

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Víceosé obrábění lopatkových kol s využitím CAM
Multiaxis machining of multiblade parts using CAM software

AUTOR:	Bc. Jakub Skořepa
STUDIJNÍ PROGRAM:	NVI Výrobní inženýrství
VEDOUCÍ PRÁCE:	Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

PRAHA, 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Skořepa** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **466498**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Víceosé obrábění lopatkových kol s využitím CAM

Název diplomové práce anglicky:

Multiaxis machining of multiblade parts using CAM software

Pokyny pro vypracování:

Práce je zaměřená na využití nástrojů CAM software pro přípravu specializovaných programů na víceosé obrábění. Konkrétně na obrábění lopatkových kol. Předpokládané body práce:

1. Víceosé obrábění se zaměřením na obrábění lopatkových kol - rešerše,
2. Popis CAM SW pro lopatková kola a postup práce,
3. Příprava geometrických dat, požadavky na data,
4. Příprava drah v CAM,
5. Výstupy, ověřování,
6. Obrábění a analýza,
7. Vyhodnocení a závěry.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Tomíček, Ph.D. ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **29.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
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

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma Víceosé obrábění lopatkových kol s využitím CAM vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Tomíčka Ph.D. a všechny informace a podklady použité v této práci jsou řádně odkázány v seznamu literatury.

V Praze dne.....

.....

Podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Tomíčkoví, Ph. D. za cenné rady, trpělivost a čas, které mi při této práci věnoval. Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Sommerovi za spolupráci při obrábění lopatkového kola. Na závěr bych rád poděkoval rodině a přítelkyni, kteří mi po celou dobu studia byli oporou.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Jakub Skořepa
Název diplomové práce:	Víceosé obrábění lopatkových kol s využitím CAM
Akademický rok:	2021/2022
Studijní program:	NVI Výrobní inženýrství
Škola, fakulta:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12 134 Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí DP:	Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran: 77 počet obrázků: 81 počet tabulek: 15 počet grafů: 2
Klíčová slova:	lopatkové kolo, PowerMill, CNC, CAM, lopatka, frézovací strategie
Anotace:	Tato diplomová práce je zaměřena na tvorbu NC programu pro obrábění lopatkového kola. V teoretické části jsou popsána lopatková kola a nastíněna problematika víceosého frézování. V praktické části je popsán postup tvorby NC programu v SW PowerMill včetně pomocné geometrie. Tento NC program je poté využit pro reálné obrábění lopatkového kola na víceosém frézovacím centru Okuma MU400-V II. Obrobené lopatkové kolo je následně analyzováno pomocí konturoměru a optického mikroskopu, následně je vyhodnocena výsledná drsnost povrchu lopatek.

Annotation

Author:	Bc. Jakub Skořepa
Title of master thesis:	Multiaxis machining of multiblade parts using CAM software
Academic year:	2021/2022
Field of study:	NVI Manufacturing engineering
University, Faculty:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12 134 Department of machining, process planning and metrology
Supervisor:	Ing. Jan Tomíček, Ph.D.
Bibliographic data:	pages: 77 images: 81 tables: 15 graphs: 2
Keywords:	Impeller, PowerMill, CNC, CAM, vane, milling strategy
Abstract:	<p>This thesis is focused on the creation of an NC program for the machining of an impeller. In the theoretical part, vane wheels are described and the issue of multi-axis milling is outlined. The practical part describes the process of creating an NC program in the SW PowerMill, including auxiliary geometry. This NC program is then used for actual machining of the impeller on the Okuma MU400-V II multi-axis milling center. The machined impeller is then analyzed using a contour meter and an optical microscope, resulting surface roughness of the vanes is then evaluated.</p>

Obsah

1	Úvod	10
2	Lopatkové stroje	11
2.1	Dělení lopatkových strojů	11
2.2	Konstrukce lopatkových kol	12
2.3	Materiál lopatkových kol a turbín	14
2.3.1	Hliníkové slitiny	14
2.3.2	Žáruvzdorné a žárupevné oceli	14
2.3.3	Hořčíkové slitiny	15
2.3.4	Titanové slitiny	15
2.3.5	Niklové slitiny	15
3	Frézovací obráběcí centra	16
3.1	Konstrukce frézovacích center	16
3.2	Realizace 4. a 5. osy	17
3.3	Vliv natočení osy nástroje	18
4	CAM systém	20
4.1	Postup tvorby programu pomocí CAM softwaru	21
4.1.1	Partprogram	21
4.2	CAD/CAM	23
4.3	Víceosé obráběcí strategie	23
4.3.1	Hrubování kapes pomocí řídicí křivky a křivky naklopení	23
4.3.2	Víceosé adaptivní hrubování	24
4.3.3	Dokončování pomocí řídicí křivky	24
4.3.4	Automatická změna 3-osého na víceosé obrábění	25
4.4	CAM systém pro lopatková kola	26
4.4.1	PowerMill obrábění lopatkových kol	26
5	Kvalita povrchu a výrobní čas lopatkových kol	29
5.1	Vliv drsnosti povrchu na proudění tekutiny	31
6	Obecný postup/strategie obrábění lopatek	32
6.1	Příprava a upnutí polotovaru	32
6.2	Hrubování	32
6.3	Dokončování	33

7	Moderní nástroje používané pro 5-ti osé obrábění	35
7.1	Toroidní frézy.....	35
7.2	Kulové kuželové frézy	35
7.3	Soudečkové frézy	36
8	Experiment	37
8.1	Model a příprava geometrických dat.....	38
8.1.1	Analýza geometrie	38
8.1.2	Tvorba pomocné geometrie	39
8.2	Materiál lopatkového kola.....	42
8.3	použité obráběcí centrum	42
8.4	Použité nástroje a upínač.....	44
8.5	Tvorba NC programu	45
8.6	Výroba polotovaru	57
8.7	Výroba lopatkového kola	58
8.8	Analýza	61
8.9	Vyhodnocení	65
8.10	Návrh optimalizace NC programu	66
9	Závěr.....	67
	Seznam použitých zdrojů:.....	68
	Seznam obrázků.....	74
	Seznam tabulek.....	76
	Seznam grafů	77
	Seznam příloh	77

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Jednotka	Popis
d_{eff}	[mm]	Efektivní průměr nástroje
D	[mm]	Průměr nástroje
a_p	[mm]	Hloubka řezu
V_c	[m/min]	Řezná rychlost
n	[ot/min]	Otáčky vřetene
f_z	[mm/z]	Posuv na zub
r	[mm]	Poloměr nástroje
D_{max}	[mm]	Max. průměr lop. kola
h	[mm]	Výška lopatkového kola
L	[mm]	Délka podstavy
$\alpha/2$	[°]	Úhel kuželu nástroje
L_2	[mm]	Délka ostří
L_3	[mm]	Délka kuželové části 1
L_1	[mm]	Délka nástroje
L_4	[mm]	Délka kuželové části 2
D_{1m}	[mm]	Efektivní průměr nástroje
d_2	[mm]	Průměr stopky nástroje
Z	[-]	Počet zubů nástroje
ae	[mm]	Krok do strany
R_a	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
R_z	[μm]	Průměrná hodnota z 5-ti absolutních hodnot minima a maxima
R_t	[μm]	Celková výška R-profilu
SW		Software
CAM		Computer Aided Machining

1 Úvod

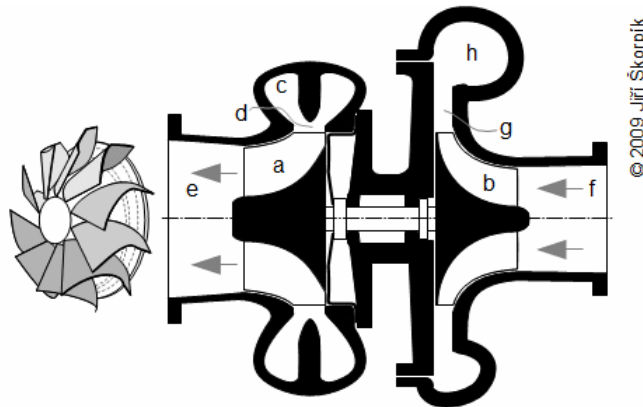
V moderní době významnou část strojího průmyslu tvoří výroba součástí pomocí CNC obráběcích center. S rostoucími nároky na přesnost a výkonnost obráběcího procesu je nutné stále hledat nové a optimální strategie obrábění a vhodné řezné podmínky, což platí pro výrobky složitého tvaru, mezi které se řadí také lopatková kola. Tyto strategie označujeme jako předdefinované dráhy nástroje, které jsou optimalizované pro různé typy tvarových ploch. Volba správné obráběcí strategie a správného nástroje nám umožní dosažení požadovaného povrchu, přesnosti a efektivity obrábění, ve které se skrývá například optimální životnost nástroje a nízký výrobní čas.

Cílem diplomové práce je využití nabízených lopatkových strategií v SW PowerMill od firmy Autodesk pro tvorbu NC programu, který je následně použit pro reálné obrábění lopatkového kola. Dalším bodem je volba proměnlivých řezných podmínek při dokončování lopatek a zjištění jejich vlivu na výslednou drsnost povrchu.

V teoretické části jsou popsána lopatková kola a nastíněna problematika víceosého obrábění. V praktické části je poté přiblížena tvorba bezkolizního NC programu, včetně přípravy potřebných geometrických dat a ověření drah nástroje. Následně je popsán průběh obrábění a provedena analýza drsnosti povrchu lopatkového kola, ze kterého je zjištěna závislost drsnosti na zvolených řezných podmínkách. Jako poslední bod je uvedena případná optimalizace použití lopatkových strategií a NC programu.

2 Lopatkové stroje

Pod pojmem lopatkové stroje se skrývá široká škála strojů, mezi něž patří například turbíny (parní, plynové/spalovací), turbokompresory (viz obr. 1) nebo odstředivá čerpadla. Základním principem těchto strojů je přeměna energie proudící tekutiny na rotační pohyb, či naopak. Tato přeměna energie je realizována rotorem osazeným lopatkami na jeho obvodě; ten můžeme nazvat lopatkové kolo. [1]



Obrázek 1: průřez turbodmychadlem - transformace tepelné energie na práci [1]

2.1 Dělení lopatkových strojů

Stroje můžeme dělit dle výstupu energie. Jestliže proudící tekutina předává energii rotoru a způsobuje jeho rotační pohyb, označíme tyto stroje turbínou. V opačném případě, kdy rotor způsobuje proudění tekutiny mezi lopatkami, se bude jednat o hydrodynamické čerpadlo, ventilátor, či turbokompresor. Pro stroje obou druhů je typický tlakový spád a rozdíl rychlosti tekutiny v oblasti před a za lopatkovým kolem. [1]

Hydrodynamická čerpadla

Tyto stroje slouží k přenosu kapaliny a zvyšování tlaku v oběhu. Lze je rozdělit na:

- Cirkulační (oběhová)
- Kondenzátní
- Napájecí

Turbokompresory

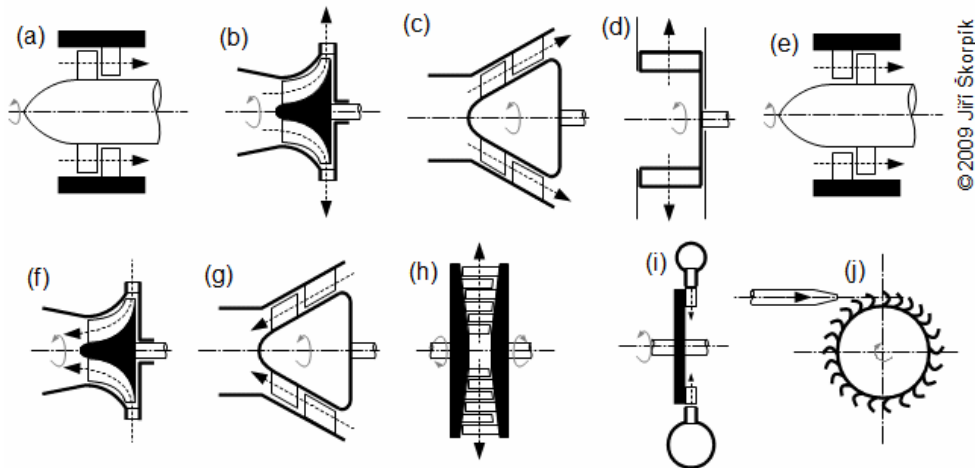
V těchto strojích dochází ke stlačování plynů a par za účelem zvýšení tlakové a vnitřní tepelné energie. Lopatkové kanály tvoří difuzor, ve kterém probíhá změna kinetické energie na entalpii.

Ventilátory

Účelem ventilátoru je přeprava plynů (většinou vzduchu) s mírným zvýšením tlaku plynu.

Turbíny

Jak již bylo řečeno, turbíny slouží k přeměně energie tekutiny na rotační pohyb rotoru. Můžeme sem zařadit turbíny vodní, plynové a parní (viz obr. 2). [1]



Obrázek 2: rozdělení lopatkových strojů podle směru proudění k ose rotoru [1]

2.2 Konstrukce lopatkových kol

Otevřené lopatkové kolo

Z názvu již plyne, že tato varianta má z obou stran lopatky otevřené, bez žádného ochranného krytu. Tato konstrukce (viz obr. 3) je vcelku slabá a používá se u levnějších verzích čerpadel, kde jsou nižší síly a zatížení. Na rozdíl od uzavřených konstrukcí si poradí s drobnými kousky pevných látek. [2]



Obrázek 3: otevřené lopatkové kolo [2]

Polootevřené lopatkové kolo

Tento typ má z jedné strany lopatky uzavřené a z druhé otevřené (viz obr. 4). Oproti otevřené konstrukci má vyšší mechanickou pevnost. Jsou vhodné pro středně velká čerpadla s malým množstvím usazenin. Vůle mezi tělesem čerpadla a lopatkami musí být velmi malá, aby nedocházelo k prokluzu. [2]



Obrázek 4: polootevřené lopatkové kolo [2]

Uzavřené lopatkové kolo

Uzavřené lopatkové kolo má z obou stran zakryté lopatky, což zajišťuje efektivnější proudění. Tato konstrukce (viz obr. 5) je však složitější a nákladnější. Jedním z důvodů je použití těsnících kroužků a jejich přísná tolerance uložení. Díky jejich aplikaci jsou sníženy axiální síly a pomáhají k vysoké účinnosti. Uplatnění naleznou zejména u velkých čerpadel, při kontaktu s usazeninou hrozí zadření. [2]



Obrázek 5: uzavřené lopatkové kolo [2]

2.3 Materiál lopatkových kol a turbín

Volba správného materiálu záleží na aplikaci lopatkového kola. Základní požadavky, které jsou na lopatková kola kladeny, jsou životnost a teplotní odolnost. Dalšími požadavky jsou korozní odolnost, nízká měrná hmotnost a odolnost proti poškození cizími tělesy, jako je písek, kameny nebo dokonce ptactvo v případě letadlové turbíny.

2.3.1 Hliníkové slitiny

Hliníkové slitiny jsou použitelné do teplot 180 °C a některé jsou precipitačně vytvrzované. Jejich předností je relativně malá hustota, přibližně 2,7 g/cm³, dobrá slévateľnost a relativně nízká cena. Ve vytvrzeném stavu hliníkové slitiny dosahují pevnosti až 540 MPa (EN AW 7075). Ze slitin se vyrábějí například turbodmychadla. [3] [4]

2.3.2 Žáruvzdorné a žárupevné oceli

Pro zajištění odolnosti proti oxidaci a elektrochemické korozi se do oceli přidává chrom, ocel je následně schopna pasivace. Minimální množství chromu je 11,94 % v tuhém roztoku. Oceli, které jsou schopny odolávat korozi za běžných teplot (20 °C), nazýváme korozivzdorné, pokud oceli jsou schopné odolávat korozi za zvýšených teplot, nazýváme je žáruvzdorné, a pokud jsou schopné za zvýšených teplot odolávat i mechanickému namáhání a vykazují určitou pevnost, nazýváme je žárupevné.

Žáruvzdorné oceli

Žáruvzdorné oceli odolávají oxidaci a korozi v plynech s vysokou teplotou. Aplikaci najde u roštů pecí, tepelných výměníků, kde teploty dosahují až 1 100 °C. Hlavními legujícími prvky jsou chrom, hliník a křemík. Na povrchu oceli se tvoří vrstva oxidu Cr₂O s malým obsahem Fe a Ni, jenž chrání součást před další oxidací. [5]

Žárupevné oceli

Žárupevné oceli mají podobné vlastnosti jako žáruvzdorné oceli, ale navíc jsou mechanicky namáhány za vysokých teplot. Mají odolnost proti tečení. V případě austenitické vytvrditelné oceli je možná aplikace až do teplot 650-750 °C. [6]

2.3.3 Hořčíkové slitiny

Hořčík má velmi malou hustotu - $1\,740\text{ kg/m}^3$ a je poměrně špatně tvařitelný, to souvisí s jeho typem mřížky (š.t.u.). Jeho teplota tavení je 650 °C . V čisté formě má hořčík v průmyslu mizivé zastoupení, avšak jeho slitiny mají veliký význam. Uplatnění naleznou hlavně v leteckém a automobilním průmyslu právě díky nízké hustotě a dobré pevnosti i za zvýšených teplot. Slitiny jsou často legované hliníkem a zinkem díky jejich dobré rozpustnosti v hořčíku v tuhém stavu Mg-Al-Zn. Další přídavný prvek je Mn, který zlepšuje korozní odolnost a přidává se obvykle do 0,5 %. [4]

2.3.4 Titanové slitiny

Titan a jeho slitiny najdou uplatnění hlavně v leteckém průmyslu díky skvělému poměru pevnosti a hustotě. Jeho aplikace je však limitována z důvodu vysoké ceny, kdy jeho cena může být 5x až 10x větší než u hliníkových slitin. Samotný titan má hustotu $4\,500\text{ kg/m}^3$, teplotu tání $1\,668\text{ °C}$ a jeho slitiny mají dvě rovnovážné fáze: β (š.t.u.) a α (k.t.s.) s teplotou přeměny 882 °C . Slitiny jsou použitelné do 600 °C , po překročení této teploty dochází k výraznému tečení a oxidaci. Do této teploty mají dílce životnost tisíce hodin. Slitiny se používají například ve vysoce rychlostních motorech, kde výfukové ventily dosahují teplot až 820 °C . Zde je však počítáno se sníženou životností oproti běžným aplikacím. [7] [8]

2.3.5 Niklové slitiny

Nikl má kubicky plošně středěnou mřížku, hustotu $8\,900\text{ kg/m}^3$ a teplotu tání $1\,453\text{ °C}$. Jeho slitiny jsou legovány mědí, chromem, železem, či molybdenem.

Ni-Cr-Co

Tyto slitiny díky legujícím prvkům mají vysokou pevnost při tečení a aplikují se jako součásti průmyslových pecí, nebo plynových turbín. Přibližné složení slitin může být 44,5 % niklu, 20-24 % chromu, 10-15 % kobaltu a 8-10 % molybdenu (Inconel 617®).

Ni-Cu

Slitiny odolávají korozi v prostředí slané vody a moře. Uplatnění tak naleznou v námořních potrubních systémech, čerpadlech a ventilech. Koncentrace niklu je minimálně 63 %, mědi 28-34 %. Příklady slitin: Monel 400®, Nickelvac® 400. [9]

3 Frézovací obráběcí centra

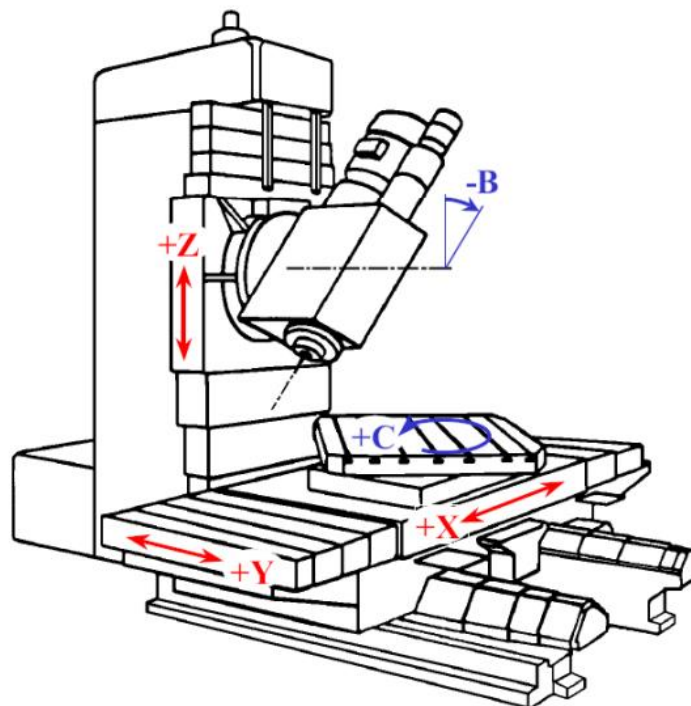
Frézovací centra slouží k obrábění nerotačních součástí. Tyto stroje zvládají širokou škálu operací (frézování, vrtání, vyvrtávání, vystružování, řezání závitů). Obvykle jsou konstruovány jako 3-osé až 5-ti osé stroje (viz obr. 6).

3.1 Konstrukce frézovacích center

Frézovací obráběcí centra mají v základu možnost pohybu nástroje vůči obrobku ve třech osách, tedy X, Y a Z. Z hlediska konstrukce můžeme výsledný pohyb v jednotlivých osách zajistit pohybem vřetene, či pohybem obrobku. Uspořádání jednotlivých os na daném stroji závisí na účelu tohoto stroje. Pokud bude účelem obrábění nadměrně hmotných dílců, bude s největší pravděpodobností všechny pohyby vykonávat vřeteno. Dále rozložení os závisí na požadavcích tuhosti a kinematiky stroje.

V rámci ucelení kinematiky CNC stroje byly zavedeny následující pravidla určování souřadného systému:

- Obrobek je nehybný, pohyb vykonává vřeteno/nástroj
- Osa X leží v upínací rovině stroje a je nejdelší osou
- Osa Z je rovnoběžná s osou vřetene/nástroje (v základním 3-osém provedení) [11]



Obrázek 6: 5-ti osé vertikální frézovací centrum [11]

3.2 Realizace 4. a 5. osy

Aplikace 4. a 5. osy znamená, že dochází k natočení obrobku vůči ose nástroje. Toho můžeme docílit několika způsoby (viz obr. 7): obě natočení zajistí vřeteno, nebo obě natočení zajistí obrobek, anebo natočení zajistí v jednom směru obrobek a v druhé ose vřeteno. Vliv uspořádání přidaných os má vliv na kinematiku celého stroje. Každá konstrukční varianta má svoje výhody a nevýhody a je vhodná na určitý typ obrobku.

Vřeteno/vřeteno

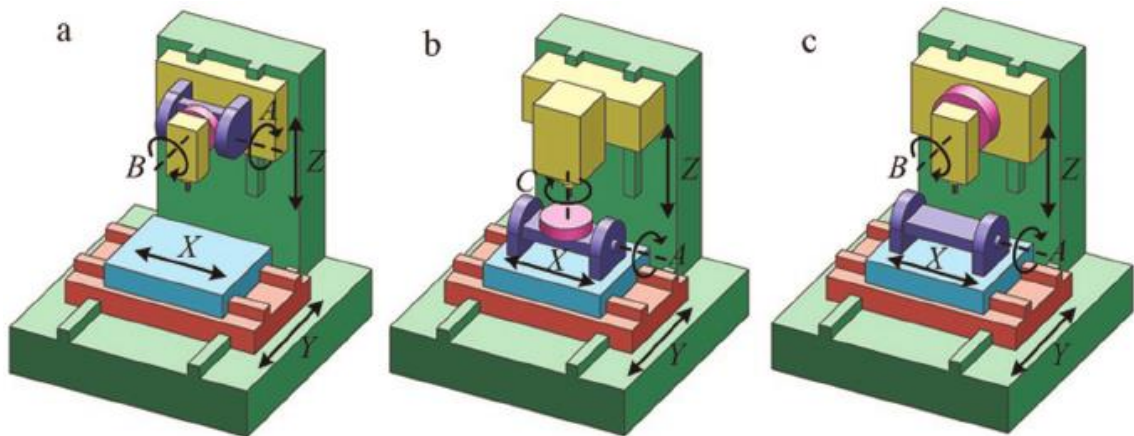
Tato konstrukce je většinou součástí portálového obráběcího centra neboli typu gantry. Při obrábění na tomto stroji koná veškerý pohyb vřeteno, a tudíž se hodí pro těžké obrobky a formy, které při obráběcím procesu nevykonávají žádný pohyb. Na limity této konstrukce narazíme u dílců s prvky, které mají malé poloměry, neboť například pro obrobení polokoule musí vřeteno urazit značnou lineární vzdálenost pro překlopení nástroje. Tato konstrukce má limity natočení vřetene.

Obrobek/vřeteno

Při tomto uspořádání je rozděleno natočení na obrobek a vřeteno. Natočení obrobku je realizováno otočným stolem, mezi jehož výhody patří neomezené natočení. Natočení vřetene má stále své limity jako v předchozí variantě.

Obrobek/obrobek

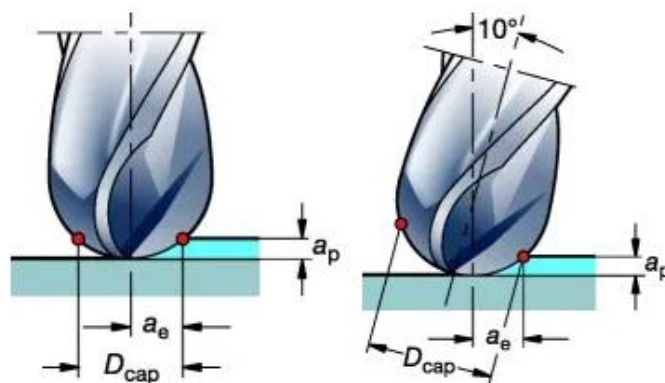
Při této konfiguraci je 4. i 5. osa přenesena na obrobek. Natočení je realizováno otočným stolem s kolébkou. Limity os zůstávají stejné jako v předchozí variantě, tedy v jednom směru neomezené natočení a ve druhém určitý limit. Tato varianta se hodí pro menší obrobky a lopatková kola. [12]



Obrázek 7: rozložení os obráběcího centra [13]

3.3 Vliv natočení osy nástroje

Při obrábění kulovým nástrojem se mění řezná rychlost v závislosti na jeho kontaktním bodu, kde se řezná rychlost směrem ke středu nástroje snižuje a uprostřed nástroje je nulová. Při obrábění tvarové plochy nám tedy v závislosti na kontaktním bodu kolísá řezná rychlost. Tento jev je nevhodný a má za následek horší kvalitu povrchu. 5-ti osé obrábění umožňuje stabilizaci kontaktního bodu (viz obr. 8), které má za následek konstantní řeznou rychlost, prodloužení životnosti nástroje, zlepšení utváření třísky, snadnější predikci chování stroje a celkově vede ke zlepšení výsledného povrchu. Doporučovaná hodnota natočení bývá 10° až 20° . [14]



Obrázek 8: Vliv natočení osy nástroje [14]

Natočení osy nástroje se uvádí ve dvou směrech: ve směru pohybu nástroje (lead angle) a ve směru kolmo na pohyb nástroje (tilt angle). Z prvního směru určujeme, zda je nástroj vlečený, či tlačný (viz obr. 9).

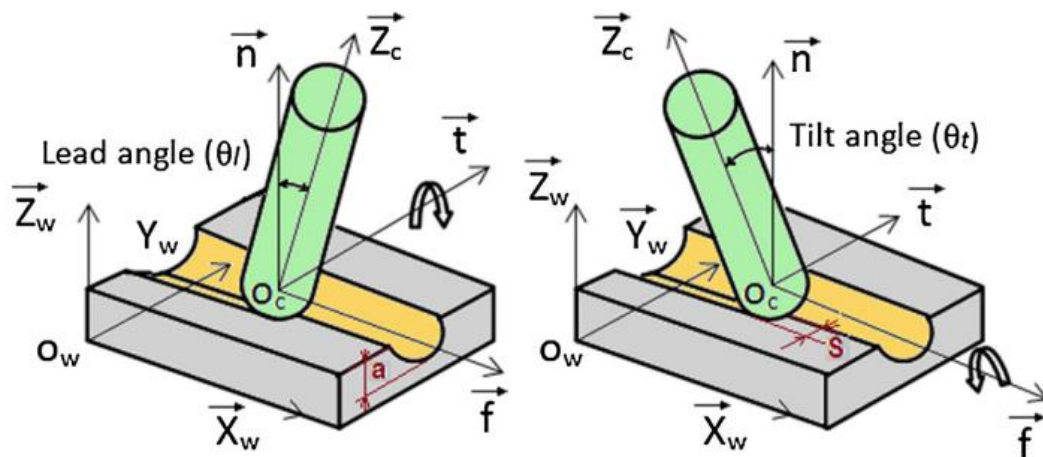
Efektivní průměr vykloněného nástroje o úhel β_n (1):

$$d_{eff} = D * \sin \left[\arccos \left(\frac{D-2*a_p}{d} \right) \pm \beta_n \right] \text{ [mm]} \quad (1)$$

Efektivní skutečná řezná rychlost (2):

$$V_c = \frac{\pi*d_{eff}*n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (2)$$

[15][16]



Obrázek 9: natočení nástroje při 5-ti osém obrábění [16]

4 CAM systém

CAM neboli Computer Aided Manufacturing, v češtině počítačová podpora výroby, využíváme pro programování obráběcích operací na CNC strojích. Krátce po 2. světové válce vzrostly nároky na tvarovou složitost dílce, což vedlo k vynálezu číslicového řízení (NC), které kompenzovalo potřebu kvalifikovaných operátorů. Prvotní uplatnění CAM systémů v 50. letech minulého století bylo v automobilním a leteckém průmyslu.

Aplikace CAM systému ve výrobě umožňuje větší flexibilitu a efektivitu, zároveň větší dozor nad produkcí, různé produkty a možnost reakce na změnu poptávky na trhu. CAM systém zajišťuje výrobu dílců, které byly vytvořeny v CADu (Computer Aided design) a analyzovány v CAE (Computer-Aided engineering). Tímto systémem mohou být krom obráběcích center řízení roboti, ovladače a další zařízení. CAM systémy jsou úzce spojeny s CAD systémy. Produkt z CAD systému musí obsahovat všechny informace o tolerancích a funkcích potřebných pro výrobu. Je také důležité při návrhu počítat s požadavky a limity CAM systému.

CAM systémy můžeme rozdělit na 2D, 2.5D, 3D a víceosé. 2D využívá například gravírovací laser, který může vycházet z 2D skicy a má konstatní osu Z. Dále je zde 2.5D obrábění, jež umožňuje obrábění v hladinách Z, ale stále dochází jen k interpolaci osy X a Y. 3D obrábění již umožňuje programovat takové dráhy, které vzniknou interpolací os X, Y a Z. Následně víceosé obrábění zvládají pokročilé CAM systémy, které zároveň dávají uživateli kontrolu nad velkým počtem parametrů pro tvorbu požadovaného výsledku. Mezi ně patří konstantní zatížení nástroje, automatický výpočet kroku do strany, detekce kolizí, obrobení zbytkového materiálu a pokročilé simulace. [17]

4.1 Postup tvorby programu pomocí CAM softwaru

Za pomoci CAMu jsme na rozdíl od ručního a dílenského programování schopni vygenerovat NC program s dráhami mnohem komplexnějšího charakteru a díky tomu je možné obrábět široké spektrum různých tvarových ploch, jako jsou například formy. Tvorba NC programu tkví ve vytvoření partprogramu, processingu, vytvoření CL dat, postprocessingu a následné vytvoření NC dat neboli G-kódu (viz obr.10).



Obrázek 10: tvorba NC programu pomocí CAMu

4.1.1 Partprogram

Základní data, se kterými CAM pracuje, nazýváme partprogram. Ten můžeme rozdělit na část geometrickou a technologickou. V této části je třeba promyslet výrobní postup, tedy sled operací.

Geometrická část

- CAD model obrobku
- Geometrie nástroje
- Tvar polotovaru
- Nulový bod obrobku
- Přídavky na obrábění
- Natočení polotovaru oproti souřadnému systému stroje

Technologická část

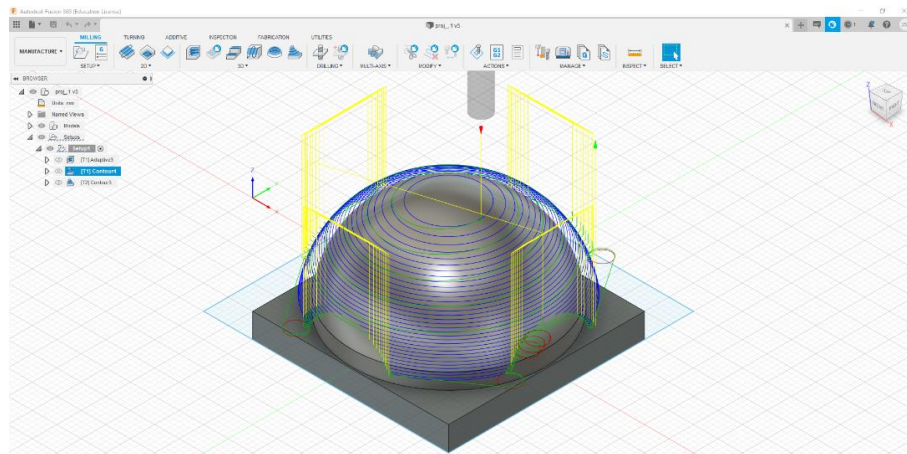
- Výměna nástrojů
- Dráhy nástroje
- Technologické podmínky
- Chlazení

Processing

Processing nám umožňuje generování drah nástroje, které získáme v podobě CL dat.

CL data

CL data neboli cutter location data nám dávají informaci o dráze nástroje (viz obr.11). V této chvíli je možné provést simulaci těchto drah, zkontrolovat kolize, popřípadě je upravit a optimalizovat. Nutno podotknout, že v této fázi lze simulovat pouze virtuální dráhu nástroje. Dráhy zatím nejsou vygenerovány pro jeden určitý stroj.



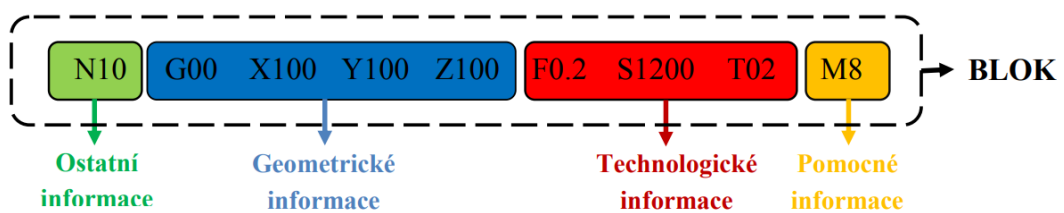
Obrázek 11: příklad vygenerovaných drah nástroje v SW Fusion 360

Postprocessing

Postprocessing nám slouží k převodu CL dat na NC data, které jsou již určené pro konkrétní stroj.

NC data

Ve finální fázi tvorby programu získáme NC data neboli g-kód. Tento kód můžeme popsat jako textový soubor, který v sobě nese všechny informace, jež stroj potřebuje pro zhotovení obrábění. Nalezneme v něm údaje o poloze nástroje, posuvech, chlazení, korekci nástrojů, jejich výměně, souřadných systémech, chlazení a další údaje. Data se zapisují do tzv. bloků (viz obr. 12). [11]



Obrázek 12: vzor zápisu NC programu [11]

4.2 CAD/CAM

CAD/CAM systém umožňuje návrh a zároveň výrobu součásti. Výhodou oproti použití rozdílného CAD a CAM systému je odstranění importu modelu do CAM součásti. Provázanost CAD a CAM systému umožňuje přepočítání drah nástroje, pokud změním CAD model. V případě samostatného CAD a CAM systému po změně CAD modelu je třeba jej opět importovat do CAM systému a znovu vygenerovat dráhy nástroje. CAD/CAM systémy se obvykle pohybují ve vyšší cenové relaci oproti samostatnému CAD a CAM systému. [18]

4.3 Víceosé obráběcí strategie

4.3.1 Hrubování kapes pomocí řídicí křivky a křivky naklopení

Hrubování obrobku se stále většinou dělá 3 - osým obráběním z důvodu snížení kolizí a jednoduché přípravy. Pokud ovšem chceme výrobu zefektivnit, je možné provádět operace hrubování víceosým obráběním (viz obr. 13). Jednou z možností je využití řídicí křivky, která nám obkresluje tvar obráběné plochy a křivky naklopení, jež určuje osu nástroje. Tímto způsobem jsem schopni snížit zbývající objem a výšku výstupku - scallop (viz tab. 1). [24]

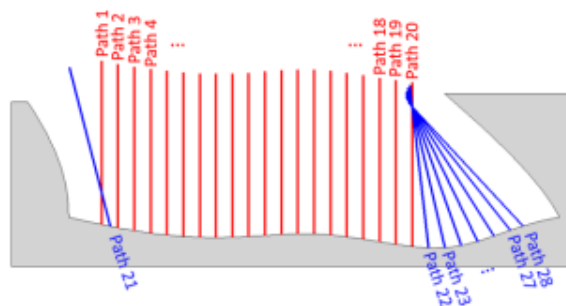


Fig. 5: Tool axis evolution between successive paths with added 5-axis paths

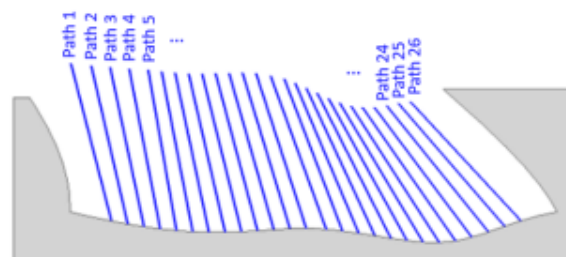


Fig. 6: Tool axis evolution between successive paths with flanks anticipation

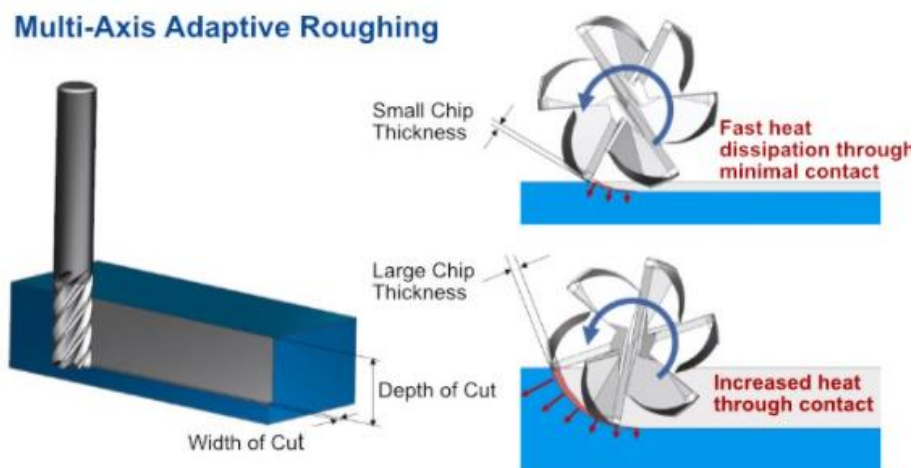
Obrázek 13: porovnání 3-osého a 5-ti osého hrubování[24]

Tabulka 1: porovnání 3 - osého a 5 - ti osého hrubování [24]

	3-axis roughing	5-axis roughing
Remaining volume (%)	11.8	1.9
Minimal tool length (mm)	44	35
Max. scallop height (mm)	5.1	1.6
SD of scallop heights (mm)	0.93	0.24

4.3.2 Víceosé adaptivní hrubování

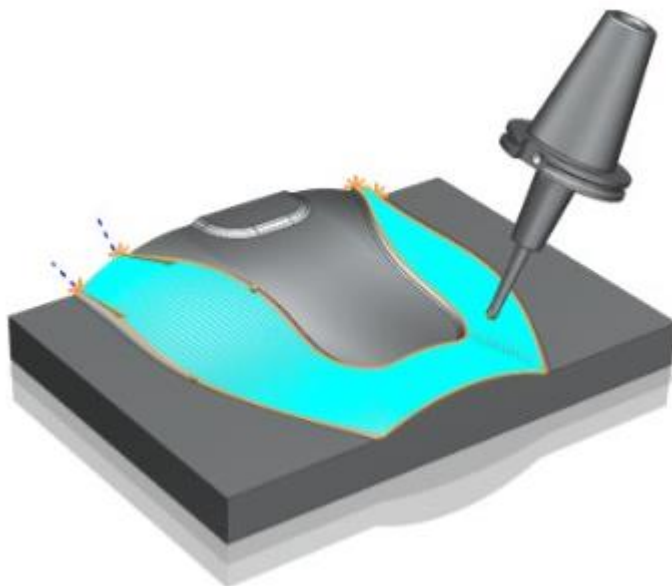
Tato strategie využívá malého kroku do strany společně s velkou radiální hloubkou řezu (viz obr. 14). Dráhy jsou vygenerovány tak, aby byla řezná síla co nejstabilnější. Tyto parametry nám umožní zvýšení řezného posuvu a zároveň zajistí zkrácení obráběcího času, snížení vibrací a předvídatelnější životnost nástroje. [25]



Obrázek 14: víceosé adaptivní hrubování

4.3.3 Dokončování pomocí řídicí křivky

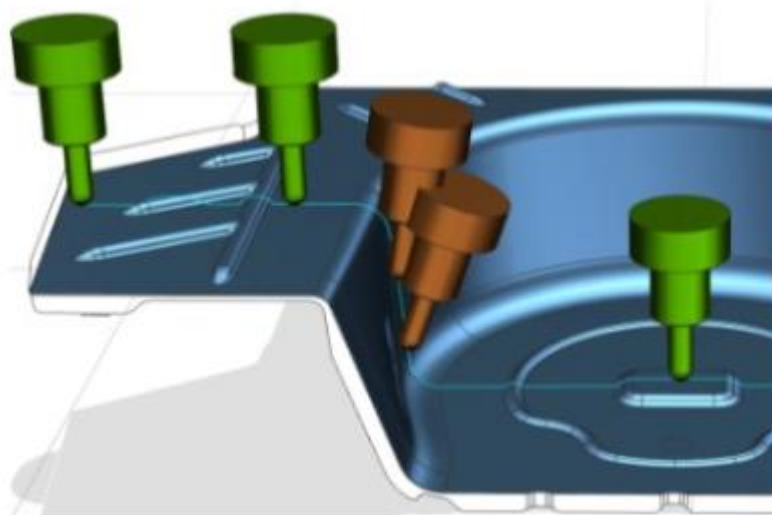
Tato strategie vytvoří dráhy nástroje přímo na obráběné ploše. Osa nástroje může být kolmá na danou plochu, interpolována mezi více osami, nebo může být zkrátka uzamknuta (viz obr. 15). [25]



Obrázek 15: dokončení pomocí řídicí křivky [25]

4.3.4 Automatická změna 3-osého na víceosé obrábění

Při 3 - osém obrábění hlubokých forem je třeba velké vyložení nástroje, což způsobuje chvění nástroje, zhoršení povrchu anebo redukce kroku do strany a tím navýšení času obrábění. Tento problém řeší tato strategie, která vyhodnocuje, kdy je nutné nástroj naklopit a kdy je možné frézovat ve 3 - osém režimu. To má za následek zmenšení vyložení nástroje a možnost agresivnějšího obrábění s ještě lepším povrchem (viz obr. 16). [25]



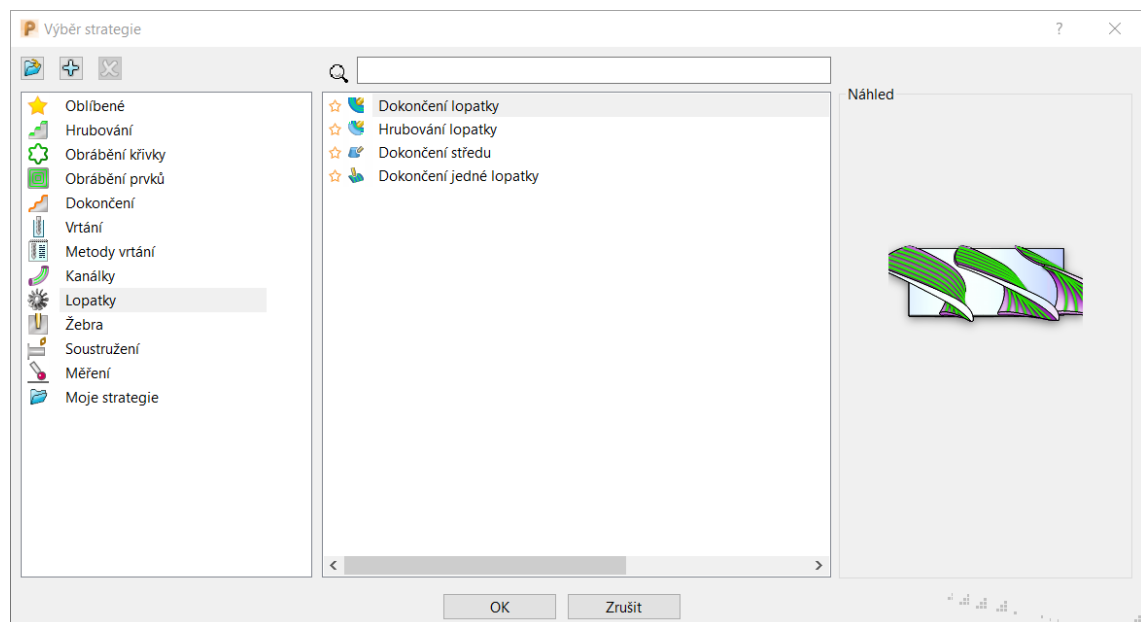
Obrázek 16: automatická změna osy nástroje [25]

4.4 CAM systém pro lopatková kola

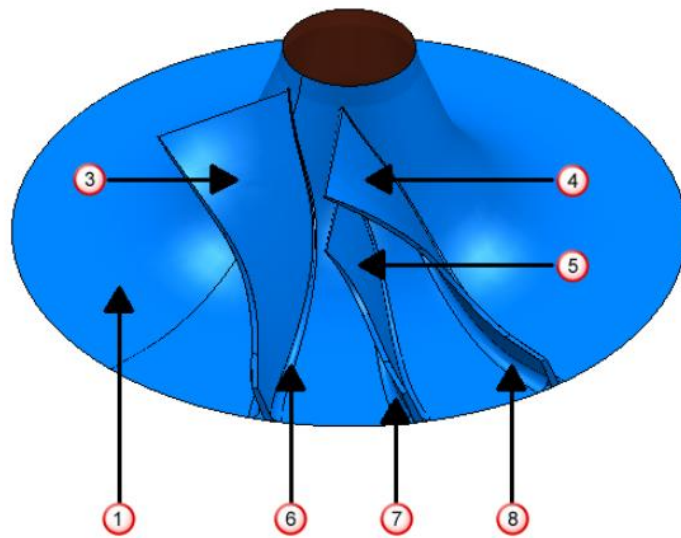
CAM pro lopatková kola nabízí vhodné strategie pro obrábění ve čtyřech a pěti osách. CAMy které disponují předdefinovanými strategiemi pro obrábění lopatkových kol jsou: hyperMILL, Siemens NX, PowerMill, CAMWorks a Mastercam. V následující kapitole bude přiblížen SW PowerMill z pohledu tvorby drah pro lopatková kola. S tímto programem se bude pracovat i v praktické části. [19] [20] [21] [22] [23]

4.4.1 PowerMill obrábění lopatkových kol

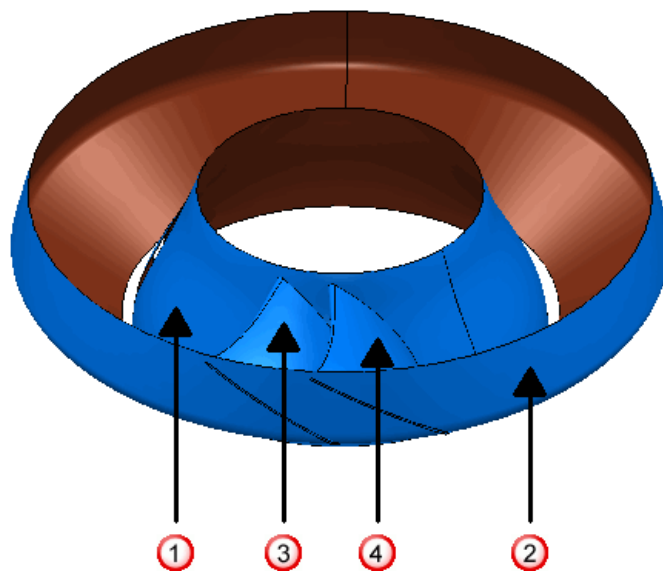
Tento CAM disponuje čtyřmi předdefinovanými strategiemi (viz obr. 17), kde první tři slouží k obrobení lopatkového kola a zbylá jsou určena pro obrobení samostatné lopatky. Pro tvorbu drah je potřeba plochy lopatkového kola rozdělit do hladin, ze kterých je následně rozpoznán náboj a lopatky (viz obr. 18). Je také nutné vytvořit obálku kola, jež je tvořena hranicí lopatek (viz obr. 19).



Obrázek 17: nabízené strategie v SW PowerMill



Obrázek 18: rozdělení hladin lopatkového kola 1 [20]



Obrázek 19: rozdělení hladin lopatkového kola 2 [20]

Tabulka 2: rozdělení prvků lopatkového kola

1 - střed	5 - mezilopatka
2 - hrana	6 - zaoblení levé lopatky
3 - levá lopatka	7 - zaoblení mezilopatky
4 - pravá lopatka	8 - zaoblení pravé lopatky

Hladiny musí obsahovat tyto položky:

Tabulka 3: přiřazení prvků do hladin

střed - 1	levá lopatka - 3 a 6
hrana - 2	pravá lopatka - 4 a 7
zaoblení - 6, 7 a 8	mezilopatka - 5 a 8

Hrubování lopatky

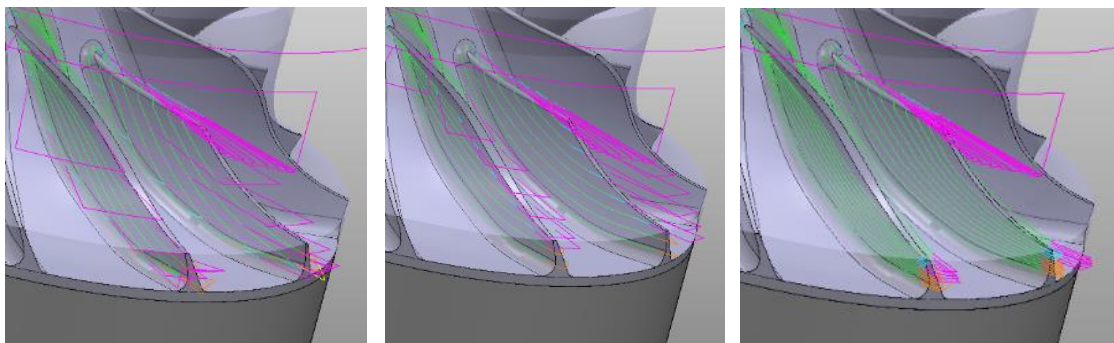
PowerMill zde hrubuje lopatkovou kapsu, kde může hrubovat tzv. rovnoběžnou metodou, kterou bychom označili za klasickou, nebo je zde možnost trochoidní metody. V této strategii je důležité nastavení polotovaru. Pro určení polotovaru můžeme použít: kvádr, válec, rotaci křivky nebo vložit model polotovaru. Dále se nastavují jednotlivé hladiny lopatkového kola: střed, hrana, pravá lopatka, levá lopatka, případně zaoblení a mezilopatka. Zbylé parametry se nastavují stejně jako v 3 - osé či 5 - ti osé strategii. SW umožňuje dopočítat počet lopatek a aplikovat hrubovací strategii na celé lopatkové kolo.

Dokončení středu

Zde platí to samé, co již bylo zmíněno u hrubování lopatky. Je třeba nastavit jednotlivé hladiny a strategii lze také uplatnit na celé kolo. Krok do strany je zde počítán od spodní části lopatkového kola (nejširší) a je tu aplikována strategie proudnicového obrábění, kde kapsa mezi levou a pravou lopatkou vytvářejí oblast, kde jsou generovány dráhy. Všechny dráhy jsou generovány po celé délce náboje.

Dokončení lopatky

Dokončení lopatky můžeme opět aplikovat na celé kolo a je třeba nastavit stejné hladiny lopatkového kola. Při dokončení lopatky SW PowerMill nabízí operace: obrábět levou lopatku, obrobit všechny plochy, levá lopatka a mezilopatka, pravá lopatka a mezilopatka. Dále je u strategie dokončení lopatky možnost volby offsetu: nahoru (od náboje), dolů (od hrany), anebo jejich protnutí (viz obr. 20,21,22).



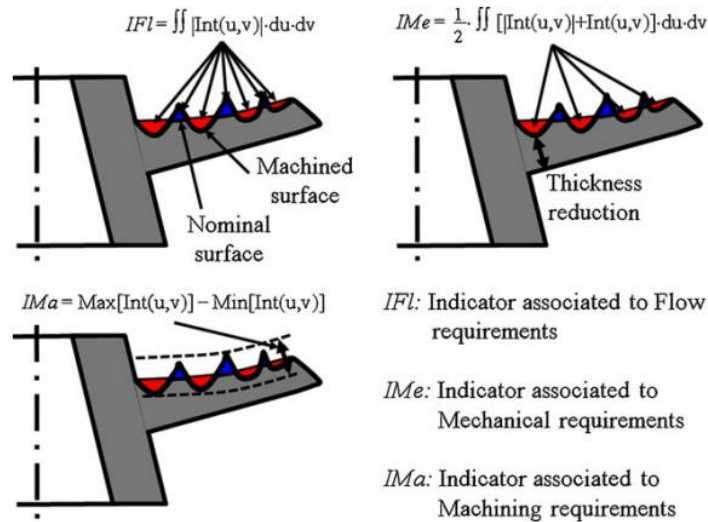
Obrázek 20: offset dolů

Obrázek 21: offset nahoru

Obrázek 22: protnutí

5 Kvalita povrchu a výrobní čas lopatkových kol

Při výrobě lopatkového kola nejsme schopni dosáhnout dokonalé shody mezi modelem a finálním obrobkem. Proto byly zavedeny určité indikátory (viz obr. 23), které nám pomáhají určit požadavky na shodu mezi modelem a obrobkem.



Obrázek 23: znázornění indikátorů určujících shodu mezi modelem a obrobkem [30]

Lopatku lze dokončovat bodovým nebo bočním frézováním. Bodové frézování potřebuje malý krok dolů, zatímco bočním frézováním jsme schopni obrobit lopatku i jednou drahou. Rozdíly a podmínky těchto strategií jsou popsány v další kapitole. Pokud jde o určení času obrábění, platí zde jednoduchý vzorec (3):

$$T_m = \frac{L_{toolpath}}{V_f} [min] \quad (3)$$

T_m – čas obrábění [min]

$L_{toolpath}$ – dráha nástroje [mm]

V_f – řezný posuv [mm/min]

Dráha nástroje

Dráha nástroje se bude výrazně lišit pro strategii bodového a bočního frézování, popřípadě bočního frézování s více přejezdy. Při aplikaci metody bodového frézování výsledná drsnost povrchu závisí na velikosti kroku dolů, kde velikost výstupku vychází s překrytí dvou kružnic mající poloměr nástroje.

Při bočním frézování je nástroj v přímkovém kontaktu s lopatkou a výstupek vznikající při bodovém frézování je eliminován. Výsledná kvalita povrchu je vyšší a drsnost povrchu je určena ze vzorce (4):

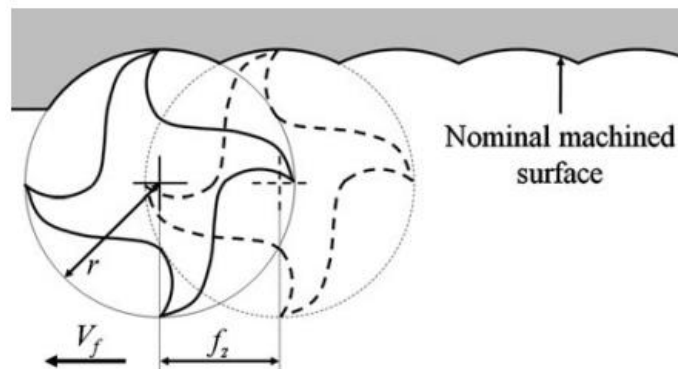
$$R_a = \frac{f_z^2}{18\sqrt{3}\cdot r} [\mu\text{m}] \quad (4)$$

R_a - drsnost povrchu [μm]

f_z - posuv na zub [mm/z]

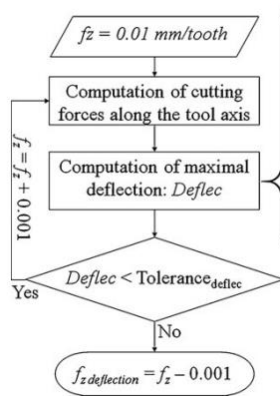
r – poloměr nástroje [mm]

Ze vzorce je patrné, že posuv na zub nám výrazně ovlivňuje výslednou drsnost (viz obr. 24) a také má výrazný vliv na vznikající řezné síly. Ty způsobují deformaci nástroje a lopatky a ovlivňují tedy výslednou geometrickou odchylku. Na řezné síly má dále vliv počet drah a velikost radiální hloubky řezu, kterou se snažíme volit co nejmenší při zachování minimální velikosti dle hodnoty minimální třísky pro daný nástroj.

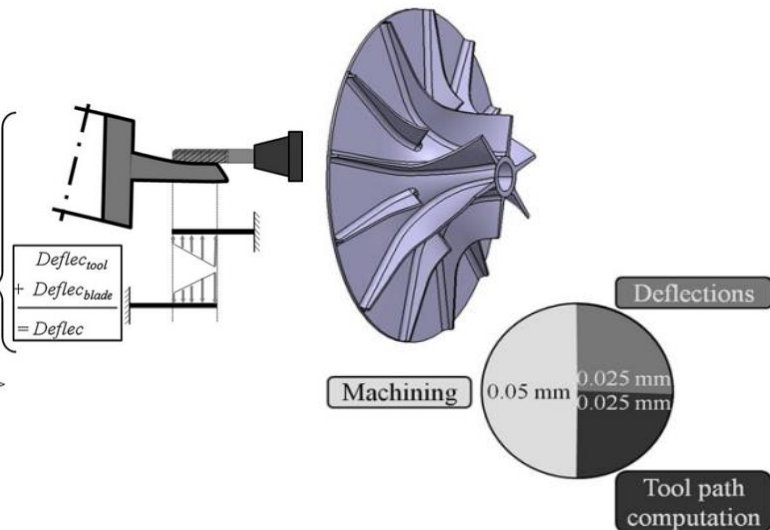


Obrázek 24: vliv posuvu na zub na výslednou kvalitu povrchu [30]

Celková výsledná nepřesnost vzniklá při obrábění zejména metodou bočního frézování je součtem zadané tolerance výpočtu drah a vzniklé deformace vzájemným působením sil nástroje a lopatky při obrábění (viz obr. 25, 26). [30]



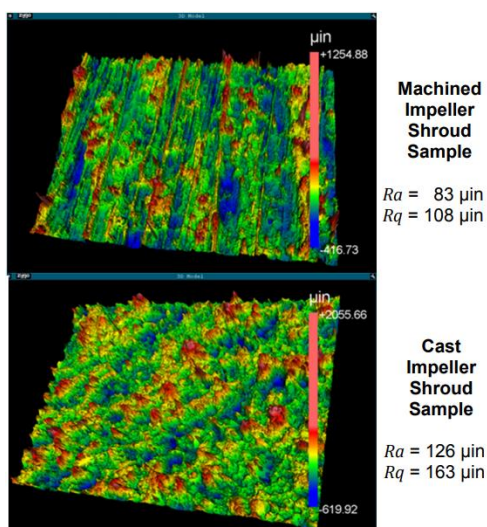
Obrázek 25: algoritmus optimalizace posuvu [30]



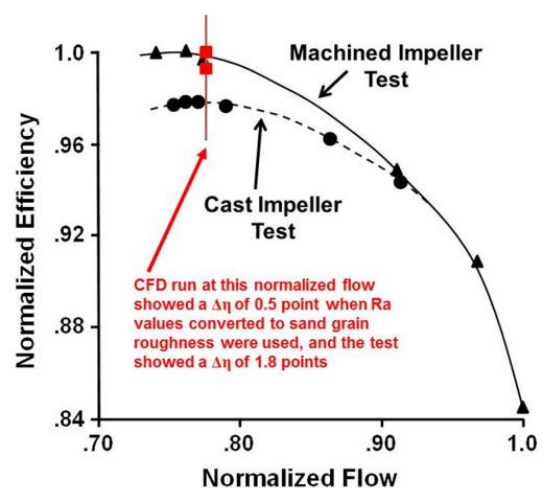
Obrázek 26: výsledná nepřesnost při obrábění lopatkového kola [30]

5.1 Vliv drsnosti povrchu na proudění tekutiny

Při simulování lopatkového kola z hlediska proudění tekutin se počítá s matematickým modelem, jenž má hladké plochy. V realitě však povrch nikdy není hladký a nabývá určité drsnosti. Ta má přímý vliv na vznik turbulencí v blízkosti povrchu, které způsobují smykové napětí a tím snižují jeho účinnost. Lopatková kola, jež jsou obráběna, mají vyšší kvalitu povrchu a geometrickou přesnost oproti kolům, která jsou vyráběna odléváním, což má za následek také vyšší účinnost (viz obr. 27, 28). Výstupky vzniklé na obrobeném povrchu jsou pravidelnější než na povrchu odlévaném [37]



Obrázek 27: povrch obrobeného a odlévaného lop. kola



Obrázek 28: účinnost obrobeného a odlévaného lop. kola

6 Obecný postup/strategie obrábění lopatek

Lopatky a lopatková kola obecně tvoří komplexní geometrie, kterou jsme schopni obrobit většinou pouze pomocí víceosých obráběcích strategií. Z důvodu potřeby použití víceosého obráběcího centra a velkých požadavků na kvalitu se jedná o nákladné obrábění. Výroba se skládá tak jako u jiného výrobku z přípravy polotovaru, hrubovacích a dokončovacích strategií.

6.1 Příprava a upnutí polotovaru

Volba polotovaru záleží na vybavení. Pokud disponujeme soustružnickým obráběcím centrem, je vhodná příprava polotovaru, jenž kopíruje rotační tvar daného lopatkového kola. Další možností polotovaru je jednoduchý válec.

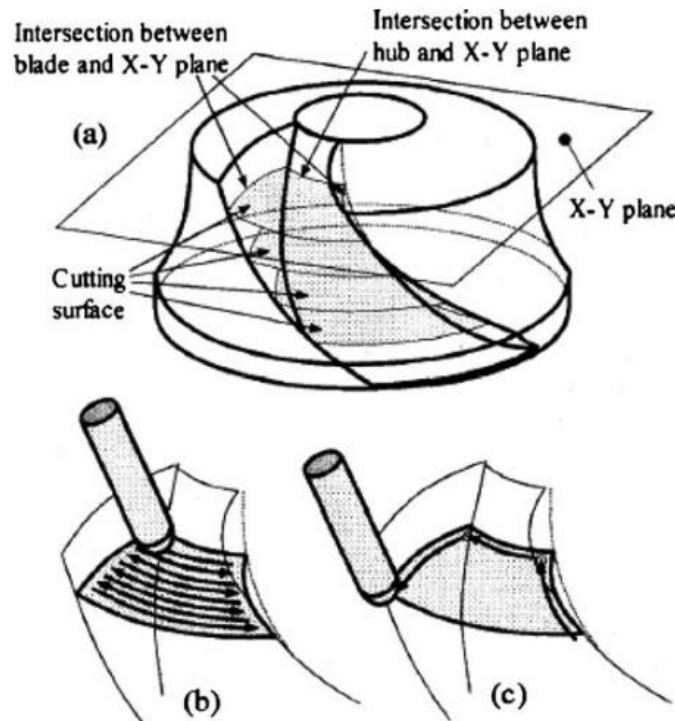
Upnutí lze realizovat dvěma hlavními způsoby. První možností je upnutí do svěráku, či sklíčidla za spodní část polotovaru, jenž se nebude obrábět. Druhou možností je upnutí pomocí trnu, který prochází středním otvorem a přitahuje součást za horní plochu polotovaru. Druhá možnost je příznivější z hlediska tuhosti, avšak je třeba při programování počítat s překážkou v horní části polotovaru.

6.2 Hrubování

Hrubování lopatkového kola je značnou částí obráběcího procesu. Pro zajištění produktivity se snažíme zvolit nástroj s co největším průměrem a zároveň s nejmenším vyložení. Tato volba nástroje nám zajistí příznivé strojní časy a vhodné přídatky na následné dokončovací operace.

Lopatková kola jsou většinou vyráběna z těžce obrobitelných materiálů a mají složitou geometrii. Při hrubování jsou dráhy nástroje generovány pro prostor mezi levou a pravou lopatkou, které mezi sebou mohou mít ještě dělicí lopatku. Dle Morishige je následně možné vygenerovat dráhy nástroje v jednotlivých vrstvách (viz obr. 29), osa nástroje je zvolena tak, aby nenastala kolize s modelem. Tyto dráhy respektují 3D model a jsou vhodné pro rovné a mírně zahnuté lopatky. Při obrábění velmi zakřivených lopatek tímto způsobem hrozí kolize a je potřebná důkladná kontrola.

Další možností, jak přistoupit ke hrubování je metoda dle Chuanga. Nejprve se B - spline povrchy rozloží na Beziérovovy povrchy, které jsou následně sjednoceny a vytvoří hrubý aproximační model. Tento model je následně rozdělen do jednotlivých vrstev, ve kterých jsou automaticky vygenerovány dráhy hrubování, takže jednotlivé vrstvy vnímá jako 2D kapsy.[31]



Obrázek 29: hrubovací strategie dle Morishige [31]

6.3 Dokončování

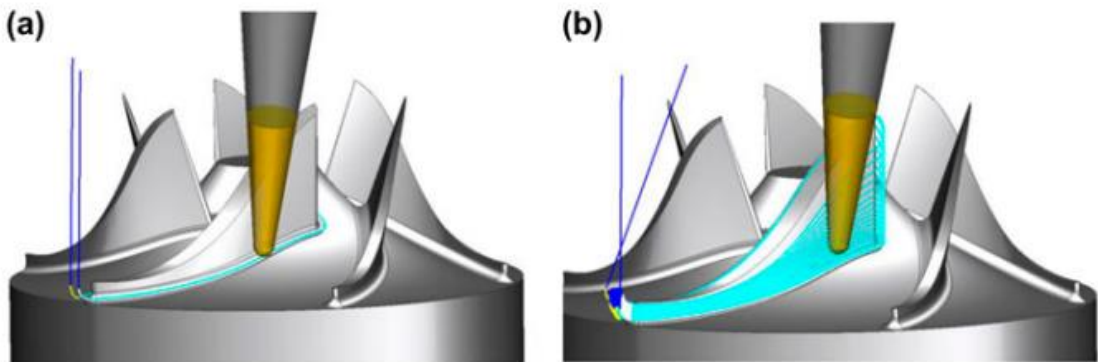
Pro docílení kvalitního povrchu obrobku a přesné geometrie je třeba zvolit vhodné obráběcí strategie. Při obrábění lopatkového kola se bavíme hlavně o dokončování náboje a jednotlivých lopatek.

Dráhy pro obrábění náboje je vhodné generovat v axiálním směru, neboť nástroj zůstane déle v řezu oproti dráhám radiálního charakteru, kde dochází k většímu počtu přejezdů.

Obrábění lopatek lze provést dvěma základními metodami, a to buď bočním, nebo bodovým frézováním (viz obr. 30). Boční frézování (flank milling) je charakteristické velkým axiálním záběrem nástroje a malým krokem do strany.

Uplatní se pro lopatky, jejichž geometrie má přímkový charakter. Lopatky je dokonce možné obrobit na jeden průjezd nástroje, což se odrazí na snížení strojního času a tím i na snížení nákladů.

Touto metodou však nelze obrobit lopatky se zakřivenou geometrií. Zde je nutné použít bodové frézování (point milling), které oproti bočnímu má malý axiální záběr. Pro bodové frézování je také specifické potřeba mnohem více drah pro dosažení kvalitního povrchu s nízkou hodnotou drsnosti. [32] [33]



Obrázek 30: (a) strategie bočního frézování, (b) strategie bodového frézování [33]

7 Moderní nástroje používané pro 5-ti osé obrábění

7.1 Toroidní frézy

Toroidní frézy jsou válcové frézy s rádiusovým zaoblením hrany, jež je menší, než je poloměr frézy (viz obr. 31, 32). Tato geometrie zajišťuje dobrý povrch obrobku a zároveň činí nástroj odolnějším proti porušení a opotřebení. Frézy se používají pro hrubování forem, výrobu drážek, čelní obrábění a frézování děr. Jsou dostupné v monolitním provedení, nebo obvykle při větších rozměrech ve verzi s výměnnými břitovými destičkami. [26]



Obrázek 32: toroidní fréza s VBD [26] Obrázek 31: monolitní toroidní fréza [27]

7.2 Kulové kuželové frézy

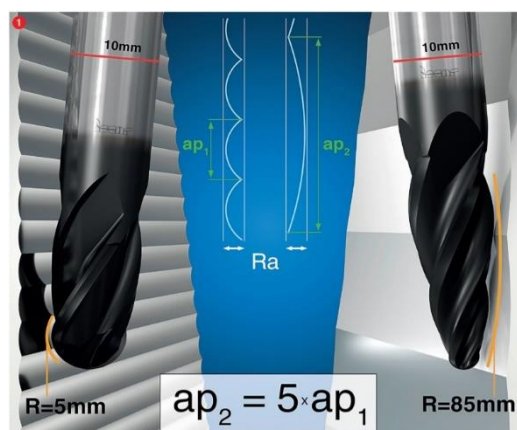
Hlavním nedostatkem kulových fréz s válcovou stopkou zejména při malých poloměrech špičky je jejich malá tuhost a s tím je spojena i hodnota vyložení nástroje. Nahrazení válcové stopky kuželovou zvyšuje tuhost a možné vyložení nástroje (viz obr. 33). Takovým nástrojem poté lze například obrábět celou plochu lopatky, pokud má přímkovou geometrii, čímž se výrazně snižuje výrobní čas. Někteří výrobci dokonce nabízejí frézy tohoto typu, jež jsou schopné obrobit celé lopatkové kolo, tedy zvládají veškeré hrubovací a dokončovací operace.[29]



Obrázek 33: ukázka kulových kuželových fréz [29]

7.3 Soudečkové frézy

Soudečkové frézy, anglicky barrel cutters, jsou nástroje, jejichž tvar břitu připomíná siluetu soudku. Tato specifická geometrie umožňuje několikanásobně zvýšit vzdálenost mezi jednotlivými dráhami, a to bez zvýšení drsnosti obrobeného povrchu. Důsledkem toho je menší počet drah a kratší rezný čas, čímž se snižují i náklady spojené s obráběním (viz obr. 34). Tento typ nástroje najde uplatnění hlavně pro polodokončovací a dokončovací operace mezi výrobci forem, turbín kompresorů, dále v medicínském a leteckém průmyslu. Vyrábějí a prodávají se zejména jako nástroje s výměnnou břitovou korunkou, neboť je výhodnější než monolitní fréza z důvodu skoro nemožného/náročného opětovného broušení. [28]



Obrázek 34: porovnání kulové a soudečkové frézy [28]

8 Experiment

Experiment spočívá v přípravě NC programu pro výrobu lopatkového kola v SW PowerMill a jeho následné výroby. Pro ni bude využito jediné dostupné frézovací centrum Okuma MU-400V II a dostupné nástroje.

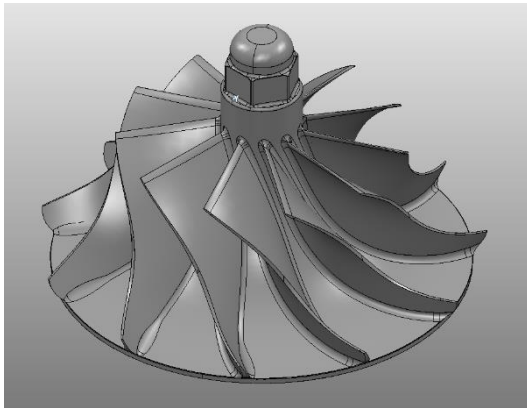
Další součástí experimentu tvoří volba proměnlivých řezných podmínek pro strategii dokončení lopatek, kde se měnil posuv na zub. Tato část je tvořena z důvodu limitu vřetene, které má maximální otáčky 15 000 ot/min. Pro možnost využití doporučené řezné rychlosti dané výrobcem nástrojů bychom museli dosahovat rychlosti vřetene přibližně až 40 000 ot/min. Z tohoto důvodu jsou pro dokončovací operace lopatek zachovány otáčky vřetene (14 000 ot/min) a byla procentuálně navyšována hodnota posuvu na zub, která byla doporučena výrobcem.

Dvě lopatky byly obrobena stejným posuvem a pro následující pár byla zvětšena hodnota posuvu. Lopatky byly následně vyhodnoceny z hlediska drsnosti povrchu. Bylo očekáváno, že drsnost povrchu ve směru kolmém na dráhy nástroje se nebude kriticky lišit, pokud nedojde k vibracím lopatky při obrábění.

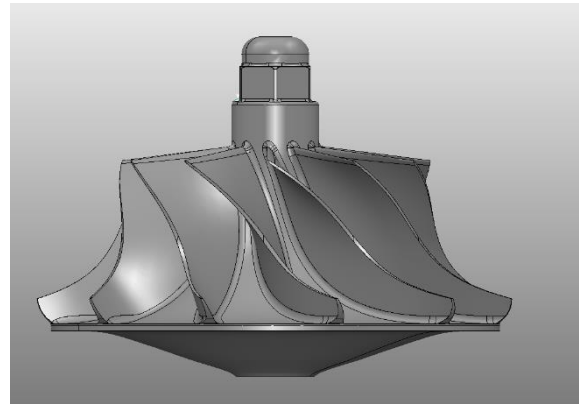
Pro výrobu lopatkového kola byl využit hlavně SW PowerMill, následně pro tvorbu pomocné geometrie SW Powershape.

8.1 Model a příprava geometrických dat

Jedná se o model kompresorového lopatkového kola do turbodmychadla nákladního automobilu o rozměrech: $D_{\max} = 81,5$ mm, $h = 38$ mm. Lopatkové kolo je polootevřená konstrukce bez mezilopatky a čítá 11 lopatek (viz obr. 35, 36). Součástí modelu je matka, která je součástí upínacího systému pro případné zamezení kolizí při generování drah nástroje.



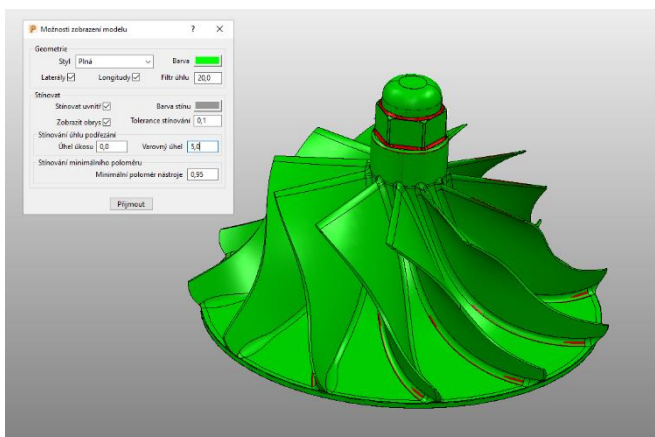
Obrázek 35: model lopatkového kola 1



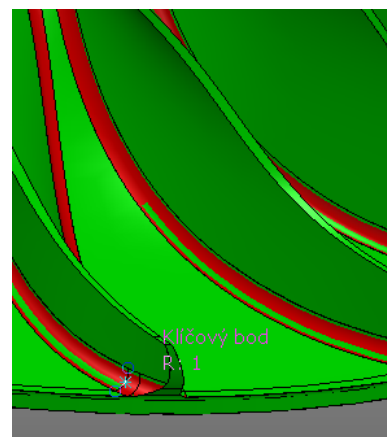
Obrázek 36: model lopatkového kola 2

8.1.1 Analýza geometrie

Prvním krokem přípravy programu byl import CAD modelu lopatkového kola do SW POWERMILL ultimate 2022. Model lopatkového kola byl poskytnut ve formátu .stp. Následně byla provedena analýza pro zjištění minimálních poloměrů lopatkového kola. Oblast s nejmenším poloměrem zaoblení kořene lopatkového kola, kde byla jeho hodnota určena $r = 1$ mm, nám udává, jaký maximální poloměr musí mít nástroj pro dokončovací operace zejména v dané oblasti (viz obr 37, 38).



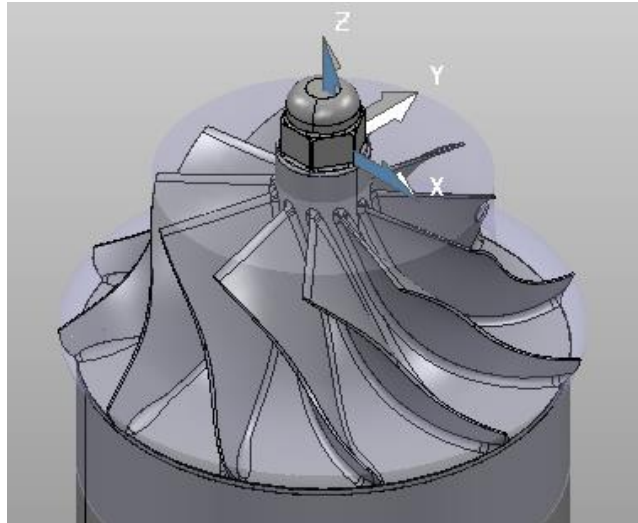
Obrázek 37: analýza minimálního poloměru 1



Obrázek 38: analýza minimálního poloměru 2

8.1.2 Tvorba pomocné geometrie

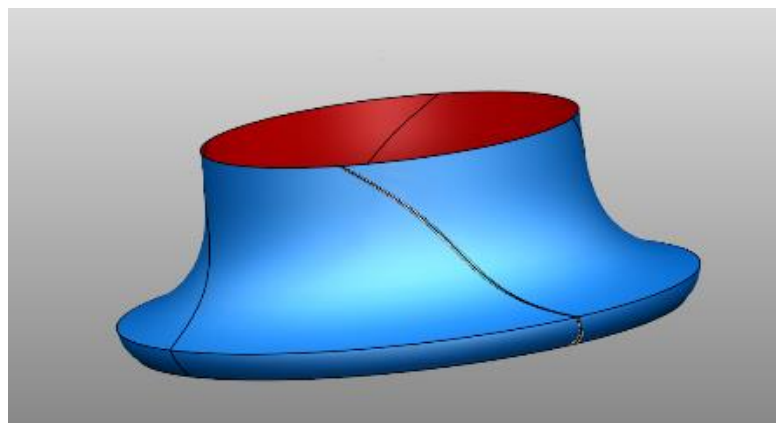
Pro tvorbu hlavního programu je nutné jasně určit geometrické prvky lopatkového kola a zároveň vytvořit pomocnou geometrii. Jedná se především o obálku lopatkového kola a tvorbu tělesa polotovarů, jenž je rotační konturou lopatkového kola. Tvorba pomocné geometrie probíhala v SW POWERSHAPE ULTIMATE, který je také od společnosti AUTODESK. Souřadný systém v obou SW je zvolen jako střed kružnice na vrchu lopatkového kola (viz obr. 39).



Obrázek 39: model lopatkového kola se zarovnaným souřadným systémem

Tvorba obálky (hrany)

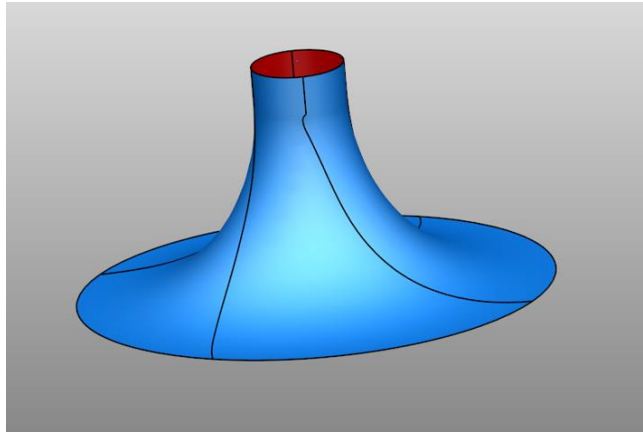
Na hraně lopatky byla vytvořena beziér přichycená křivka, jež byla následně rotována kolem osy lopatkového kola (osa Z). Pro zajištění hladkosti dané plochy byla z vzniklé plochy vytvořena nová křivka pomocí řezu v rovině ZX. Její body byly následně rovnoměrně přerozděleny. Pomocí vzniklé křivky byla opět vytvořena plocha, jež bude sloužit jako obálka (viz obr. 40).



Obrázek 40: plocha hrany lopatkového kola

Tvorba náboje

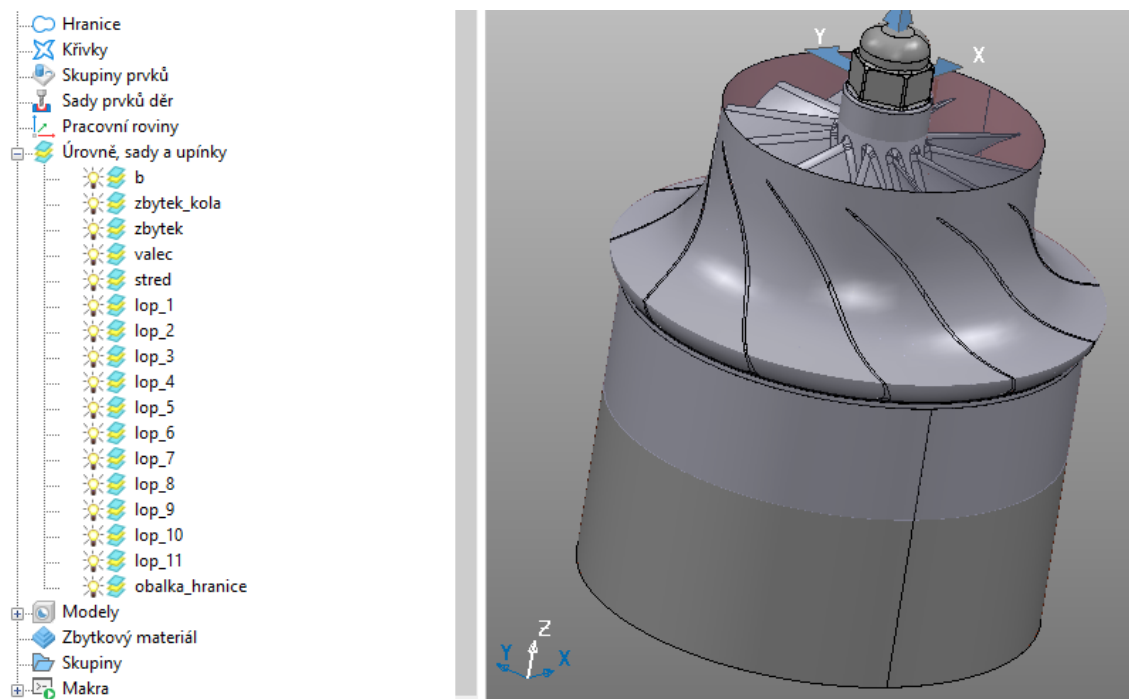
Pro zajištění správné geometrie náboje byl opakován postup - viz tvorba obálky. Původní plochy náboje lopatkového kola byly smazány a nahrazeny plochou (viz obr. 41).



Obrázek 41: plocha náboje

Tvorba hladin

Model lopatkového kola byl zpětně vložen do SW POWERMILL a následně proběhlo rozdělení geometrie do jednotlivých hladin (viz obr. 42). Důležité hladiny pro generování drah jsou obálka_hranice, střed a jednotlivé lopatky. Zbytek tvoří geometrie podstavy a upínací matky, pro strategie obrábění lopatkového kola má význam pouze z hlediska kolizí.

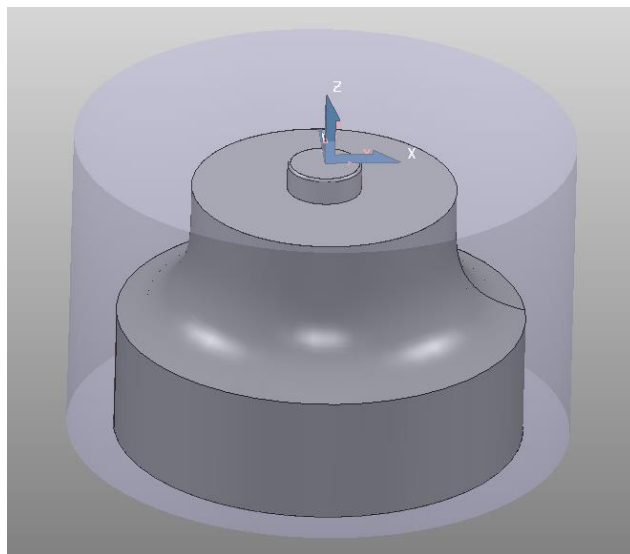


Obrázek 42: hladiny lopatkového kola

Tvorba polotovaru

Vstupním polotovarem je válec, který byl upraven na frézovaný polotovaz, jenž má tvar kontury lopatkového kola s válcovou podstavou (viz obr. 43). Délka podstavy je důležitá z hlediska kinematiky rotačních os a ovlivňuje například tzv. překlopení. Podstava byla naznačena do modelu o délce $L = 50$ mm, v realitě však bude nejspíše delší.

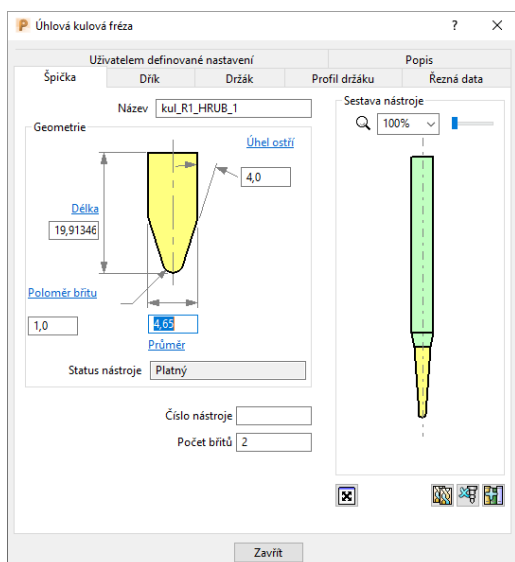
Pro tvorbu vrchní části polotovaru byla využita obálka lopatkového kola, jež byla v horní a dolní části „zalepena“ pomocí funkce ploch v SW PowerShape. Z této ohraničené plochy a horní části lopatkového kola byl následně vytvořen solid. Ten byl uložen jako samostatné těleso ve formátu .x_t. Podstava polotovaru byla vytvořena jednoduchým tažením kružnice.



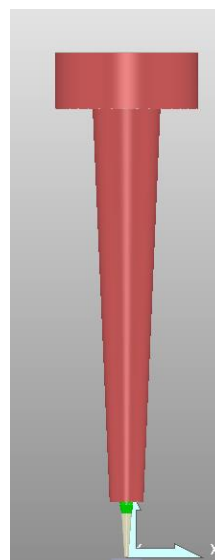
Obrázek 43: model polotovaru určený pro lopatkové strategie

Tvorba nástrojů

V okně tvorby nástrojů byly zadány parametry nástroje uvedené výrobcem a bylo zvoleno vyložení nástroje v upínači 30 mm (viz obr. 44, 45). Oba nástroje mají poloměr špičky 1 mm a úhel kuželu 4° .



Obrázek 44: tvorba geometrie nástroje



Obrázek 45: model nástroje s držákem a vyložení 30 mm

8.2 Materiál lopatkového kola

Pro tento experiment je použit dural EN AW 7075 t6. Slitina obsahuje zejména hliník, zinek a hořčík a používá se ve vytvrzeném stavu. Mezi její přednosti patří hlavně vysoká pevnost (460 MPa), nízká měrná hmotnost a dobrá obrobitelnost. Co se nevýhod týče, tato slitina se obtížněji svařuje a eloxuje, dále také hůře odolává atmosferické korozi. [34]

Chemické složení (zbylé procento tvoří hliník):

Tabulka 4: chemické složení slitiny EN AW 7075 t6 [34]

Legující prvky	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr+ Ti	Jiné prvky
[%]	0,4	0,5	1,2-2	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,2	0,25	0,15

8.3 použité obráběcí centrum

Obrábění bylo realizováno na 5-ti osém obráběcím centru Okuma MU-400V II (viz obr. 46). Centrum používá pro realizaci rotačních posuvů tzv. kolébku, oba rotační pohyby realizuje obrobek. Stroj má technické parametry (viz tab. 5).



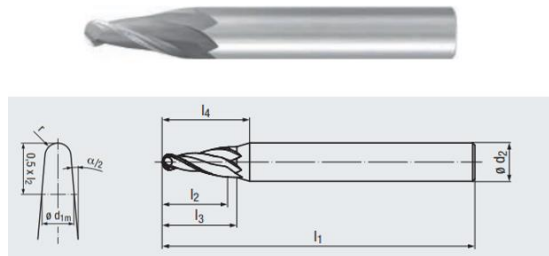
Obrázek 46: Okuma MU-400V II [35]

Tabulka 5: parametry stroje Okuma MU-400V II

Pracovní stůl	
Průměr upínací plochy	400 mm
Max. rozměry obrobku	Ø 600 x H 400 mm
Max. otáčky	50 ot/min
Rozsah/pojezd os	
Osa X	762 mm
Osa Y	460 mm
Osa Z	460 mm
Osa A	+20 ° až -110 °
Osa C	360 ° (neomezeně)
Posuvy	
Rychloposuv	X/Y/Z: 40/40/32 m/min
Rychloposuv rotačních os	A/C: 18.000/14.400 °/min
Max. pracovní posuv	X/Y/Z: 32 m/min
Vřeteno	
Rozsah otáček	15 tis. ot/min
Výkon motoru (10 min/trvale)	22/18,5 kW
Upínací kužel	MAS BT40

8.4 Použité nástroje a upínač

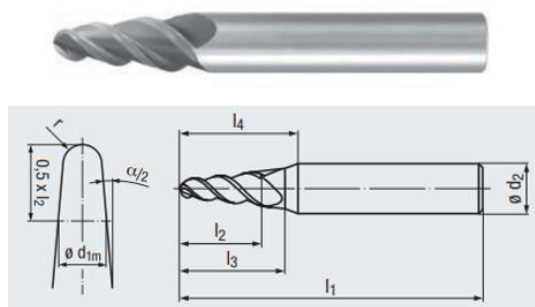
Nástroje pro obrábění byly vybrány od firmy EMUGE FRANKEN, jež nabízí vhodné nástroje právě pro obrábění lopatkových kol (viz obr. 47, 48). Pro hrubování i dokončování byly vybrány monolitní kuželové frézy, jejichž volba vychází z analýzy lopatkového kola v následující kapitole. Frézy mají parametry a doporučené rezné podmínky (viz tab. 6,7).



Obrázek 47: kuželová fréza 3446 [36]

Tabulka 6: parametry kuželové frézy 3446 (hrubovací operace)

$\alpha/2$ [°]	R [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
vc	fz							
320	0,035xr							



Obrázek 48: kuželová fréza 3440 [36]

Tabulka 7: parametry kuželové frézy 3440 (dokončovací operace)

$\alpha/2$ [°]	r [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
vc	fz							
180	0,012xr							

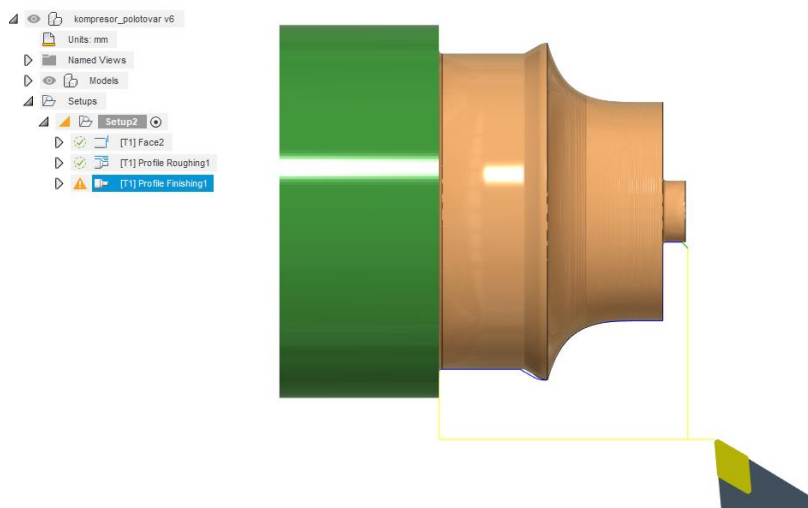
Pro upnutí fréz byl použit tepelný upínač od firmy Haimer DIN 69893-1 HSK-A63 (viz obr. 49). Jeho délka je 200 mm a vyložení upnutého nástroje bylo zvoleno na 30 mm. Tento typ upínače je velmi přesný a vykazuje nízkou obvodovou házivost.



Obrázek 49: tepelný upínač Haimer DIN 69893-1 HSK-A63

8.5 Tvorba NC programu

Pro generování NC programu polotovaru lopatkového kola měl být využit SW Fusion 360, ve kterém byly vygenerovány dráhy (viz obr. 50). Z důvodu zvýšení přesnosti polotovaru a zamezení vzniklé chyby při opětovném upnutí příprava polotovaru probíhala již na frézovacím centru, kde kontura vznikla frézováním.



Obrázek 50: výsledek simulace obrábění v SW Fusion 360

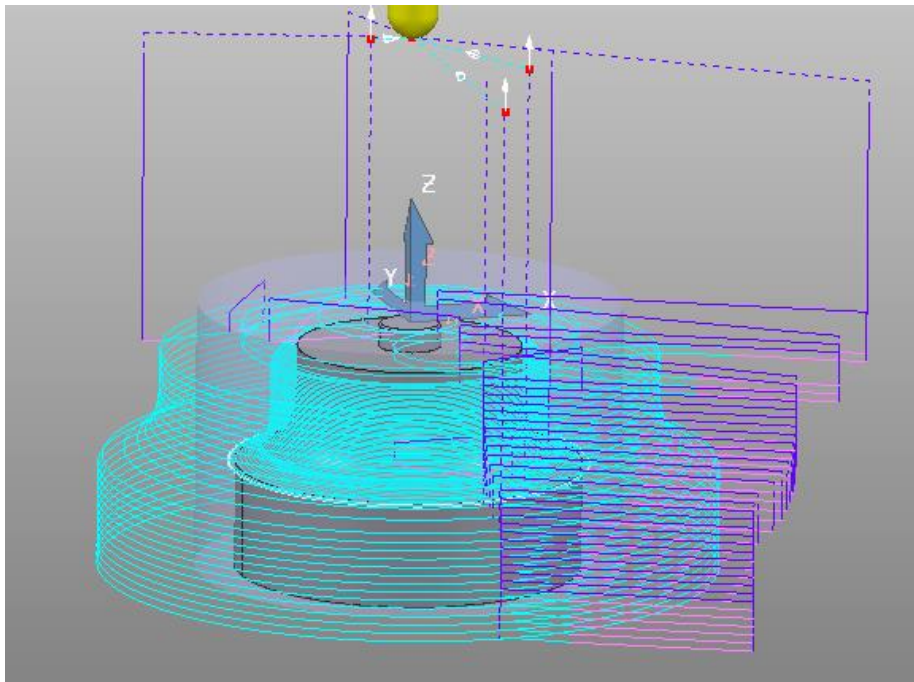
V SW PowerMill byl vytvořen nezávislý projekt, kde finálním obrobkem je polotovar (viz obr. 51, 52) určený pro následné strategie obrábění lopatkového kola. Nástroje byly zvoleny dle dostupných možností. Pro hrubování a dokončení rovin byla

použita válcová frézovací hlava o průměru $D = 63$ mm a pro dokončení kontury kulová fréza o průměru $D = 12$ mm.

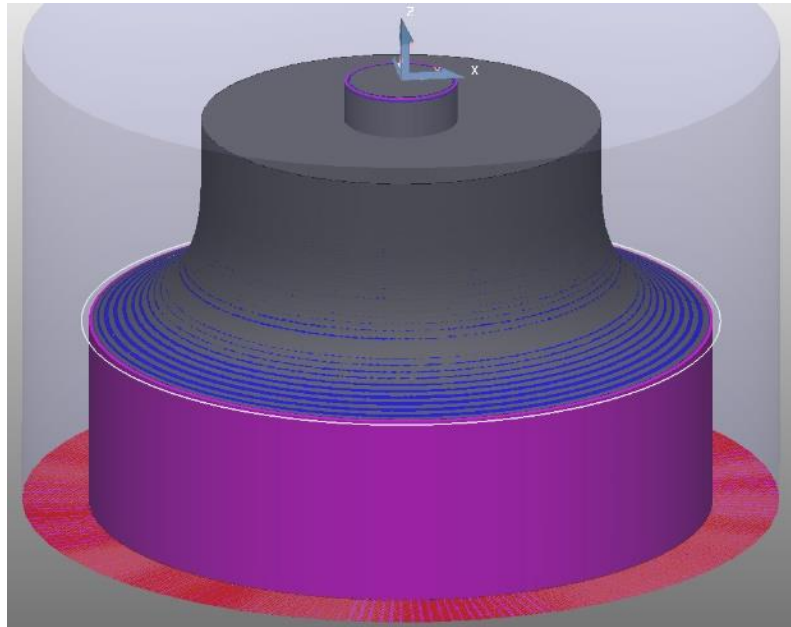
Vygenerovaný NC program se skládá ze čtyř drah:

- Hrubování (str. hrubování modelu)
- Dokončení_rovin (str. dokončení rovin konturováním)
 $Fz = 0,07$ mm; $vc = 180$ m/min; $ap = 2$ mm; $ae = 60$ mm
- Dokončení_KUL_12_1 (str. optimalizovaná hladina Z-spirála)
 $Fz = 0,05$ mm; $vc = 180$ m/min; $ap = 0,5$ mm
- Dokončení_KUL_12_2 (str. optimalizovaná hladina Z-spirála)
 $Fz = 0,05$ mm; $vc = 180$ m/min; $ap = 0,4$ mm

Pro dokončovací dráhy byla uzamknuta osa X a její pohyb byl nahrazen osou C. Tímto způsobem jsem byl schopen zvýšit přesnost obrobené rotační kontury polotovaru. Pokud by centrum disponovalo osou C, jež umožňuje soustružení, dosáhli bychom ještě lepšího výsledku. To by ovšem znamenalo, že osa C musí být schopna řádově stovek otáček za minutu. V našem případě jsme limitováni na 50 ot/min.



Obrázek 51: zobrazení drah přípravy polotovaru pro lopátkové strategie



Obrázek 52: zobrazení analýzy zbytkového materiálu
obrobeného polotovaru dle SW

Typ drah nástroje dle barvy – legenda

Aktivní dráhy nástroje dle typu mají následující barvy:

řezný pohyb - zelená

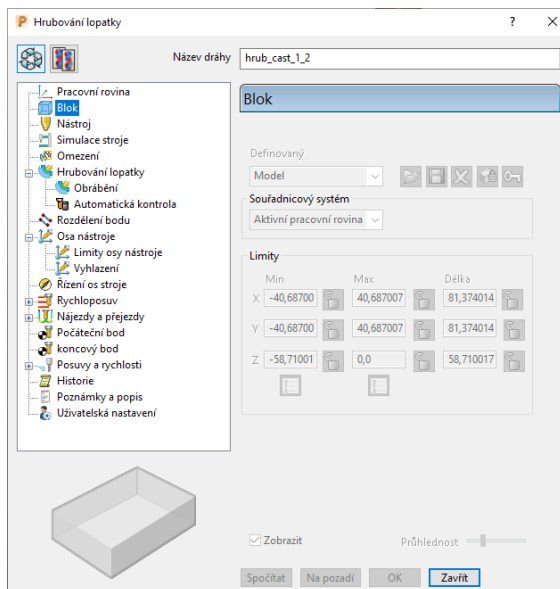
propojení drah - oranžová

odvrtání/ponoření - světle modrá

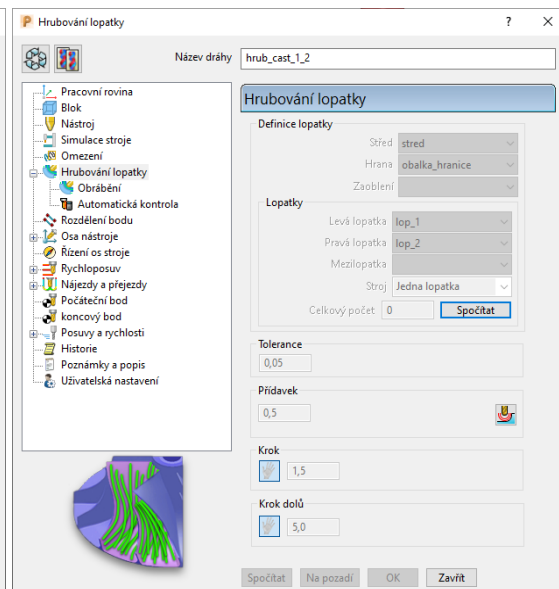
rychluposuv - fialová

Tvorba hrubovacích a dohrubovacích drah

Hrubovací dráhy jsou rozděleny na dvě části. Nejdříve se hrubují mezilopátkové prostory, které mají oporu z obou stran (viz obr. 56), a tak je možné zvolit agresivnější podmínky obrábění. Následně se tyto oblasti dohrubují a pokračuje se hrubováním oblastí zbylých mezer, kde jsou podmínky zmírněny.

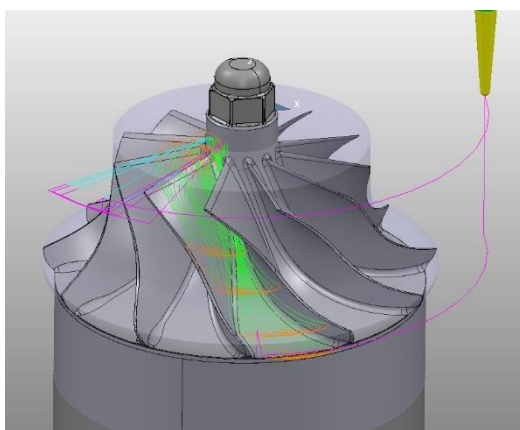


Obrázek 53: okno strategie hrubování lopatky 1

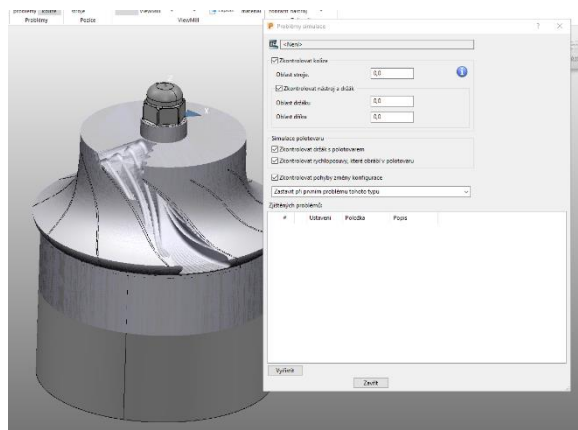


Obrázek 54: okno strategie hrubování lopatky 2

V programu bylo nutné vybrat polotovár (vytvořený model), nástroj, limity os (- 0° až 90°), bezpečnou oblast (zvolen válec), řízení osy nástroje, řezné podmínky, přídavek, definici lopatky a vhodné propojení drah. Polotovár, limity os a bezpečná oblast jsou pro všechny dráhy stejné, zbylé parametry byly zvoleny pro každou dráhu zvlášť. Po vygenerování drah proběhla simulace včetně polotovaru pro zjištění případných kolízí.

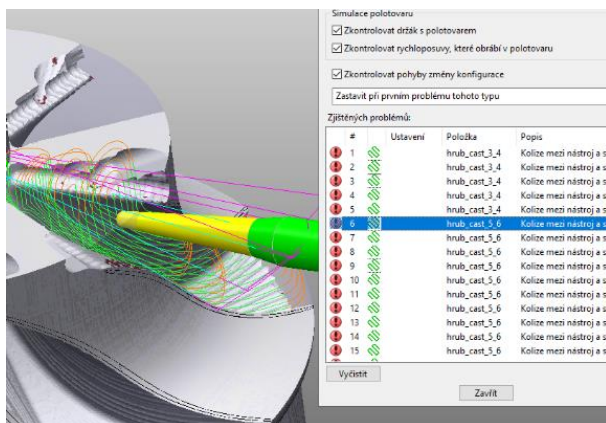


Obrázek 55: dráhy hrubování lopatkové kapsy 1_2

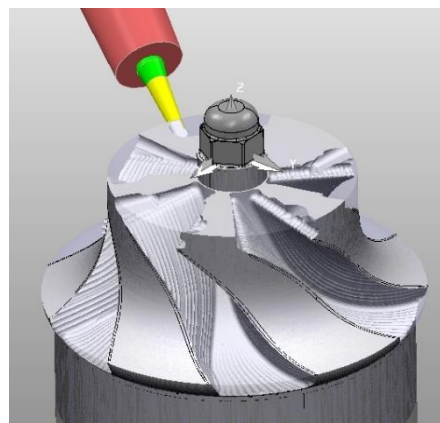


Obrázek 56: výsledek simulace hrubování lop. kapsy 1_2

Simulace proběhla v pořádku, a proto bylo stejné nastavení použito pro generování drah hrubování čtyř dalších lopatkových kapes a následně byla opět provedena simulace pro zjištění kolízí. Ačkoli byly dráhy generovány stejným způsobem, objevily se zde kolize mezi dřikem a polotovarem, které se zdály nelogické, neboť při grafickém znázornění se nejeví jako kolize (viz obr. 57).

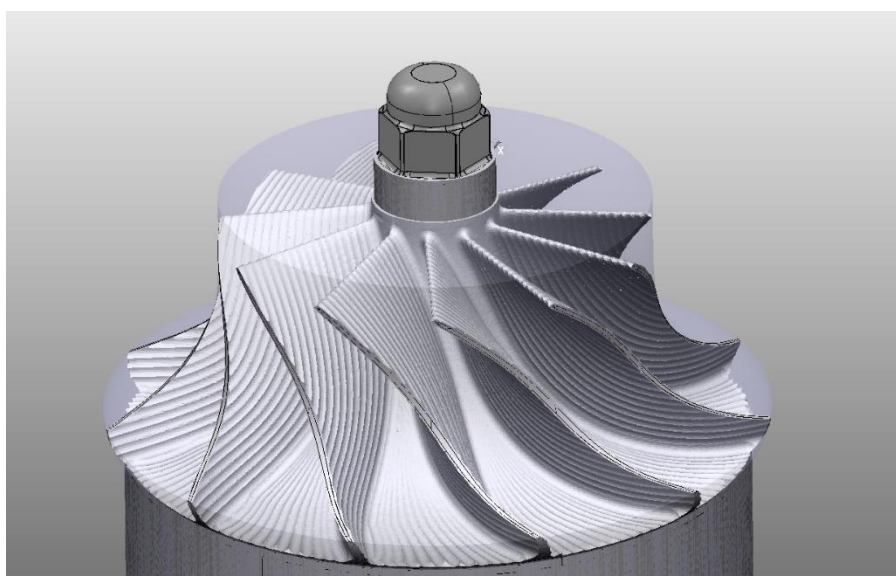


Obrázek 57: zobrazená kolize s polotovarem



Obrázek 58: výsledek simulace 1. části hrubování a dohrubování

Bylo podezření, že dané kolize jsou způsobeny chybnou geometrií modelu. Jelikož v kapse mezi lopatkou 1 a 2 nedocházelo ke kolizím, byla ponechána lopatka číslo 1, která byla následně rotačně zkopírována tak, abych dostal stejný model jako předtím. Na kolize tento postup bohužel neměl vliv. V 1. kapse ke kolizím nedochází a v následujících ano. Veškeré kolize jsem zkontroloval a prozatím určil jako špatně vyhodnocené. Dráhy jsem označil jako bezkolizní. V dalším bodě byly vygenerovány zbylé dráhy hrubování a dohrubování, kde nastaly stejné problémy. Dráhy byly opět zkontrolovány a vyhodnoceny jako prozatím bezkolizní (viz obr. 59).



Obrázek 59: zobrazení výsledku simulace – hrubovací a dokončovací operace

Zde jsou vypsané nastavené parametry pro hrubovací a dohrubovací operace v 1. i 2. části. (viz tab. 8, 9, 10).

Hrubování - část 1

Tabulka 8: nastavené parametry hrubování část 1

Nastavené parametry:	Offset: nahoru
Tolerance výpočtu: 0,05	Otáčky vřetene: 14 000 ot/min
Přídavek: 0,3 mm	Posuv na zub: 0,035 mm/z
Krok: 1,5 mm	Sjezdový posuv: 0,5*fz
Krok dolů: 5 mm	Osa nástroje: normála středu

Dohrubování - část 1 (stejné parametry pro část 2)

Tabulka 9: nastavené parametry dohrubování

Nastavené parametry:	Offset: nahoru
Tolerance výpočtu: 0,01	Otáčky vřetene: 14 000 ot/min
Přídavek: 0,2 mm	Posuv na zub: 0,035 mm/z
Krok: - mm	Sjezdový posuv: 0,5*fz
Krok dolů: 1 mm	Osa nástroje: normála středu

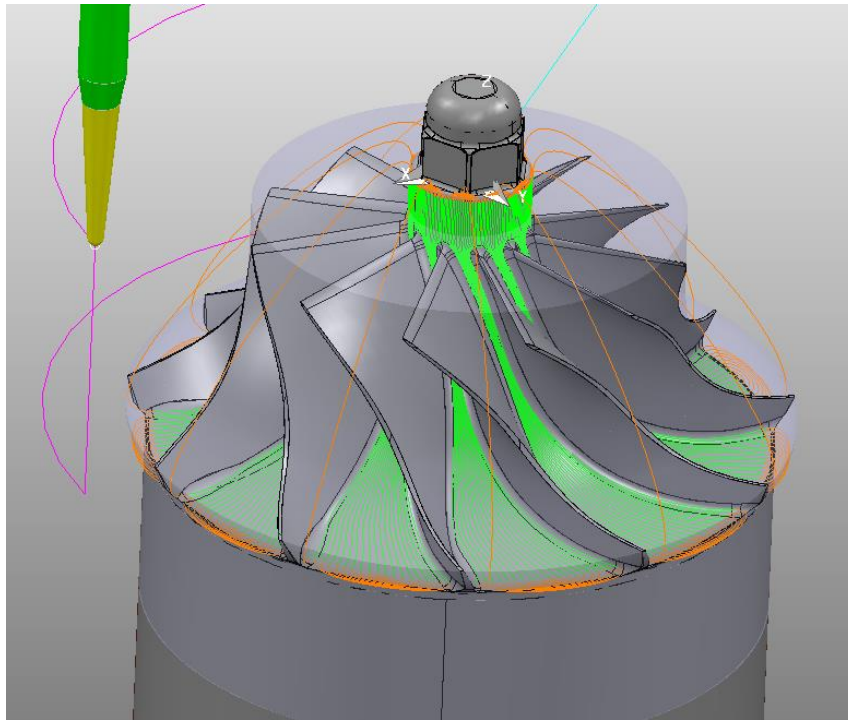
Hrubování - část 2

Tabulka 10: nastavené parametry hrubování část 2

Nastavené parametry:	Offset: nahoru
Tolerance výpočtu: 0,03	Otáčky vřetene: 14 000 ot/min
Přídavek: 0,3 mm	Posuv na zub: 0,035 mm/z
Krok: 1,5 mm	Sjezdový posuv: 0,5*fz
Krok dolů: 2 mm	Osa nástroje: normála středu

Tvorba dráh dokončení náboje

Dráhy byly vygenerovány pro kapsu mezi lopatkami 1 a 2, následně proběhla simulace, která potvrdila správně vygenerované dráhy. Dráha byla dále přepočítána tak, aby obrobila všechny kapsy (viz obr. 60). Dráhy byly opět simulovány a nejevily kolize.



Obrázek 60: dráhy dokončení náboje

SW pro dokončení náboje používá technologii proudnicového obrábění, kde zadaný krok do strany se určuje dle spodní části lopatkového kola (nejširší). Nástroj v oblasti, která je velmi úzká, projede mnohokrát zbytečně. Čas obrábění náboje by se dal ušetřit rozdělením na více částí (limity Z), kde by byl zadán vhodný krok do strany. Ačkoliv kvalita povrchu by teoreticky zůstala stejná, vizuálně by náboj vypadal hůř a komerčně by tato varianta nejspíše nebyla vhodná.

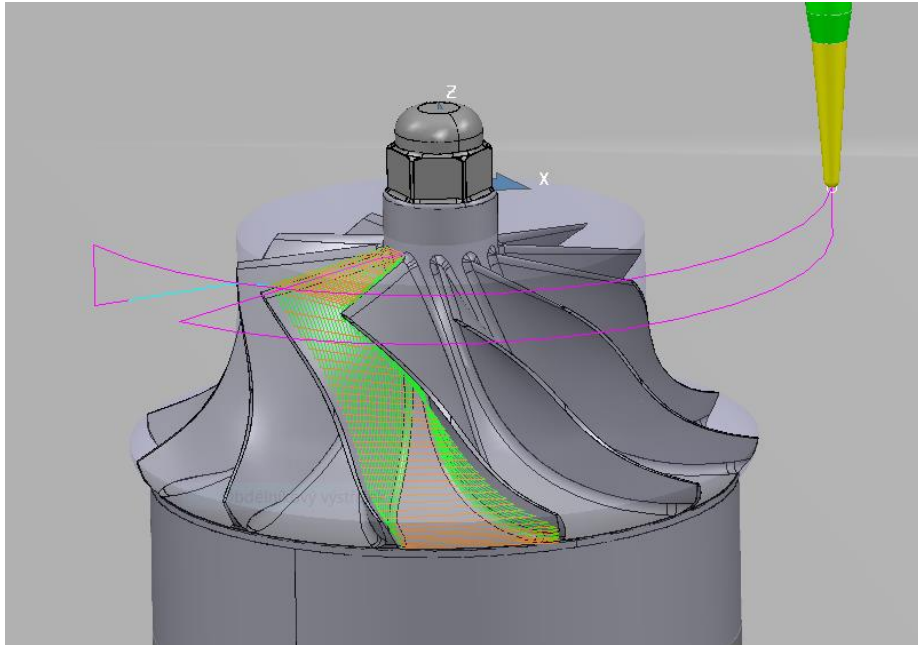
Dokončení náboje

Tabulka 11: nastavené parametry dokončení náboje

Nastavené parametry:	Offset: nahoru
Tolerance výpočtu: 0,03	Otáčky vřetene: 14 000 ot/min
Přídavek: 0 mm	Posuv na zub: 0,012 mm/z
Krok: 1 mm	Sjezdový posuv: 0,5*fz
Krok dolů: - mm	Osa nástroje: radiální 10°

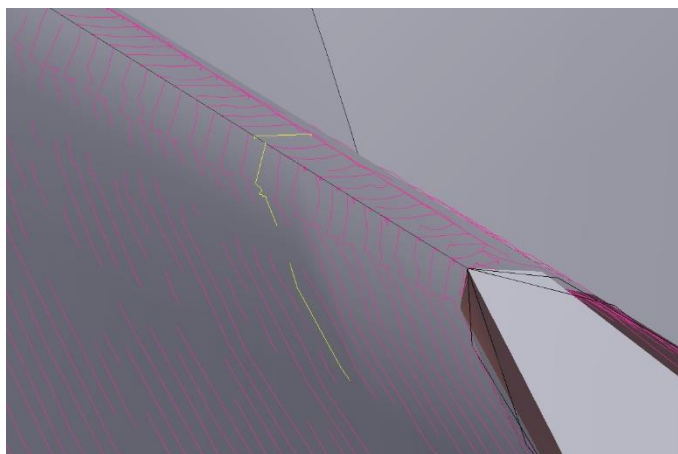
Tvorba drah dokončení lopatek

Dráhy dokončování lopatek (viz obr. 61) jsou pro všechny lopatky stejné, avšak mění se u nich řezné podmínky, kde se mění parametr posuvu na zub. Ten předběžně nabývá 100, 120, 140 a 160 % hodnoty uvedené výrobcem. Krok dolů byl určen požadavkem na největší velikost nerovnosti 0,03 mm. Ten splňuje hodnota 0,4 mm, kde je výška nerovnosti 0,02 mm.



Obrázek 61: dráhy dokončení lopatkové kapsy 1_2

Vygenerované dráhy byly zkontrolovány a nebyly zjištěny žádné kolize. Dráhy však v oblasti zaoblení horní části lopatky nejsou hladké (viz obr. 62) a při reálném obrábění bude kvalita povrchu nejspíše nedostačující. Pro vyhlazení drah bylo vyzkoušeno zvýšení i snížení tolerance výpočtu, na hladkost drah však neměla vliv. Dále byl model převeden z plošného modelu na solid, bohužel také bez výsledku. Lokální špatnou hladkost drah způsobuje dle mého odhadu samotná geometrie kola a pro jejich zlepšení by bylo třeba kolo přemodelovat. V mém případě jsem zvolil zachování modelu kola, avšak změnil jsem strategii z obrábění lopatky na obrábění lopatkové kapsy (viz obr. 61), kde sice dráhy nebudou stále hladké, ale nebude docházet k velkým úhlovým změnám při natočení nástroje.



Obrázek 62: zobrazení kontaktní stopy nástroje v horní části lopatky

Lopatkové kapsy 1 až 9

Tabulka 12: nastavené parametry pro lopatkové kapsy 1 až 9

Nastavené parametry:	Offset: nahoru
Tolerance výpočtu: 0,01	Otáčky vřetene: 14 000 ot/min
Přídavek: 0 mm	Posuv na zub (100 %): 0,012 mm/z
Krok: 0,4 mm	Sjezdový posuv: 0,5*fz
Krok dolů: - mm	Osa nástroje: normála středu

Lopatkové kapsy 9 až 11

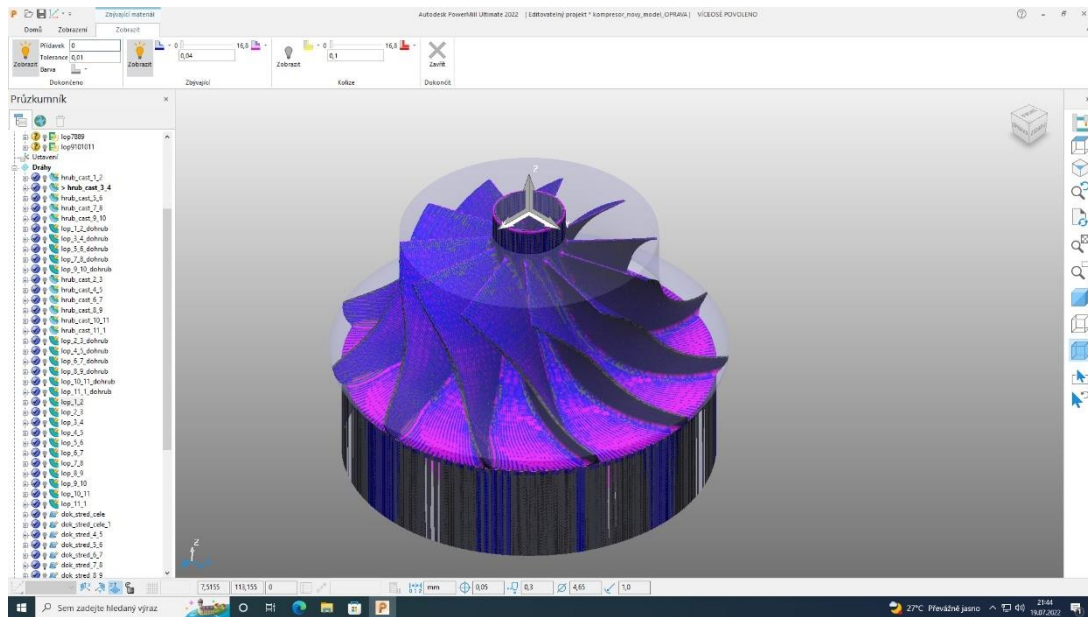
Tabulka 13: nastavené parametry pro lopatkové kapsy 9 až 11

Nastavené parametry:	Offset: nahoru
Tolerance výpočtu: 0,01	Otáčky vřetene: 14 000 ot/min
Přídavek: 0 mm	Posuv na zub (140 %): 0,0168 mm/z
Krok (75 %): 0,3 mm	Sjezdový posuv: 0,5*fz
Krok dolů: - mm	Osa nástroje: normála středu

Analýza zbytkového materiálu dle SW

SW nabízí funkci zbytkového materiálu, pomocí které můžeme předpokládat výsledek obrábění. Proběhla analýza zbytkového materiálu (viz obr. 63), kde byla zadána tolerance výpočtu 0,01mm a zbytkový materiál 0,04 mm. Zbytkový materiál, který se nachází v dané toleranci, je vybarven modře a materiál, jenž tuto hodnotu převyšuje, je fialový. Na ploše náboje již najdeme větší oblast fialové barvy, která je dána velkým krokem do strany nástroje.

Stopy po nástroji však mohou být na lopatkovém kole žádoucí z důvodu usměrnění proudění tekutiny. Nastavení parametrů pro obrábění náboje bylo zachováno.

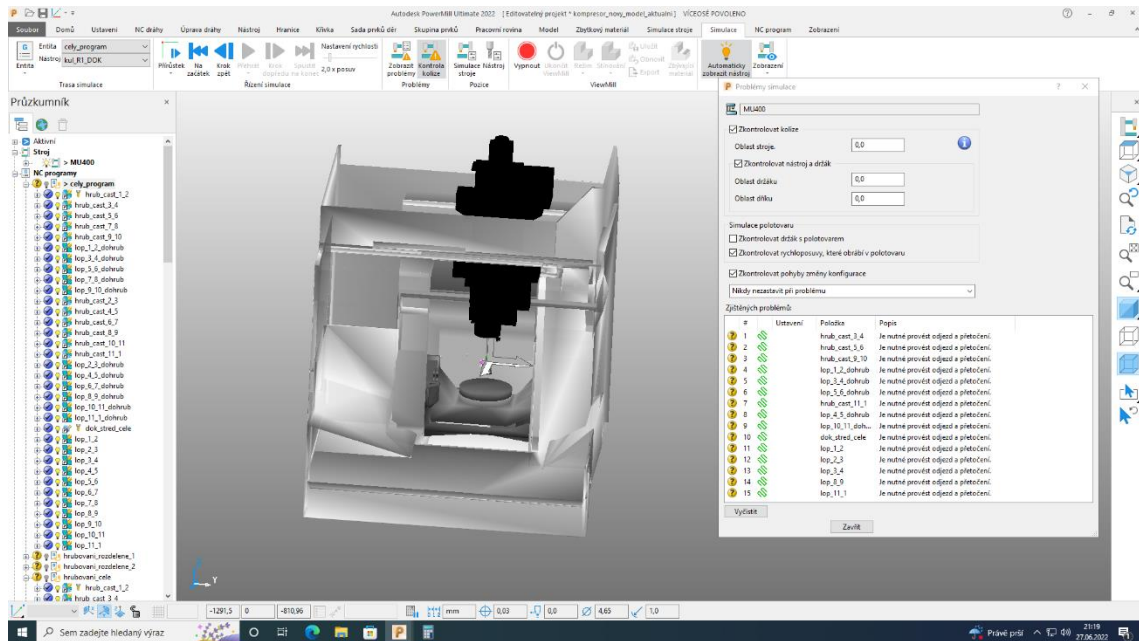


Obrázek 63: zobrazení analýzy zbytkového materiálu

Simulace s modelem stroje

Byla provedena simulace celého programu s modelem stroje. Ta nám umožnila napodobit reálné chování stroje, kde jsem zjistil, zda dochází k překročení limitu osy, přetočení a k případným kolizím. Ačkoliv se zdá, že již vidíme reálný obráběcí proces je třeba mít na paměti, že simulujeme CL data, a ne NC kód.

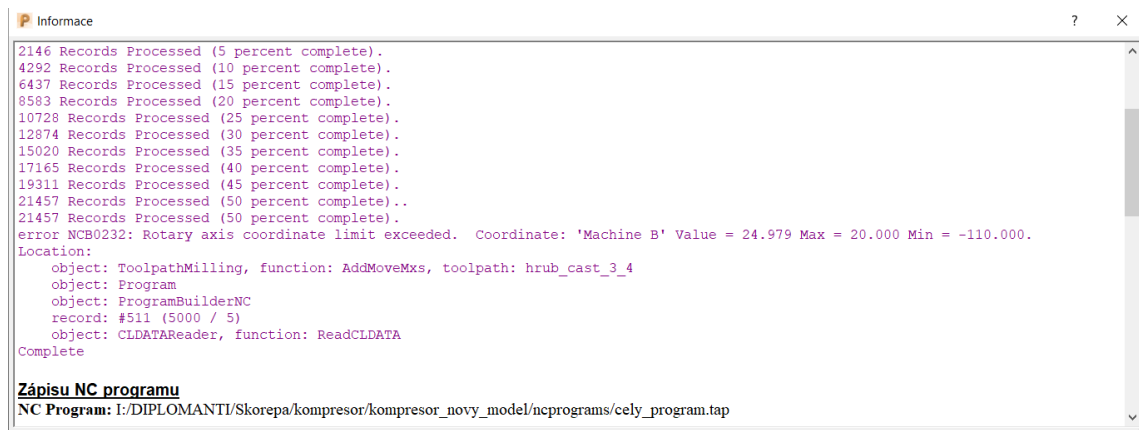
Ze začátku simulace se strojem vykazovala nespočet kolizí. Při bližším prozkoumání však bylo zjištěno, že většina kolizí je způsobena špatným pochopením limitu osy C, kde rozsah 0° až 360° nevnímá jako neomezenou rotační osu. Limity osy stroje proto byly přepsány jako -360° až 360° . Po této akci simulace vykazovala již jenom jednotky přetočení, které jsou tolerovatelné (viz obr. 64). Při simulaci byla horní část obrobku vzdálena od upínacího stolu 200 mm a zároveň byl obrobek na stole vystředěn. Při výrobě byla snaha tuto vzdálenost a pozici dodržet.



Obrázek 64: výsledek simulace s modelem stroje

Postprocessing

V tomto bodě mám ověřené dráhy nástroje a převádím je z CL dat na NC programy pro konkrétní stroj. Byl proveden postprocessing, kdy při prvním pokusu nešlo vygenerovat NC program z důvodu překročení limitů os (viz obr. 65). Všechny strategie obrábění mají nastavené limity os, a tudíž řezné dráhy tyto limity nepřekročily (zelené dráhy). K překročení limitů os došlo při neřezných pohybech.



Obrázek 65: výčet chyb vzniklých při zápisu programu

U každé dráhy byl změněn počáteční a koncový bod, který byl původně určen jako bezpečný střed polotovaru. Pro každou dráhu byly tyto body zvoleny jako absolutní a jejich souřadnice byly ručně zapsány a zvoleny v blízkosti dané dráhy 30 mm nad modelem. Osa nástroje byla určena automaticky. Opět byla provedena simulace potvrzující bezkolizní dráhy. Po této změně již bylo možné vygenerovat celý program, a tudíž i jeho části.

Celkové obrábění kola bylo rozděleno na:

- Hrubování a dohrubování - část 1
- Hrubování a dohrubování - část 2
- Dokončení náboje
- Lopatková kapsa 1_2, 2_3
- Lopatková kapsa 3_4, 4_5
- Lopatková kapsa 5_6, 6_7
- Lopatková kapsa 7_8, 8_9
- Lopatková kapsa 9_10, 10_10

8.6 Výroba polotovaru

Jako počáteční polotovar byl vybrán válec o průměru $D = 100$ mm a délce $L = 123$ mm. Výsledná výška polotovaru (pro lopátkové strategie) se započítáním výšky svěráku čítá 183 mm. Pro tuto hodnotu byla provedena opět simulace celého programu s modelem stroje. Simulace byla bezkolizní.



Obrázek 67: zobrazení upnutí prvotního polotovaru pro výrobu osazení



Obrázek 66: vyrobené osazení o hloubce 3,5 mm a šířce 65 mm

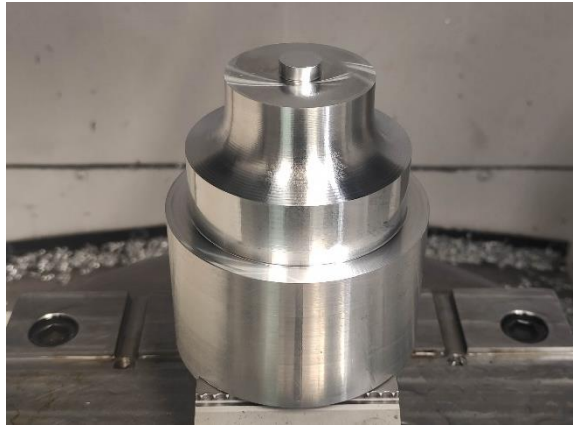
Na polotovaru bylo třeba ve spodní části vyfrézovat osazení pro upnutí do svěráku, ve kterém bude polotovar upnut při následující výrobě. Výroba osazení proběhla na stroji MAS VMC 500 nástrojem válcová hlava $D = 100$ mm (viz obr. 67). Osazení bylo vyrobeno do hloubky 3,5 mm a je široké 65 mm (viz obr. 66).

Polotovar byl následně vložen do svěráku a pomocí úchylkoměru vystředěn. V mém případě byl vystředěn s přesností 0,3 mm, což je pro polotovar s přídávky až 10 mm na průměru dostačující (viz obr. 68).



Obrázek 68: středění polotovaru na stroji Okuma MU 400V II

Pro upnutí polotovaru byl využit momentový klíč nastavený na hodnotu 120 N.m, následovalo vložení válcové a kulové frézy do zásobníku, jejich korekce a odměření nulového bodu polotovaru. Ten byl zvolen jako střed vršku modelu. Po odměření nulového bodu polotovaru byla provedena korekce, kdy byl nulový bod posunut směrem dolů o 2 mm. Následně byl proveden zahřívací cyklus vřetene a spuštěn program. Polotovar pro lopatkové strategie byl úspěšně vyroben (viz obr. 69).



Obrázek 69: vyrobený polotovar určený pro lopatkové strategie

8.7 Výroba lopatkového kola

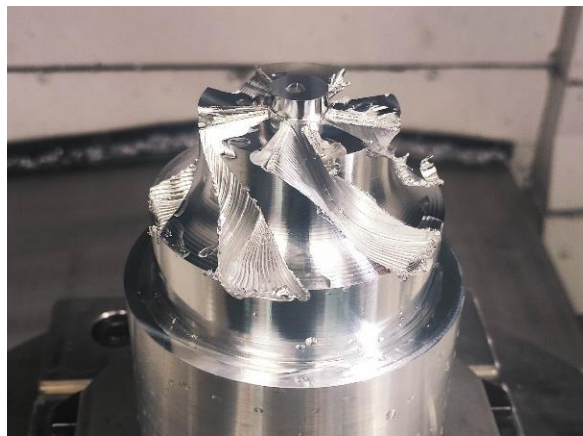
Jako další krok byly připraveny nástroje pro lopatkové strategie. Ty byly vloženy do tepelných upínačů, které byly zahřáty pomocí indukčního ohříváče. Po vychladnutí upínače bylo změřeno reálné vyložení nástrojů. V obou případech byla přibližná hodnota vyložení 31 mm, což je vyhovující, když v simulaci bylo počítáno s vyložení 30 mm. Nástroje byly vloženy do zásobníku stroje a byly určeny jejich korekce.



Obrázek 70: vložení nástroje určeného pro lopatkové strategie do tepelného upínače

Následně byl nahrán program první části hrubování a byla provedena simulace na stroji. Ta nezobrazila žádné problémy, a tudíž byl program spuštěn. Z důvodu bezpečnosti na začátku programu byl posuv a rychloposuv nastaven na 0 % a postupně zvyšován na pracovní hodnotu. Tento přístup byl zvolen u všech ostatních drah.

Ačkoliv řezné podmínky dané výrobcem nástroje byly dodrženy, dle hluku při řezném posuvu byly zaznamenány vibrace nástroje, a to zejména při prvním řezu v dané hladině, kdy je nástroj nejvíce zatížen. To může být způsobeno velkou hodnotou vyložení nástroje, což má za následek snížení jeho tuhosti a vznik vibrací. Z tohoto důvodu byl posuv snížen na 50 %. První část hrubování proběhla úspěšně (viz obr. 71).



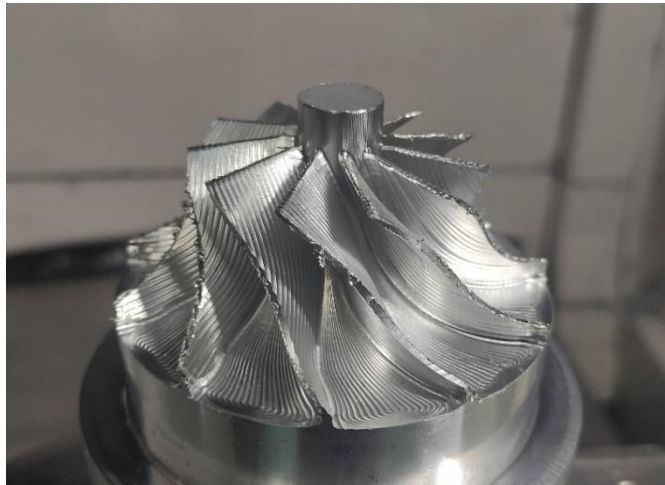
Obrázek 71: stav lopatkového kola po 1. části hrubování a dohrubování

Dále byl nahrán program hrubování druhé části, spuštěna simulace a následně i program. Při obrábění nebyly indikovány vibrace, a tak celý program proběhl s hodnotou posuvu 100 %. Vibrace v tomto programu nevznikly, neboť oproti hrubování první části je zde přibližně poloviční hodnota hloubky řezu. Druhá část hrubování proběhla úspěšně (viz obr. 72).



Obrázek 72: stav lopatkového kola po 2. části hrubování a dohrubování

Následně byl nahrán program obrábění náboje, který také proběhl úspěšně (viz obr.73).



Obrázek 73: stav lopatkového kola po dokončení náboje

Jako poslední byly dokončeny lopatky. Vždy byl nahrán program pro obrábění lopatkových kapes se stejnými řeznými podmínkami. Po skončení programu proběhlo vizuální zhodnocení lopatkové plochy a následně byl nahrán další program s jinými řeznými podmínkami. Tímto způsobem bylo obrobena 10 lopatkových kapes. 11. lopatková kapsa byla pouze dohrubována pro názornost přídavek před dokončovacími operacemi (viz obr 74).



Obrázek 74: obrobené lopatkové kolo

Obrobení lopatkového kola proběhlo v pořádku, zde uvádím tabulku č. 14 předpokládaných a skutečných výrobních časů. Skutečný čas obrábění je delší, neboť SW nepočítá s dynamikou stroje a předpokládá, že nástroj se bude pohybovat předepsanou rychlostí po celou dobu. Dále čas hrubování 1 byl významně ovlivněn tím, že celý program byl vykonán s polovičním posuvem.

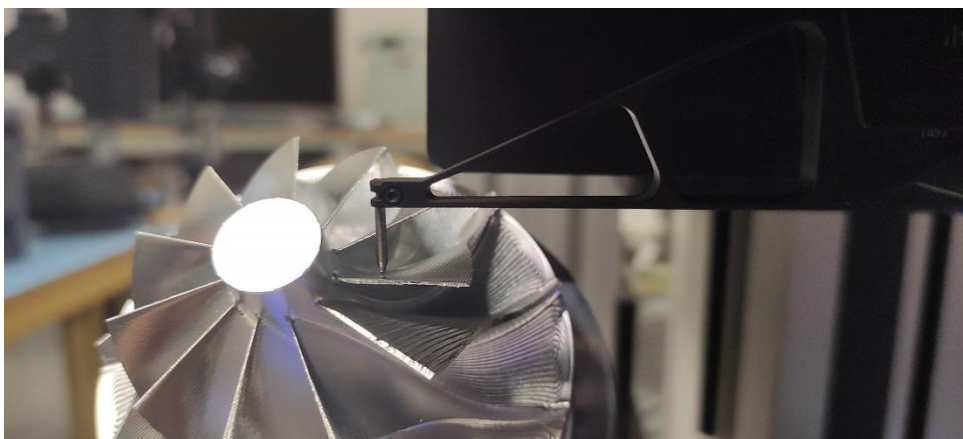
Významným faktorem je také fakt, že stroj z důvodu bezpečnosti měl při obrábění snížený rychloposuv na 0 % a případně byl manuálně navýšen na 10 až 30 %. Významný vliv tohoto faktoru můžeme pozorovat u hrubování části 2. Celková výroba lopatkového kola včetně přípravy polotovaru proběhla v jeden den od 9.00 do 21.19. V následující tabulce jsou uvedeny časy obrábění lopatkových strategií. Do celkového času jsou započítány pouze lopatkové strategie.

Tabulka 14: porovnání předpokládaných a reálných časů obrábění

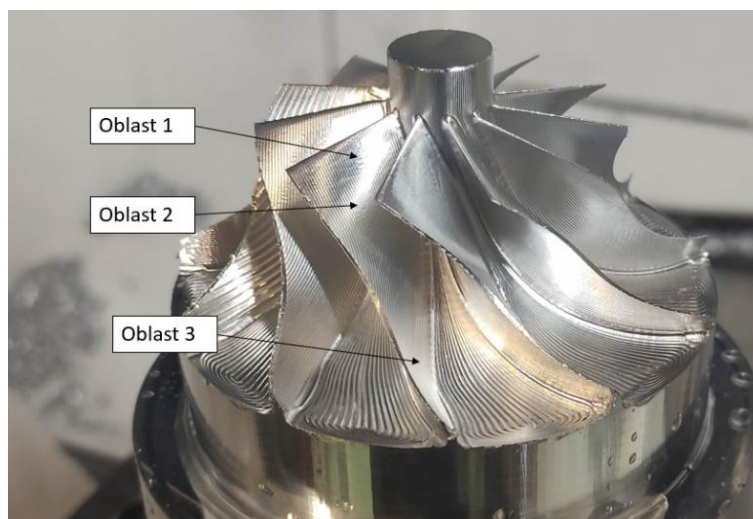
	Čas obrábění dle SW	Skutečný čas obrábění
hrubování - část 1	19 min 56 s	39 min 20 s
hrubování - část 2	42 min 56 s	1 h 4 min 32 s
dokončení náboje	25 min 14 s	27 min 20 s
lop. kapsa 1_2;2_3	15 min 51 s	18 min 55 s
lop. kapsa 3_4;4_5	13 min 38 s	16 min 32 s
lop. Kapsa 5_6;6_7	11 min 41 s	15 min 0 s
lop. Kapsa 7_8;8_9	10 min 9 s	13 min 36 s
lop. Kapsa 9_10;10_11	15 min 30 s	19 min 46 s
celkový čas obrábění	2 h 34 min 55 s	3 h 35 min 1 s

8.8 Analýza

Na lopatkovém kole byla změřena drsnost povrchu lopatek a náboje ve směru kolmém na řezné dráhy. Pro měření byl použit konturoměr Mahr MarSurf LD 120. Jde o přístroj, který kromě drsnosti dokáže měřit i tvary, profil a vzdálenosti na povrchu. Pro porovnání drsnosti lopatek obráběných za různých podmínek byla vyhodnocena horní část lopatky (viz obr. 75).



Obrázek 75: měření drsnosti lopatky

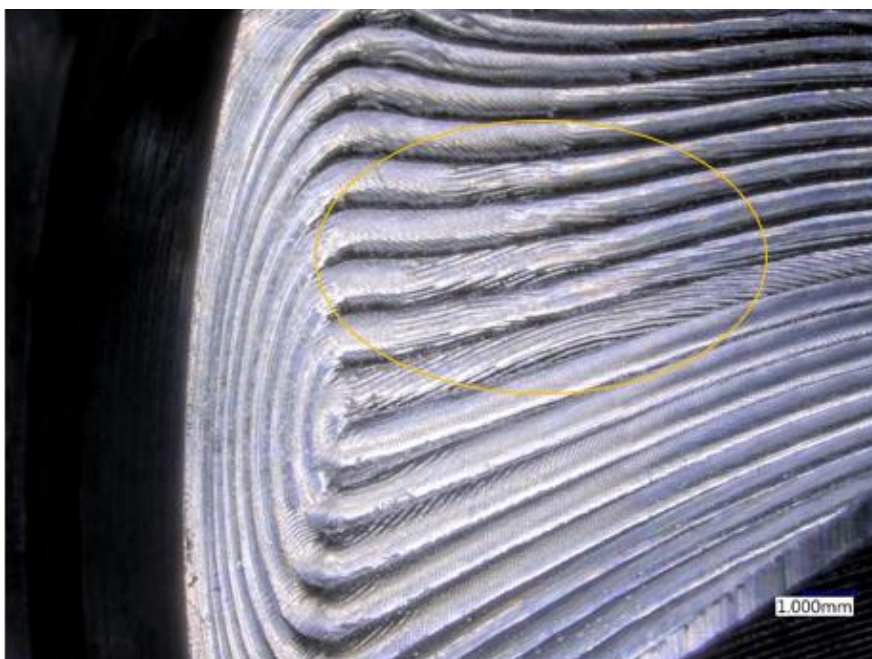


Obrázek 76: popis měřených oblastí na lopatce č. 1

Dále byla proměřena drsnost lopatky číslo 1 ve třech oblastech (viz obr. 76). V těchto oblastech byla zjištěna rozdílná drsnost povrchu, která je způsobena proměnlivou tuhostí lopatky. Nejnížší drsnosti nabývá ve spodní části a největší na okraji lopatky, kde je nejnížší tuhost (viz tab. 15). Následně proběhla vizuální analýza na optickém mikroskopu KEYENCE VHX 6000.

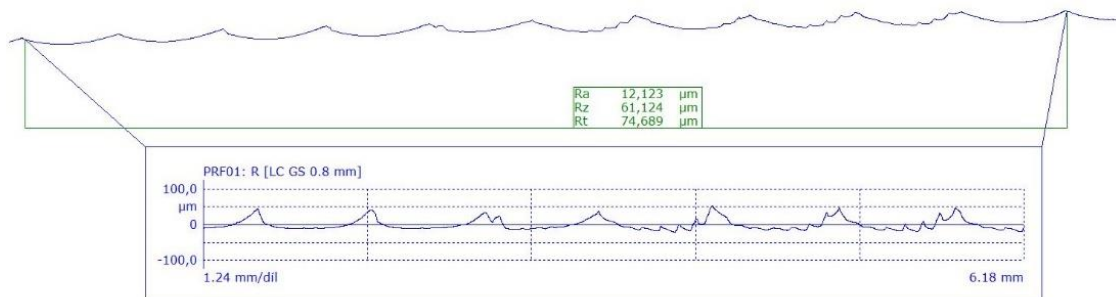
Tabulka 15: naměřené drsnosti lopatek

	Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]
lopatka 1	3,3	13,7	14,5
lopatka 1 (oblast 2)	4,7	18,3	19,6
lopatka 1 (oblast 3)	1,3	7,7	8
lopatka 2	2,7	12,1	13,3
lopatka 3	3	12,9	16
lopatka 4	2,6	11,9	12,9
lopatka 5	3,1	12,8	15,2
lopatka 6	3,1	12,7	14,7
lopatka 7	3,6	14,6	15,3
lopatka 8	3	13,1	14
lopatka 9	2,1	9,6	11,3
lopatka 10	1,7	8,5	10,5
náboj	12,1	61,1	74,7



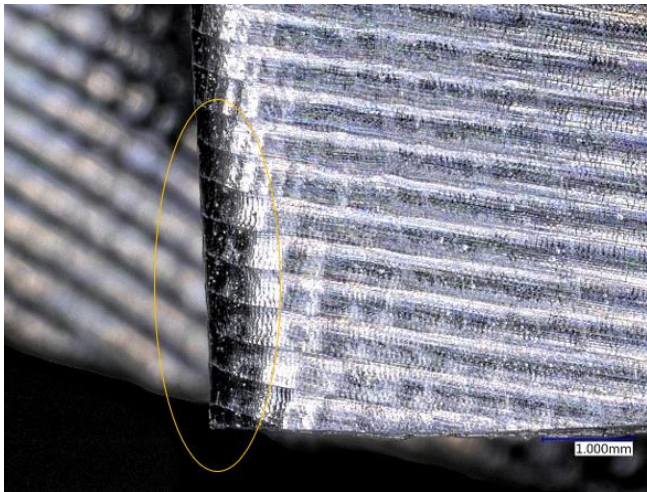
Obrázek 77: detailní záběr spodní část náboje

Při optické analýze náboje je patrná zhoršená kvalita povrchu v jedné polovině náboje (viz obr. 77). Horší povrch v této oblasti je důsledkem volby natočení nástroje, který je v této oblasti tlačěn. Tento jev byl zaznamenán také pomocí konturoměru (viz obr. 78).

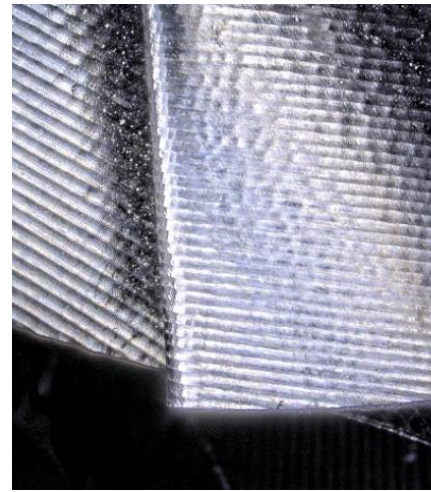


Obrázek 78: vyhodnocení drsnosti náboje ve spodní oblasti

Na následujícím obr. 79 je zobrazen detail horní části lopatky 7, na kterém můžeme vidět, že kvalita horní části zaoblení (náběžná hrana) je dostačující, ačkoliv při generování dráha nástroje nebyla hladká. Dále také můžeme pozorovat jemné rýhy způsobené zvýšením posuvu na zub.

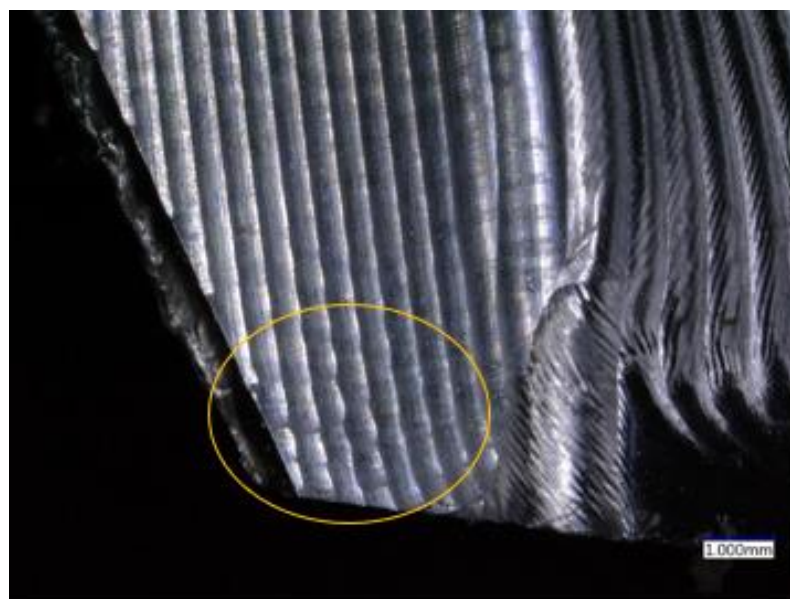


Obrázek 79: detailní záběr na lopatku č. 7



Obrázek 80: záběr na lopatku č. 9

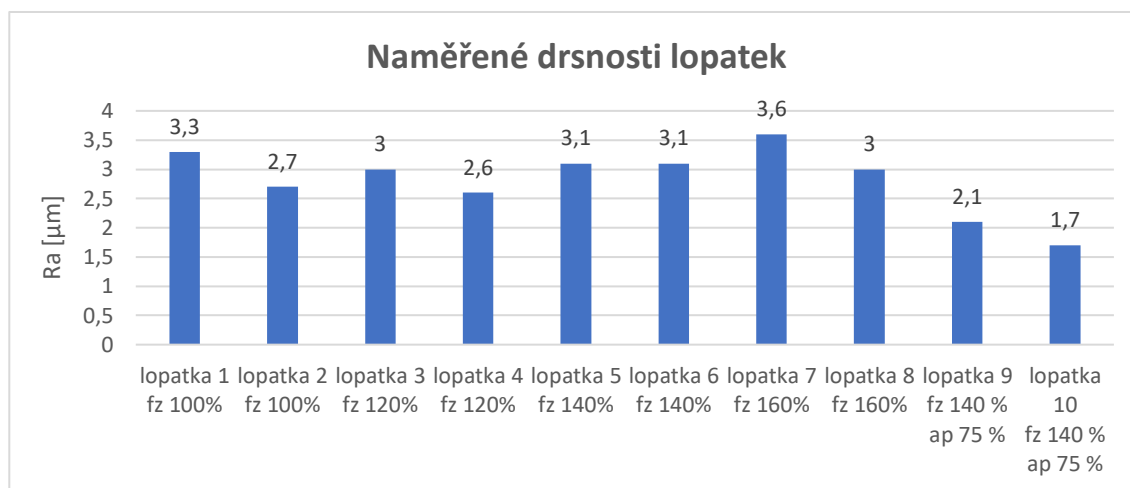
Ve spodní části oblasti lopatky (viz obr. 81) můžeme pozorovat zhoršení kvality povrchu. To je s největší pravděpodobností způsobeno měnícím se natočením nástroje před započítím propojení drah. Tento jev je možné eliminovat prodloužením rezných drah.



Obrázek 81: detailní záběr na spodní okraj lopatky

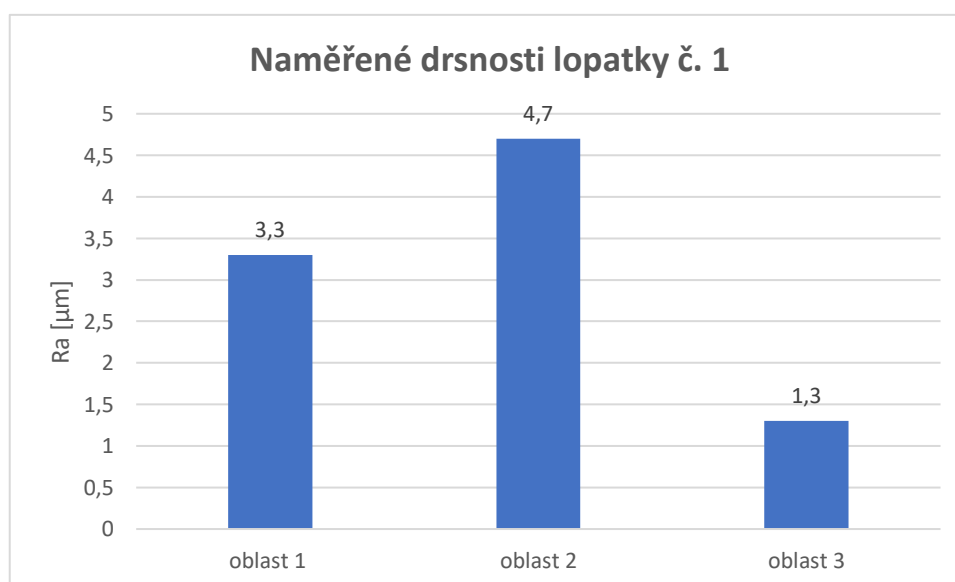
8.9 Vyhodnocení

Po provedené analýze byly následně vyhodnoceny výsledky drsnosti jednotlivých lopatek. Bylo zjištěno, že zvýšení posuvu na zub při dokončovacích operacích lopatek až o 60 % zhorší hodnotu drsnosti jenom o 10 %. Průměrná naměřená hodnota drsnosti Ra se pohybuje okolo 3 μm .



graf 1: naměřené drsnosti lopatek v horní oblasti

Dále bylo zjištěno, že zvýšením posuvu o 40 % a snížením kroku dolů o 25 % oproti nastavené hodnotě pro lopatkovou kapsu 1_2 a 2_3 jsem byl schopen docílit kvalitnějšího povrchu za stejný čas. Lopatky 1 a 2 mají drsnost Ra 3,3 a Ra 2,7. Lopatky 9 a 10 mají drsnost Ra 2,1 a 1,7. Došlo ke snížení hodnoty drsnosti o 37 %. Následně byla zjištěna rozdílná drsnost lopatky č. 1, jež je způsobena rozdílnou tuhostí v daných oblastech.



graf 2: naměřené drsnosti lopatky 1

8.10 Návrh optimalizace NC programu

Hrubování

Při opětovné tvorbě NC programu bych zavedl při hrubování otevírací řez, který by byl vytvořen totožným nástrojem se sníženým posuvem, či jiným nástrojem. To by umožnilo hrubování předepsaným posuvem a výrazně by snížilo strojní čas. Strategie hrubování lopatky tento řez neumožňuje, musel by být vytvořen pomocí jiné strategie kterou PowerMill nabízí, například pomocí křivky.

Dokončení náboje

Při obrábění náboje bych změnil volbu natočení osy nástroje z radiální na normálu středu. Tímto způsobem odstraním z dráhy tlačení posuv nástroje a zlepším kvalitu povrchu. Dále by bylo vhodné prodloužení řezných drah (zelené). V SW PowerMill lze pouze prodloužit nájezd či propojení, které nejsou vždy vygenerovány vhodně. Pro prodloužení řezných drah by bylo nutné geometrii náboje nahradit novou, zvětšenou o oblast prodloužení drah.

Dokončení lopatek

Pro zvýšení produktivity obrábění lopatek je vhodné použít soudečkovou frézu, která obrábí bokem nástroje, jenž má větší poloměr než poloměr špičky. Tímto nástrojem tedy lze zvětšit krok dolů při zachování stejné kvality povrchu. Také by bylo vhodné předělat geometrii lopatkového kola z důvodu hladkosti drah v horní části lopatky.

Ostatní

NC programy vkládané do stroje byly bezkolizní, to však platilo pro případ, kdy na sebe NC programy navazovaly a obsluha nezměnila pozici stolu. Při aktuálním obrábění hrozila kolize v případě, kdy program skončil s pozicí stolu „vzadu“ a byl přiblížen pro fotodokumentaci. Když byl následně spuštěn z této pozice další program, stroj vykonal rychloposuvem pohyb do počátečního bodu daného programu. Při tomto pohybu mohla nastat kolize. V programech tudíž byla snaha vracet stroj do koncového bodu předchozí dráhy. Je vhodné do každého programu na začátek vložit domovskou pozici stroje, ze které se teprve bude najíždět do počátečního bodu. Přídavky na obrábění lopatek byly optimální (0,2 mm).

9 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo využití nabízených lopatkových strategií v SW PowerMill pro tvorbu bezkolizního NC programu a úspěšné obrobení lopatkového kola na obráběcím centru Okuma MU 400V II. Dalším bodem bylo zjistit vliv řezných podmínek na výslednou kvalitu povrchu.

V teoretické části jsem popsal typy lopatkových kol a přiblížil problematiku víceosého obrábění. Dále je zmíněn postup obrábění lopatkových kol a perspektivní nástroje pro víceosé obrábění.

V praktické části jsem vytvořil NC program pro výrobu lopatkového kola v SW PowerMill. Lopatkové kolo bylo následně úspěšně vyrobeno. Jednotlivé lopatky byly obrobena různým posuvem na zub s cílem snížení výrobního času při zachování drsnosti povrchu. Posuv byl zvolen v rozsahu 100-160 % hodnoty doporučené výrobcem.

Následně byla provedena analýza a vyhodnocení drsnosti. Bylo zjištěno, že zvýšený posuv při dokončovací operaci bodového frézování s malým krokem dolů - 0,4 mm a dodrženým přídávkem na obrábění - 0,2 mm nemá významný negativní vliv na drsnost povrchu, neboť hodnoty drsností všech lopatek se pohybovaly okolo $Ra\ 3\ \mu m$. Lopatky, jež byly obrobena 75 % krokem dolů a 140 % posuvem na zub původní hodnoty, byly obrobena za stejný čas, avšak vykazovaly lepší povrch, který nabýval hodnoty $Ra\ 2\ \mu m$. Lopatka č. 1 byla proměřena ve třech oblastech, ve kterých byla zjištěna rozdílná drsnost povrchu z důvodu proměnlivé tuhosti v daných oblastech.

Vytyčené cíle diplomové práce byly naplněny. Dle dosažených výsledků, poznatků získaných při tvorbě programu a obrábění doporučuji při hrubování lopatkového kola zavést otevírací řez, který eliminuje vysoké zatížení nástroje při první dráze v dané hloubce řezu a usnadní odvod třísek. Dále doporučuji zavést moderní soudečkové nástroje pro dokončení lopatek pro snížení výrobního času. Na závěr doporučuji na začátek NC programu zavést domovskou pozici stroje. NC programy byly bezkolizní, hrozila však kolize při zásahu obsluhy, neboť stroj při spuštění programu vykonal rychloposuvem pohyb do počátečního bodu dané dráhy z jeho aktuální pozice.

Seznam použitých zdrojů:

[1] ŠKORPÍK, Jiří. Lopatkový stroj. *Transformační technologie* [online]. BRNO: Jiří Škorpík, 2009 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/11.html>

[2] Pump Impellers – The Types & Their Impact. *Castle Pumps - Your Process Delivered* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.castlepumps.com/info-hub/pump-impellers-the-types-their-impact>

[3] Slitiny hliníku. In: *Hliníkové profily, hliníkové plechy e-shop* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/prilohy/zakladni-technicke-informace.pdf>

[4] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01507-6.

[5] KŘÍŽ, Petr. *KOROZIVZDORNÉ A ŽÁRUVZDORNÉ OCELI*. BRNO, 2017. Bakalářská práce. VUT, Fakulta strojní. Vedoucí práce Eva Molliková.

[6] SKÝBA, Pavel. *Struktura žárupevných ocelí*. BRNO, 2008. Bakalářská práce. VUT, Fakulta strojní. Vedoucí práce VÍT JAN.

[7] High temperature Titanium alloys. *Advanced Materials Technology* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.amt-advanced-materials-technology.com/materials/titanium-high-temperature/>

[8] BLOCKLEY, Richard a Wei SHYY, ed. *Encyclopedia of Aerospace Engineering* [online]. Chichester, UK: John Wiley, 2010 [cit. 2022-07-03]. ISBN 9780470754405.

[9] Types of Nickel Alloys. *Thomasnet® - Product Sourcing and Supplier Discovery Platform* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z:

<https://www.thomasnet.com/articles/metals-metal-products/types-of-nickel-alloys/>

[10] Centrifugal Pump Impeller, For Industrial. In: *Indiamart* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z:

<https://www.indiamart.com/proddetail/centrifugal-pump-impeller-16361624512.html>

[11] Obecný úvod do problematiky CNC programování. *Sosbites* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: https://www.sosbites.cz/images/stories/Pro-studenty/studijni-materialy/VUKOV_TEXT_-_1.ST.pdf

[12] 3 Aspects Of 5-Axis CNC Machining. *Waykenrm* [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://waykenrm.com/blogs/5-axis-cnc-machining/>

[13] XIANG, Sitong, Jianguo YANG, Kaiguo FAN a Hongxing LU. Multi-machine tools volumetric error generalized modeling and Ethernet-based compensation technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. 2016, **230**(5), 870-882 [cit. 2022-07-03]. ISSN 0954-4054. Dostupné z: doi:10.1177/0954405414564407

[14] Frézování tvarových ploch. *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>

[15] DVOŘÁČEK, Jan. *ANALÝZA SILOVÉHO ZATÍŽENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE PŘI PĚTIOSÉM FRÉZOVÁNÍ*. BRNO, 2009. Diplomová práce. VUT, Fakulta strojní. Vedoucí práce ALEŠ POLZER.

- [16] SAI, Lotfi, Rami BELGUITH, Maher BAILI, Gilles DESSEIN a Wassila BOUZID. An approach to modeling the chip thickness and cutter workpiece engagement region in 3 and 5 axis ball end milling. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2018, **34**, 7-17 [cit. 2022-07-03]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2018.05.018
- [17] MAKRIS, Sotiris, Dimitris MOURTZIS a George CHRYSOLOURIS. Computer-Aided Manufacturing. LAPERRIÈRE, Luc a Gunther REINHART, ed. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, 2014-2-4, s. 254-266 [cit. 2022-03-10]. ISBN 978-3-642-20616-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-642-20617-7_6550
- [18] PETERKA, Jozef a Alexander JANÁČ. *CAD/CAM systémy*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2002. Edícia skrípt. ISBN 80-227-1685-5.
- [19] 5 Axis Machining – Blade/Impeller. *Camworks* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://camworks.com/blog/5-axis-machining-blade-impeller/>
- [20] Blisk definition. *Autodesk | 3D Design, Engineering & Construction Software* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://knowledge.autodesk.com/support/powermill/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/PWRM-ReferenceHelp/files/GUID-D51C9A33-2B01-4E00-AE25-5BA0B625CBA0-hm.html>
- [21] Program and Mill Impellers and Blisks Reliably and Effectively. *CAD CAM software | 2.5D 3D 5-axis milling | OPEN MIND* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.openmind-tech.com/en/cam/5-axis-milling/impeller-blisk.html>

- [22] NX Turbomachinery Milling. In: *CAMdivision - oprogramowanie NX* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: https://www.nxcad.pl/images/easyblog_images/551/nx-cam-pliki/NX-Turbomachinery-Milling.pdf
- [23] Blade Expert. *CAD/CAM Solutions for Manufacturing | Mastercam* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.mastercam.com/solutions/blade-expert/>
- [24] JOUSSELIN, Baptiste, Yann QUINSAT a Christophe TOURNIER. A 5-axis pocket roughing strategy reducing the remaining material volume. *Procedia CIRP* [online]. 2019, **82**, 368-373 [cit. 2022-03-10]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2019.04.146
- [25] Six Ways to Make 5-Axis Machining More Productive. *Mmsonline* [online]. 11/8/2019 [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/six-ways-to-make-5-axis-machining-more-productive>
- [26] WARFIELD, Bob. Button Cutter, Copy Mill, or Toroidal Cutter: Round Insert Milling Cutters. *Cnccookbook* [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.cnccookbook.com/button-cutter-copy-mill-or-toroidal-cutter-round-insert-milling-cutters/>
- [27] Toroidní frézy. *Nastroje.narep* [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://nastroje.nareps.cz/toroidni-frezy/>
- [28] Nový trend v 3D tvarovém frézování. *Techmagazin* [online]. TECH MEDIA PUBLISHING - TechMagazín, 22. 10. 2020 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/48209>

- [29] Application specific conical ball nose end mills. *American Machinist* [online]. 12 February 2009 [cit. 2022-07-24]. Dostupné z: <https://www.americanmachinist.com/cutting-tools/article/21895067/application-specific-conical-ball-nose-end-mills>
- [30] CHAVES-JACOB, Julien, Gérard POULACHON a Emmanuel DUC. Optimal strategy for finishing impeller blades using 5-axis machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2012, **58**(5-8), 573-583 [cit. 2022-07-03]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-011-3424-1
- [31] CHUANG, Li-Chang a Hong-Tsu YOUNG. Integrated rough machining methodology for centrifugal impeller manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2007, **34**(11-12), 1062-1071 [cit. 2022-04-11]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-006-0675-3
- [32] KLEIN, Peter. Flank Milling - How Hard Can It Be?. *Concepts NREC* [online]. 4.1.2019 [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.conceptsnrec.com/blog/flank-milling-how-hard-can-it-be>
- [33] CALLEJA, A., M.A. ALONSO, A. FERNÁNDEZ, I. TABERNERO, I. AYESTA, A. LAMIKIZ a L.N. LÓPEZ DE LACALLE. Flank milling model for tool path programming of turbine blisks and compressors. *International Journal of Production Research* [online]. 2014, **53**(11), 3354-3369 [cit. 2022-07-03]. ISSN 0020-7543. Dostupné z: doi:10.1080/00207543.2014.983619
- [34] EN AW-7075 T6 (AlZnMgCu1,5). : *alunet* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-7075>

[35] Okuma MU-400V II - Okuma - Katalog - Misan. *Misan* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://www.misan.cz/okuma/katalog-detail/mu-400v-ii-okuma-mu-400v-ii/?viewpart=2>

[36] FRANKEN Milling Cutters for Impellers and Turbine Blades. *[DirectIndustry...]* [online]. [cit. 2022-07-03]. Dostupné z: <https://pdf.directindustry.com/pdf/emuge-franken/franken-milling-cutters-impellers-turbine-blades/5603-783245.html>

[37] COUSINS, William T., Lei YU, Jacquelynn GAROFANO, Barbara BOTROS, Vishnu SISHTLA a Om SHARMA. Test and Simulation of the Effects of Surface Roughness on a Shrouded Centrifugal Impeller. In: *Volume 2D: Turbomachinery* [online]. American Society of Mechanical Engineers, 2014, 2014-06-16, - [cit. 2022-07-21]. ISBN 978-0-7918-4563-9. Dostupné z: doi:10.1115/GT2014-25480

Seznam obrázků

Obrázek 1: průřez turbodmychadlem - transformace tepelné energie na práci [1].....	11
Obrázek 2: rozdělení lopatkových strojů podle směru proudění k ose rotoru [1]	12
Obrázek 3: otevřené lopatkové kolo [2]	12
Obrázek 4: polootevřené lopatkové kolo [2]	13
Obrázek 5: uzavřené lopatkové kolo [2].....	13
Obrázek 6: 5-ti osé vertikální frézovací centrum [11].....	16
Obrázek 7: rozložení os obráběcího centra [13]	18
Obrázek 8: Vliv natočení osy nástroje [14]	18
Obrázek 9: natočení nástroje při 5-ti osém obrábění [16]	19
Obrázek 10: tvorba NC programu pomocí CAMu	21
Obrázek 11: příklad vygenerovaných drah nástroje v SW Fusion 360	22
Obrázek 12: vzor zápisu NC programu [11].....	22
Obrázek 13: porovnání 3-osého a 5-ti osého hrubování[24]	23
Obrázek 14: víceosé adaptivní hrubování.....	24
Obrázek 15: dokončení pomocí řídicí křivky [25].....	25
Obrázek 16: automatická změna osy nástroje [25].....	25
Obrázek 17: nabízené strategie v SW PowerMill	26
Obrázek 18: rozdělení hladin lopatkového kola 1[20].....	27
Obrázek 19: rozdělení hladin lopatkového kola 2 [20].....	27
Obrázek 20: offset dolů.....	28
Obrázek 21: offset nahoru.....	28
Obrázek 22: protnutí	28
Obrázek 23: znázornění indikátorů určujících shodu mezi modelem a obrobkem [30].	29
Obrázek 24: vliv posuvu na zub na výslednou kvalitu povrchu [30]	30
Obrázek 25: algoritmus optimalizace posuvu [30]	31
Obrázek 26: výsledná nepřesnost při obrábění lopatkového kola [30].....	31
Obrázek 27: povrch obrobeného a odlévaného lop. kola.....	31
Obrázek 28: účinnost obrobeného a odlévaného lop. kola	31
Obrázek 29: hrubovací strategie dle Morishige [31]	33
Obrázek 30: (a) strategie bočního frézování, (b) strategie bodového frézování [33]	34
Obrázek 31: monolitní toroidní fréza [27].....	35
Obrázek 32: toroidní fréza s VBD [26]	35

Obrázek 33: ukázka kulových kuželových fréz [29]	35
Obrázek 34: porovnání kulové a soudečkové frézy [28]	36
Obrázek 35: model lopatkového kola 1	38
Obrázek 36: model lopatkového kola 2	38
Obrázek 37: analýza minimálního poloměru 1	38
Obrázek 38: analýza minimálního poloměru 2	38
Obrázek 39: model lopatkového kola se zarovnaným souřadným systémem	39
Obrázek 40: plocha hrany lopatkového kola	39
Obrázek 41: plocha náboje	40
Obrázek 42: hladiny lopatkového kola	40
Obrázek 43: model polotovaru určený pro lopatkové strategie	41
Obrázek 44: tvorba geometrie nástroje	42
Obrázek 45: model nástroje s držákem a vyložení 30 mm	42
Obrázek 46: Okuma MU-400V II [35]	43
Obrázek 47: kuželová fréza 3446 [36]	44
Obrázek 48: kuželová fréza 3440 [36]	44
Obrázek 49: tepelný upínač Haimer DIN 69893-1 HSK-A63	45
Obrázek 50: výsledek simulace obrábění v SW Fusion 360	45
Obrázek 51: zobrazení drah přípravy polotovaru pro lopatkové strategie	46
Obrázek 52: zobrazení analýzy zbytkového materiálu obrobeneho polotovaru dle SW	47
Obrázek 53: okno strategie hrubování lopatky 1	48
Obrázek 54: okno strategie hrubování lopatky 2	48
Obrázek 55: dráhy hrubování lopatkové kapsy 1_2	48
Obrázek 56: výsledek simulace hrubování lop. kapsy 1_2	48
Obrázek 57: zobrazená kolize s polotovarem	49
Obrázek 58: výsledek simulace 1. části hrubování a dohrubování	49
Obrázek 59: zobrazení výsledku simulace – hrubovací a dokončovací operace	49
Obrázek 60: dráhy dokončení náboje	51
Obrázek 61: dráhy dokončení lopatkové kapsy 1_2	52
Obrázek 62: zobrazení kontaktní stopy nástroje v horní části lopatky	53
Obrázek 63: zobrazení analýzy zbytkového materiálu	54
Obrázek 64: výsledek simulace s modelem stroje	55
Obrázek 65: výčet chyb vzniklých při zápisu programu	55
Obrázek 66: vyrobené osazení o hloubce 3,5 mm a šířce 65 mm	57

Obrázek 67: zobrazení upnutí prvotního polotovaru pro výrobu osazení	57
Obrázek 68: středění polotovaru na stroji Okuma MU 400V II	57
Obrázek 69: vyrobený polotovar určený pro lopatkové strategie	58
Obrázek 70: vložení nástroje určeného pro lopatkové strategie do tepelného upínače ..	58
Obrázek 71: stav lopatkového kola po 1. části hrubování a dohrubování	59
Obrázek 72: stav lopatkového kola po 2. části hrubování a dohrubování	59
Obrázek 73: stav lopatkového kola po dokončení náboje	60
Obrázek 74: obrobené lopatkové kolo	60
Obrázek 75: měření drsnosti lopatky	61
Obrázek 76: popis měřených oblastí na lopatce č. 1	62
Obrázek 77: detailní záběr spodní část náboje	63
Obrázek 78: vyhodnocení drsnosti náboje ve spodní oblasti	63
Obrázek 79: detailní záběr na lopatku č. 7	64
Obrázek 80: záběr na lopatku č. 9	64
Obrázek 81: detailní záběr na spodní okraj lopatky	64

Seznam tabulek

Tabulka 1: porovnání 3 - osého a 5 - ti osého hrubování [24]	24
Tabulka 2: rozdělení prvků lopatkového kola	27
Tabulka 3: přiřazení prvků do hladin	27
Tabulka 4: chemické složení slitiny EN AW 7075 t6 [34]	42
Tabulka 5: parametry stroje Okuma MU-400V II	43
Tabulka 6: parametry kuželové frézy 3446 (hrubovací operace)	44
Tabulka 7: parametry kuželové frézy 3440 (dokončovací operace)	44
Tabulka 8: nastavené parametry hrubování část 1	50
Tabulka 9: nastavené parametry dohrubování	50
Tabulka 10: nastavené parametry hrubování část 2	50
Tabulka 11: nastavené parametry dokončení náboje	51
Tabulka 12: nastavené parametry pro lopatkové kapsy 1 až 9	53
Tabulka 13: nastavené parametry pro lopatkové kapsy 9 až 11	53
Tabulka 14: porovnání předpokládaných a reálných časů obrábění	61
Tabulka 15: naměřené drsnosti lopatek	62

Seznam grafů

graf 1: naměřené drsnosti lopatek v horní oblasti.....	65
graf 2: naměřené drsnosti lopatky 1.....	65

Seznam příloh

Příloha 1: Naměřené drsnosti lopatkového kola

Příloha 2: CAM projekt polotovaru a lopatkového kola