUGE FRANKEN.....	93
Příloha 2: Postupná přeměna polotovaru ve finální výrobek	99
Příloha 3: Drsnost povrchu některých lopatek měřených přenosným drsnoměrem MarSurf PS 10 od společnosti Mahr	100
Příloha 4: Strom použitých operací v softwaru hyperMILL	104

Příloha 1: Katalog nástrojů EMUGE FRANKEN

FRANKEN Hartmetall-Kugelfräser · Solid Carbide Ball Nose End Mills
TOP-Cut

- Multifunktionales Hochleistungswerkzeug
- Patentierte Querschneide
- 2 Bauformen verfügbar

- Multi-functional, high performance tool
- Patented chisel edge
- 2 lengths available

Design I₂

Optional

- 30°
- Kugel
- V_c/f_z
- 7
- ≤ 55 HRC

N

HM

DIN 6535

HA

HB

Allround

TIALN

Beschichtung · Coating

Einsatzgebiete – Material (siehe Seite 4)

- In fast allen Werkstoffen einsetzbar
- Zum Schruppen, Schlichten sowie zum HSC-Schlichten geeignet

Applications – material (see page 4)

- For almost all materials
- Suitable for roughing, finishing and HSC finishing

P 1.1-5.1

M 1.1-4.1

K 1.1-4.2

N 2.1-2.8, 5.2, 1.2-1.4

S 2.1-2.3, 2.4-2.6

H 1.1-1.2

Kurze Ausführung · Short design

Bestell-Code · Order code												2550A			
∅ d ₁	r	l ₂	l ₃	l ₁	∅ d ₃	l ₄	∅ d ₂	α	β	Z	Dimens.-Code				
±0,01	±0,005				h5					(Flutes)					
0,5	0,25	1	2	57	0,45	20	6	10°	8,5°	2	.0005	●			
1	0,5	2	4	57	0,95	20	6	10°	8°	2	.001	●			
1,5	0,75	2,5	7,5	57	1,4	20	6	12,5°	7°	2	.0015	●			
2	1	3	8	57	1,8	20	6	12°	6,5°	2	.002	●			
3	1,5	3,5	10	57	2,8	20	6	11,5°	5°	2	.003	●			
4	2	4	12	57	3,8	20	6	11°	3,5°	2	.004	●			
5	2,5	5	14	57	4,7	20	6	10°	2°	2	.005	●			
6	3	6	20	57	5,6	–	6	–	–	2	.006	●			
8	4	7	25	63	7,6	–	8	–	–	2	.008	●			
10	5	8	30	72	9,6	–	10	–	–	2	.010	●			
12	6	10	35	83	11,5	–	12	–	–	2	.012	●			



Hartmetall-Kugelfräser – kurze Ausführung
Solid carbide ball nose end mills – short design

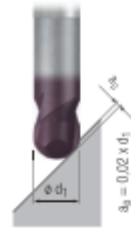
N

Gültig für · Valid for
2550A

Schruppen
Roughing



Schlichten
Finishing



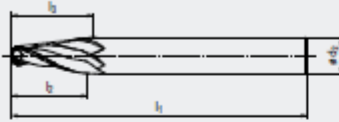
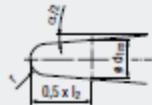
		Schruppen		Schlichten				MMS MQL	
		v_c [m/min]	f_z [mm]	v_c [m/min]	f_z [mm]				
P	1.1	220	$0,014 \times d_1$	300	$0,010 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.1	190	$0,013 \times d_1$	260	$0,009 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	3.1	160	$0,011 \times d_1$	220	$0,008 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4.1	130	$0,010 \times d_1$	180	$0,007 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	5.1	110	$0,008 \times d_1$	150	$0,006 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
M	1.1	110	$0,008 \times d_1$	150	$0,006 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.1	90	$0,008 \times d_1$	120	$0,006 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	3.1	70	$0,006 \times d_1$	90	$0,005 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	4.1	50	$0,006 \times d_1$	70	$0,005 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
K	1.1	220	$0,014 \times d_1$	300	$0,010 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	1.2	220	$0,014 \times d_1$	300	$0,010 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2.1	200	$0,011 \times d_1$	260	$0,008 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	2.2	200	$0,011 \times d_1$	260	$0,008 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3.1	160	$0,011 \times d_1$	220	$0,008 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	3.2	160	$0,011 \times d_1$	220	$0,008 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4.1	130	$0,008 \times d_1$	180	$0,006 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	4.2	110	$0,008 \times d_1$	150	$0,006 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
N	1.1							<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.2	900	$0,020 \times d_1$	1200	$0,014 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.3	900	$0,017 \times d_1$	1200	$0,012 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.4	600	$0,020 \times d_1$	800	$0,014 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.5								
	1.6								
	2.1	200	$0,014 \times d_1$	260	$0,010 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.2	200	$0,014 \times d_1$	260	$0,010 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.3	200	$0,014 \times d_1$	260	$0,010 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.4	160	$0,011 \times d_1$	220	$0,008 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.5	160	$0,011 \times d_1$	220	$0,008 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.6	160	$0,011 \times d_1$	220	$0,008 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.7	100	$0,008 \times d_1$	130	$0,006 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.8	100	$0,008 \times d_1$	130	$0,006 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	3.1								
	3.2								
4.1									
4.2									
4.3									
4.4									
5.1									
5.2	110	$0,008 \times d_1$	150	$0,006 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5.3									
S	1.1								
	1.2								
	1.3								
	2.1	80	$0,008 \times d_1$	110	$0,006 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.2	30	$0,006 \times d_1$	50	$0,004 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.3	30	$0,006 \times d_1$	40	$0,004 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.4	30	$0,006 \times d_1$	40	$0,004 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2.5	20	$0,006 \times d_1$	30	$0,004 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
2.6	30	$0,006 \times d_1$	40	$0,004 \times d_1$			<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
H	1.1			150	$0,006 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	1.2			130	$0,005 \times d_1$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
	1.3								
	1.4								
	1.5								

v_c = Schnittgeschwindigkeit · Cutting speed
 f_z = Vorschub pro Zahn · Feed per tooth

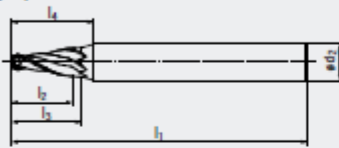
= sehr gut geeignet · very suitable
 = gut geeignet · suitable



- Multifunktionales Werkzeug
- Feine Schruppschicht-Verzahnung
- Mit 2 Schneiden
- Verschiedene Kegelwinkel
- Auch mit poliertem Spanraum erhältlich



Design l₂:

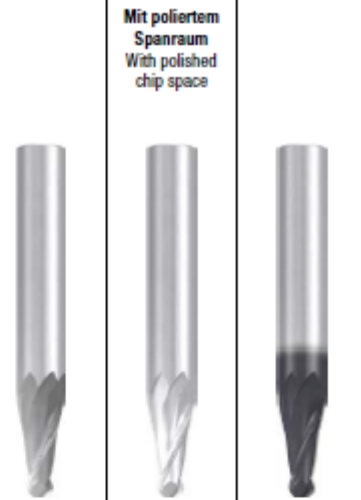


NF fein fine

HM DIN 6535 HA HB

30° Kugel

Optional



Allround

Allround

Beschichtung - Coating

Einsatzgebiete – Material (siehe Seite 4)

- In fast allen Werkstoffen einsetzbar
- Zum Schruppen und Schlichten geeignet

Applications – material (see page 4)

- For almost all materials
- Suitable for roughing and finishing

ALCR

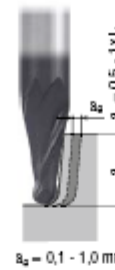
N 1.1-1.3
 N 4.1-4.2

P 1.1-3.1 4.1-5.1
 M 1.1-2.1
 K 1.1-2.2 3.1-4.2
 N 1.1-1.4 1.5
 N 2.1-2.6 2.7-2.8
 N 3.1-4.4 5.2-5.3
 S 1.1-1.2 1.3
 S 2.1-2.2 2.3-2.6

Bestell-Code - Order code										3446	3447	3446L
$\alpha/2$	r ±0,01	l ₂	l ₃	l ₁	l ₄	d _{1m}	ø d ₂ h6	Z (Flutes)	Dimens.- Code			
3°	1.5	20	20	62	24	3,90	6	2	.03015A	•	•	•
	2	31	31	80	35	5,42	8	2	.03020B	•	•	•
4°	0.5	20	20	62	24	2,33	6	2	.04005A	•	•	•
	1	20	20	62	24	3,26	6	2	.04010A	•	•	•
	1.5	20	20	63	25	4,20	8	2	.04015A	•	•	•
	2	30	30	72	-	5,83	8	2	.04020B	•	•	•
6°	0.5	20	24	62	-	3,00	6	2	.06005A	•	•	•
	1	19	19	62	-	3,80	6	2	.06010A	•	•	•
	1.5	15	15	62	-	4,28	6	2	.06015A	•	•	•
	1.5	25	25	68	-	5,33	8	2	.06015B	•	•	•
	2	20	20	68	-	5,70	8	2	.06020A	•	•	•
8°	0.5	18	18	62	-	3,40	6	2	.08005A	•	•	•
	1	15	15	62	-	3,85	6	2	.08010A	•	•	•
	1.5	19	19	63	-	5,28	8	2	.08015A	•	•	•
	2	23	23	72	-	6,71	10	2	.08020A	•	•	•

Konische Hartmetall-Kugelfräser
Tapered solid carbide ball nose end mills

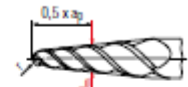
NF



Gültig für - Valid for
3446 3446L 3447

Für die Berechnung der Drehzahl n muss mit dem mittleren Durchmesser d_m (Messpunkt bei $0,5 \times a_p$) gerechnet werden.

For the calculation of rpm (n), use the average diameter d_m (measuring point at $0,5 \times a_p$).



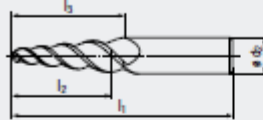
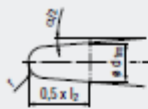
$$n = \frac{v_c \times 1000}{d_m \times \pi} \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

		Unbeschichtet - Uncoated				ALCR						
		v_c [m/min]	f_z [mm]	v_c [m/min]	f_z [mm]	v_c [m/min]	f_z [mm]			MMG MQL		
P	1.1					160	0,010 x r	□	■	□	■	
	2.1					140	0,010 x r	□	■	□	■	
	3.1					120	0,008 x r	□	■	□		
	4.1					100	0,008 x r	□	■	□		
	5.1					80	0,006 x r	□	■	□		
M	1.1					80	0,006 x r			□	■	
	2.1					70	0,006 x r			□	■	
	3.1											
	4.1											
K	1.1					160	0,010 x r	■	■			
	1.2					160	0,010 x r	■	■			
	2.1					140	0,008 x r	■	■			
	2.2					140	0,008 x r	■	■			
	3.1					120	0,008 x r	■	■			
	3.2					120	0,008 x r	■	■			
	4.1					100	0,006 x r	■	■			
	4.2					80	0,006 x r	■	■			
N	1.1	350	0,040 x r	300	0,020 x r	350	0,016 x r			□	■	
	1.2	350	0,040 x r	300	0,020 x r	350	0,014 x r			□	■	
	1.3	320	0,035 x r	270	0,017 x r	320	0,012 x r			□	■	
	1.4					280	0,014 x r			□	■	
	1.5					240	0,012 x r			□	■	
	1.6											
	2.1					140	0,010 x r			□	■	
	2.2					140	0,010 x r			□	■	
	2.3					140	0,010 x r	□	□	□	■	
	2.4					120	0,008 x r			□	■	
	2.5					120	0,008 x r			□	■	
	2.6					120	0,008 x r	□	□	□	■	
	2.7					70	0,006 x r			□	■	
	2.8					70	0,006 x r			□	■	
	3.1					320	0,018 x r			□	■	
	3.2					320	0,014 x r			□	■	
	4.1			180	0,016 x r	240	0,016 x r			□	□	■
	4.2			160	0,016 x r	350	0,016 x r			□	□	■
	4.3					180	0,012 x r			□	□	■
	4.4					90	0,012 x r			□	□	■
5.1												
5.2					80	0,006 x r			□	■		
5.3					160	0,012 x r	□	■				
S	1.1					80	0,008 x r			□	■	
	1.2					60	0,006 x r			□	■	
	1.3					40	0,006 x r			□	■	
	2.1					50	0,006 x r			□	■	
	2.2					20	0,004 x r			□	■	
	2.3					20	0,004 x r			□	■	
	2.4					20	0,004 x r			□	■	
	2.5					15	0,004 x r			□	■	
	2.6					20	0,004 x r			□	■	
H	1.1											
	1.2											
	1.3											
	1.4											
	1.5											

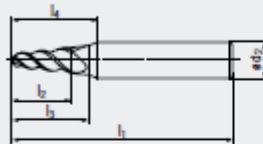
v_c = Schnittgeschwindigkeit - Cutting speed
 f_z = Vorschub pro Zahn - Feed per tooth
 ■ = sehr gut geeignet - very suitable
 □ = gut geeignet - suitable



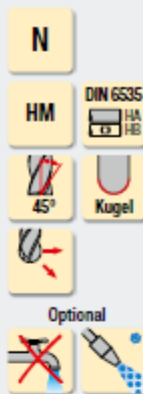
- Multifunktionales Werkzeug
- Mit 3 Schneiden
- Verschiedene Kegelwinkel
- Auch mit poliertem Spanraum erhältlich



Design I_C:



- Multi-functional tool
- With 3 flutes
- Various taper angles
- Also available with polished chip space



Mit poliertem Spanraum
With polished chip space



Allround



Allround

Beschichtung - Coating

Einsatzgebiete - Material (siehe Seite 4)

- In fast allen Werkstoffen einsetzbar
- Zum Schlichten geeignet

Applications - material (see page 4)

- For almost all materials
- Suitable for finishing

N 1.1-1.3
N 4.1-4.2

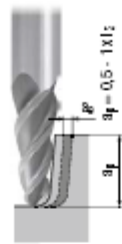
ALCR

P 1.1-3.1 4.1-5.1
M 1.1-2.1
K 1.1-2.2 3.1-4.2
N 1.1-1.4 1.5
N 2.1-2.6 2.7-2.8
N 3.1-4.4 5.2-5.3
S 1.1-1.2 1.3
S 2.1-2.2 2.3-2.6

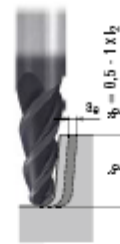
Bestell-Code - Order code										3440	3441	3440L	
$\alpha/2$	r ±0,005	l ₂	l ₃	l ₁	l ₄	d _{1m}	d ₂ h ₆	Z (Flutes)	Dimens.- Code				
3°	1,5	20	20	62	24	3,90	6	3	.03015A	•	•	•	
	2	21	21	66	-	4,90	6	3	.03020A	•	•	•	
	2	31	31	80	35	5,42	8	3	.03020B	•	•	•	
	3	22	22	72	-	6,85	8	3	.03030A	•	•	•	
	3	31	31	80	35	7,32	10	3	.03030B	•	•	•	
4°	0,5	20	20	62	24	2,33	6	3	.04005A	•	•	•	
	1	20	20	62	24	3,26	6	3	.04010A	•	•	•	
	1,5	20	20	63	25	4,20	8	3	.04015A	•	•	•	
	2	20	30	68	-	5,13	8	3	.04020A	•	•	•	
	2	30	30	72	-	5,83	8	3	.04020B	•	•	•	
	3	25	31	72	-	7,34	10	3	.04030A	•	•	•	
3	31	31	80	-	7,76	10	3	.04030B	•	•	•		
6°	0,5	20	24	62	-	3,00	6	3	.06005A	•	•	•	
	1	19	19	62	-	3,80	6	3	.06010A	•	•	•	
	1	29	29	72	-	4,85	8	3	.06010B	•	•	•	
	1,5	15	15	62	-	4,28	6	3	.06015A	•	•	•	
	1,5	25	25	68	-	5,33	8	3	.06015B	•	•	•	
	2	20	20	68	-	5,70	8	3	.06020A	•	•	•	
	2	30	30	80	-	6,76	10	3	.06020B	•	•	•	
	3	21	21	72	-	7,61	10	3	.06030A	•	•	•	
3	31	31	83	-	8,66	12	3	.06030B	•	•	•		
8°	0,5	18	18	62	-	3,40	6	3	.08005A	•	•	•	
	1	15	15	62	-	3,85	6	3	.08010A	•	•	•	
	1	22	22	63	-	4,83	8	3	.08010B	•	•	•	
	1,5	19	19	63	-	5,28	8	3	.08015A	•	•	•	
	1,5	26	26	72	-	6,26	10	3	.08015B	•	•	•	
	2	23	23	72	-	6,71	10	3	.08020A	•	•	•	
17,5°	0,5	8	8	57	-	3,26	6	3	.17505A	•	•	•	

Konische Hartmetall-Kugelfräser
Tapered solid carbide ball nose end mills

N



$a_e = 0,1 - 0,2 \text{ mm}$

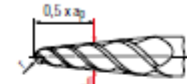


$a_e = 0,1 - 0,2 \text{ mm}$

Gültig für - Valid for
3440 3440L 3441

Für die Berechnung der Drehzahl n muss mit dem mittleren Durchmesser d_m (Messpunkt bei $0,5 \times a_e$) gerechnet werden.

For the calculation of rpm (n), use the average diameter d_m (measuring point at $0,5 \times a_e$).



$$n = \frac{v_c \times 1000}{d_m \times z} \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

	Unbeschichtet - Uncoated		ALCR		
	v_c [m/min]	f_z [mm]	v_c [m/min]	f_z [mm]	
P	1.1		120	$0,010 \times r$	<input type="checkbox"/>
	2.1		100	$0,010 \times r$	<input type="checkbox"/>
	3.1		90	$0,008 \times r$	<input type="checkbox"/>
	4.1		70	$0,008 \times r$	<input type="checkbox"/>
	5.1		60	$0,006 \times r$	<input type="checkbox"/>
M	1.1		60	$0,006 \times r$	
	2.1		50	$0,006 \times r$	
	3.1				
	4.1				
K	1.1		120	$0,010 \times r$	<input checked="" type="checkbox"/>
	1.2		120	$0,010 \times r$	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.1		100	$0,008 \times r$	<input checked="" type="checkbox"/>
	2.2		100	$0,008 \times r$	<input checked="" type="checkbox"/>
	3.1		90	$0,008 \times r$	<input checked="" type="checkbox"/>
	3.2		90	$0,008 \times r$	<input checked="" type="checkbox"/>
	4.1		70	$0,006 \times r$	<input checked="" type="checkbox"/>
	4.2		60	$0,006 \times r$	<input checked="" type="checkbox"/>
N	1.1	180		$0,016 \times r$	
	1.2	180		$0,014 \times r$	
	1.3	180		$0,012 \times r$	
	1.4		200	$0,014 \times r$	
	1.5		180	$0,012 \times r$	
	1.6				
	2.1		100	$0,010 \times r$	
	2.2		100	$0,010 \times r$	
	2.3		100	$0,010 \times r$	<input type="checkbox"/>
	2.4		80	$0,008 \times r$	<input type="checkbox"/>
	2.5		80	$0,008 \times r$	<input type="checkbox"/>
	2.6		80	$0,008 \times r$	<input type="checkbox"/>
	2.7		50	$0,006 \times r$	<input type="checkbox"/>
	2.8		50	$0,006 \times r$	<input type="checkbox"/>
	3.1		240	$0,018 \times r$	
	3.2		240	$0,014 \times r$	
4.1	130		180	$0,016 \times r$	<input type="checkbox"/>
4.2	110	$0,016 \times r$	160	$0,016 \times r$	<input type="checkbox"/>
4.3			100	$0,012 \times r$	<input type="checkbox"/>
4.4			70	$0,012 \times r$	<input type="checkbox"/>
5.1					
5.2			60	$0,006 \times r$	
5.3			120	$0,012 \times r$	<input type="checkbox"/>
S	1.1		60	$0,008 \times r$	
	1.2		50	$0,006 \times r$	
	1.3		30	$0,006 \times r$	
	2.1		40	$0,006 \times r$	
	2.2		15	$0,004 \times r$	
	2.3		15	$0,004 \times r$	
2.4		15	$0,004 \times r$		
2.5		10	$0,004 \times r$		
2.6		15	$0,004 \times r$		
H	1.1				
	1.2				
	1.3				
	1.4				
	1.5				

v_c = Schnittgeschwindigkeit - Cutting speed
 f_z = Vorschub pro Zahn - Feed per tooth


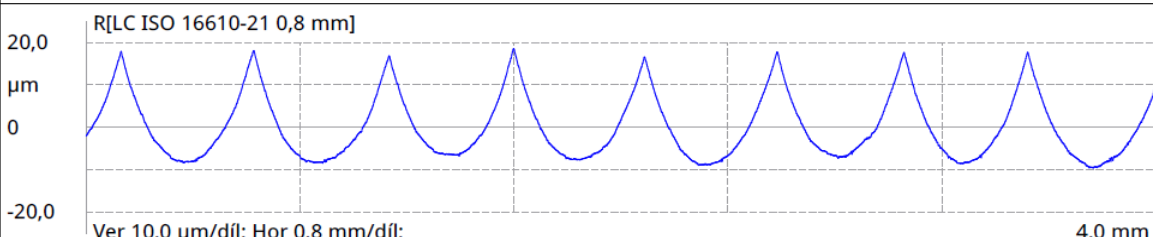
= sehr gut geeignet - very suitable
 = gut geeignet - suitable

Příloha 2: Postupná přeměna polotovaru ve finální výrobek


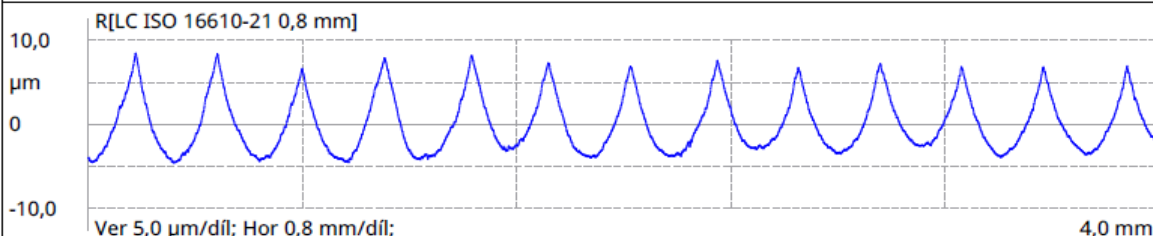


Příloha 3: Drsnost povrchu některých lopatek měřených přenosným drsnoměrem MarSurf PS 10 od společnosti Mahr


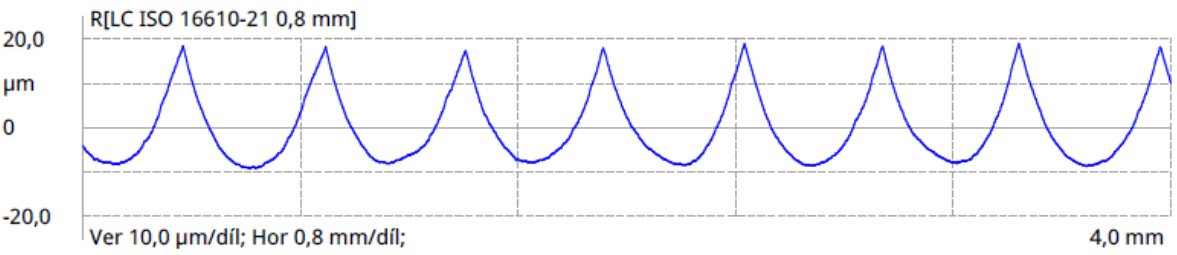
Lopatka 1

		MarSurf PS 10 1.00-28	
			
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra		6,372 µm	
Rz		26,598 µm	
Rmax		27,253 µm	
RSm		487,643 µm	


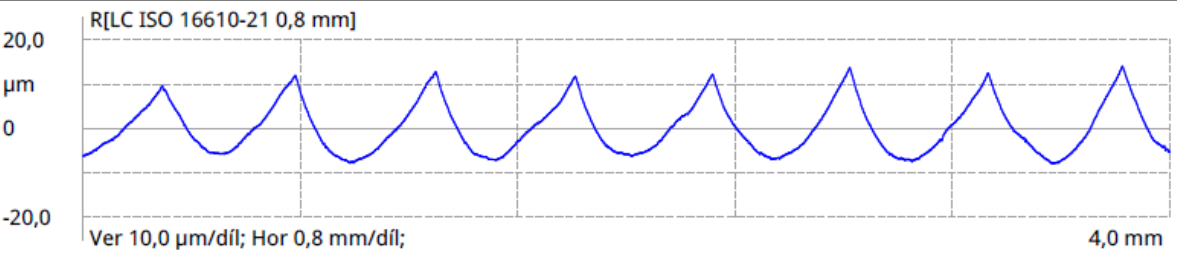
Lopatka 2

		MarSurf PS 10 1.00-28	
			
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra		2,837 µm	
Rz		11,793 µm	
Rmax		12,993 µm	
RSm		310,167 µm	


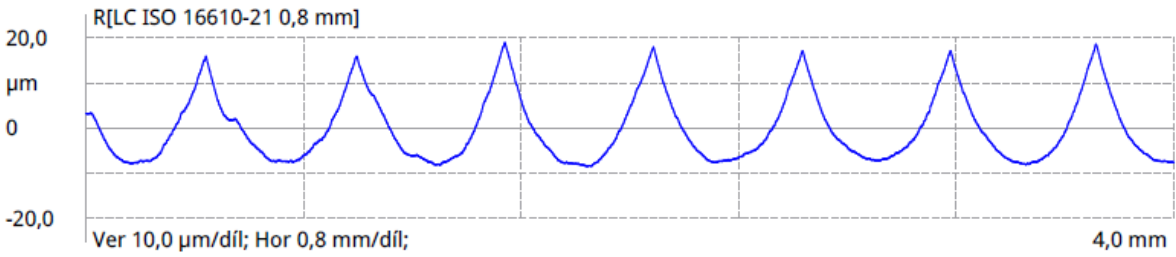
Lopatka 3

		MarSurf PS 10 1.00-28	
Datum vytvoření:	19.07.2020 19:28	Lt:	4,8 mm
Přístroj:	MarSurf PS 10 (5321)	Ls:	2,5 µm
Snímač:	PHT 350	VB:	+/- 200,0 µm
		Vt:	1,0 mm/s
		Body:	9600
			
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra	6,818 µm		
Rz	27,146 µm		
Rmax	27,695 µm		
RSm	514,071 µm		


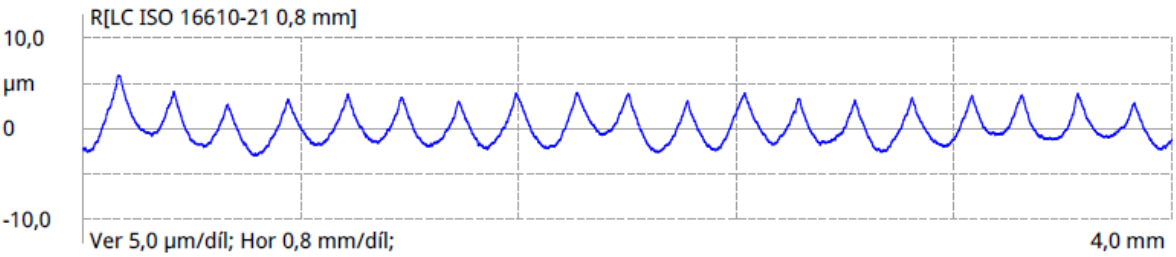
Lopatka 4

		MarSurf PS 10 1.00-28	
Datum vytvoření:	19.07.2020 19:29	Lt:	4,8 mm
Přístroj:	MarSurf PS 10 (5321)	Ls:	2,5 µm
Snímač:	PHT 350	VB:	+/- 200,0 µm
		Vt:	1,0 mm/s
		Body:	9600
			
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra	4,885 µm		
Rz	20,065 µm		
Rmax	21,938 µm		
RSm	504,857 µm		


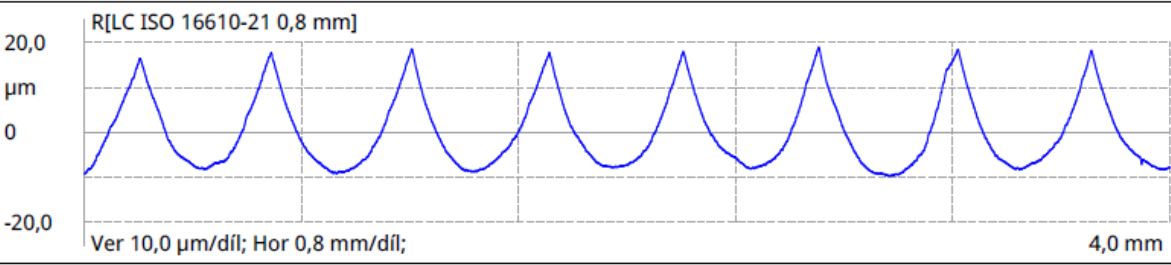
Lopatka 5

		MarSurf PS 10 1.00-28	
Datum vytvoření:	19.07.2020 19:29	Lt:	4,8 mm
Přístroj:	MarSurf PS 10 (5321)	Ls:	2,5 µm
Snímač:	PHT 350	VB:	+/- 200,0 µm
		Vt:	1,0 mm/s
		Body:	9600
			
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra	6,221 µm		
Rz	25,705 µm		
Rmax	27,190 µm		
RSm	546,500 µm		


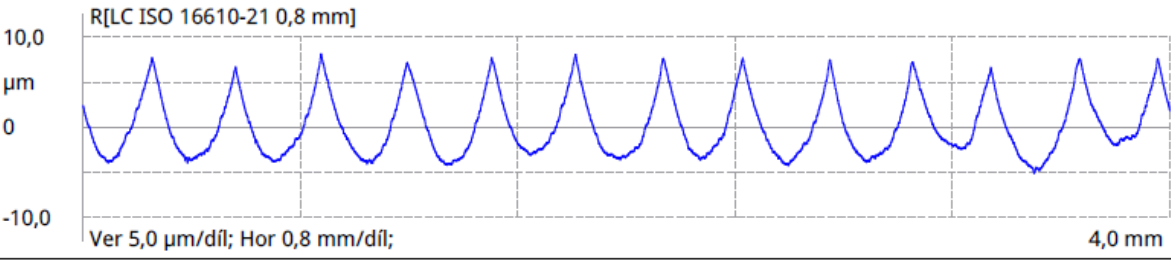
Lopatka 6

		MarSurf PS 10 1.00-28	
Datum vytvoření:	19.07.2020 19:30	Lt:	4,8 mm
Přístroj:	MarSurf PS 10 (5321)	Ls:	2,5 µm
Snímač:	PHT 350	VB:	+/- 200,0 µm
		Vt:	1,0 mm/s
		Body:	9600
			
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra	1,434 µm		
Rz	6,873 µm		
Rmax	8,863 µm		
RSm	234,781 µm		

Lopatka 7

		MarSurf PS 10 1.00-28	
Datum vytvoření:	19.07.2020 19:33	Lt:	4,8 mm
Přístroj:	MarSurf PS 10 (5321)	Ls:	2,5 µm
Snímač:	PHT 350	VB:	+/- 200,0 µm
		Vt:	1,0 mm/s
		Body:	9600
			
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra	6,831 µm		
Rz	27,138 µm		
Rmax	28,645 µm		
RSm	502,143 µm		

Lopatka 8

		MarSurf PS 10 1.00-28	
Datum vytvoření:	19.07.2020 19:30	Lt:	4,8 mm
Přístroj:	MarSurf PS 10 (5321)	Ls:	2,5 µm
Snímač:	PHT 350	VB:	+/- 200,0 µm
		Vt:	1,0 mm/s
		Body:	9600
			
R[LC ISO 16610-21 0,8 mm]			
Ra	2,809 µm		
Rz	12,046 µm		
Rmax	12,708 µm		
RSm	308,792 µm		

Příloha 4: Strom použitých operací v softwaru hyperMILL

