VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

APLIKACE CAM SOFTWARU POWERMILL PŘI PROGRAMOVÁNÍ LOPATKOVÉHO KOLA

APPLICATION OF CAM SOFTWARE POWERMILL FOR PROGRAMMING OF BLISK

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Bc. Tomáš Přibilík

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

BRNO 2014

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na modelování a tvorbu NC programů pro obrábění lopatkových kol. Software použitý pro modelování je CATIA V5R20 od firmy Dassault Systémes. Pro tvorbu NC programů je použit software PowerMILL od firmy Delcam. Ověření funkčnosti vytvořených NC programů probíhá v řídicím systému Sinumerik 840d.

Klíčová slova

lopatkové kolo, cad/cam, catia, powermill, sinumerik, obrábění

ABSTRACT

This master's thesis is focused on modeling and creation of NC programs for machining of the impellers. Software used for modeling is CATIA V5R20 from Dassault Systémes company. For creation of NC programs software PowerMILL from Delcam company is used. Verification of functionality of created NC programs is done in Sinumerik 840d control system.

Key words

impeller, cad/cam, catia, powermill, sinumerik, machining

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PŘIBILÍK, Tomáš. *Aplikace CAM softwaru PowerMILL při programování lopatkového kola.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2014. 82 s. 8 příloh. Vedoucí práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Aplikace CAM softwaru PowerMILL při programování lopatkového kola** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Tomáš Přibilík

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Aleši Polzerovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování této práce. Dále děkuji panu Jiřímu Čechovi za čas a ochotu vynaloženou pro práci na úkolech spojených s touto prací. Zároveň bych rád poděkoval za možnost využití vybavení NETME Centre, regionálního výzkumného a vývojového centra vybudovaného z finančních prostředků Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), Reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu "Národní program udržitelnosti I".

OBSAH

ABSTRAKT 4
PROHLÁŠENÍ 5
PODĚKOVÁNÍ 6
OBSAH 7
ÚVOD 9
1 LOPATKOVÉ STROJE 10
1.1 Teorie a rozdělení lopatkových strojů 10
1.2 Historie lopatkových strojů 10
1.3 Turbíny 11
1.3.1 Hydraulické (vodní) turbíny 11
1.3.2 Parní turbíny 12
1.3.3 Plynové turbíny 12
1.4 Ventilátory, kompresory, čerpadla 13
2 MATERIÁLY LOPATKOVÝCH KOL 14
2.1 Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli 14
2.1.1 Korozivzdorné oceli 14
2.1.2 Žáruvzdorné oceli 15
2.2 Hliník a jeho slitiny 15
2.3 Titan a jeho slitiny 16
2.4 Nikl a jeho slitiny 18
3 FRÉZOVÁNÍ 19
3.1 Základní parametry při frézování 20
3.2 Průřez třísky 21
3.3 Řezné síly 22
3.4 Rozdělení fréz 23
3.5 Frézovací stroje 24
3.6 Chlazení při obrábění 24
4 CAD/CAM TECHNOLOGIE 25
4.1 CAD technologie 25
4.2 CAM technologie 26
5 TVORBA MODELU LOPATKOVÉHO KOLA 27
5.1 Společnost Dassault Systemes 27
5.2 Modelování lopatkového kola 27
5.3 Tvorba polotovaru a upínače lopatkového kola. 38

6 TVORBA DRAH PRO OBROBENÍ LOPATKOVÉHO KOLA 41
6.1 Obrobitelnost hliníku 41
6.2 Obráběcí centrum MCV 1210 41
6.2.1 Technická data stroje 42
6.3 Společnost Delcam 42
6.4 Práce s programem PowerMILL 43
6.4.1 Hrubování 54
6.4.2 Dokončení lopatek 65
6.4.3 Dokončení středu 66
6.5 Simulace obrábění 66
6.6 Strojní časy 68
6.7 Tvorba NC programů 68
7 PŘENOS DAT DO OBRÁBĚCÍHO STROJE 70
7.1 Zajištění obrobení celého kola 74
8 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY 76
ZÁVĚR 77
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 78
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 80
SEZNAM PŘÍLOH 82

ÚVOD

Lopatkové stroje jsou nedílnou součástí moderního světa. Můžeme se s nimi setkat v podstatě všude kolem nás – v elektrárnách (turbíny), v autech (turbodmychadlo), u letadel (letecké plynové turbíny), u čerpadel atd. Výroba lopatkových strojů může někdy být velice náročná. Za výrobně náročnou součást by se dal považovat hlavní komponent lopatkových strojů – lopatkové kolo. Tvarů a velikostí lopatkových kol je velmi velké množství a jejich výroba může vyžadovat řízení obráběcího nástroje až v pěti osách. K dosažení úspěšného vyrobení takovéto součásti nesmírně napomáhají CAD/CAM technologie.

CAD/CAM technologie jsou dnes běžnou součástí předvýrobního procesu. CAD technologie nám umožňují rychle vytvářet a vizualizovat požadovanou součást. CAM technologie umožňují rychle vytvářet obráběcí dráhy nástroje a některé lepší CAM softwary jsou schopné i simulace obrábění. Konstruktér nebo technolog má tedy jasnou představu o tvaru součásti a průběhu její výroby ještě před samotnou fyzickou výrobou.

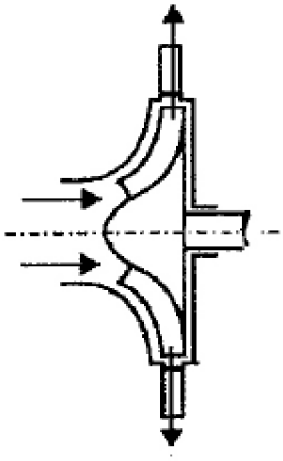
Tato práce je zaměřena na modelování lopatkových kol v CAD softwaru CATIA V5R20 a tvorbu obráběcích drah pro odstředivé lopatkové kolo v CAM softwaru PowerMILL 2014 s následným vytvořením a otestováním NC programů. Lopatkové kolo řešené v této práci bylo navrženo dle materiálového, strojního a nástrojového vybavení dílen VUT FSI za účelem možné výroby pro reklamní účely.

1 LOPATKOVÉ STROJE

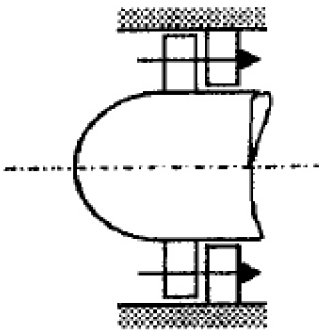
1.1 Teorie a rozdělení lopatkových strojů

Lopatkové stroje jsou zařízení, která jsou charakteristická kontinuálním proudem média (kapaliny nebo plynu) skrz jednu nebo více řad rotujících lopatek na oběžném (lopatkovém) kole. Energie jako práce je získána z proudícího média nebo přenesena na proud média dynamickým působením lopatkových řad. V případě že je energie odebírána z proudu média jeho expanzí na nižší tlak, tak se zařízení nazývá turbína (větrná, parní, plynová nebo hydraulická). V případě že je energie přenášena na médium zvyšováním jeho tlaku, tak se zařízení nazývá čerpadlo, kompresor nebo ventilátor. [1,2,3,5]

Lopatkové stroje lze rozdělit dle změny směru proudění přenosového média po přechodu lopatkovým kolem na radiální (obr. 1.1) a axiální (obr. 1.2). U radiálních strojů je většinou proud média směřován k největšímu průměru lopatkového kola, kdežto u axiálních strojů je proudění média paralelní s osou lopatkového kola. [1,2,5]



Obr. 1.1 Radiální lopatkový stroj. [4]



Obr. 1.2 Axiální lopatkový stroj. [4]

Lopatkový stroj může být se stacionární skříní (např. letecká nebo parní turbína), nebo i bez ní (např. vrtule letadla nebo rotor vrtulníku). [1,4]

Lopatkové stroje jsou nezbytné pro chod moderního světa. Turbíny jsou použity ve všech významných zdrojích elektrické energie – větrné elektrárny a elektrárny využívající plynové, parní nebo hydraulické turbíny. Plynové turbíny jsou hojně využívané v leteckém průmyslu. Čerpadla jsou používána pro dopravu vody do všech domácností, nebo pro dopravu ropy atd. Lopatkové stroje jsou zkrátka všude kolem nás. [3]

1.2 Historie lopatkových strojů [1,6]

Znalost lopatkových strojů se vyvíjela pomalu skrz několik století bez nějakého náhlého přelomového objevu. Lopatkové stroje, jako je například větrné a vodní kolo jsou stovky let staré. Vodní kolo (mlýnské kolo) bylo používáno ve starověkém Egyptě, Číně a Asýrii. Objevuje se také v Řecku a Římě v druhém století př. n. l. V knize z Winchesteru, kterou nařídil sepsat Vilém Dobyvatel roku 1086, se píše, že v Anglii tou dobou existovalo 5 624 vodních mlýnů. Vodní kola nesloužila pouze k mletí obilí, ale také k pohánění vodních pump a různých strojů. Roku 1685 Ludvík XIV nechal ve Francouzském Marly postavit 221 pístových pump za účelem přivádět vodu do fontány ve Versaillském paláci. Tyto

pumpy byly poháněny čtrnácti dvanáctimetrovými vodními koly. Roku 1850 začali vodní kola střídat turbíny.

Přestože využívání větrné energie bylo již dlouho známé k pohonu plachetnic, vývoj větrných kol se datuje až od sedmého století v Persii. Postupem času se jejich používání rozšířilo po celém světě. Byly používány v podstatě ke stejným účelům jako vodní mlýny. Roku 1890 se větrné kolo začalo využívat k pohonu generátoru elektrické energie.

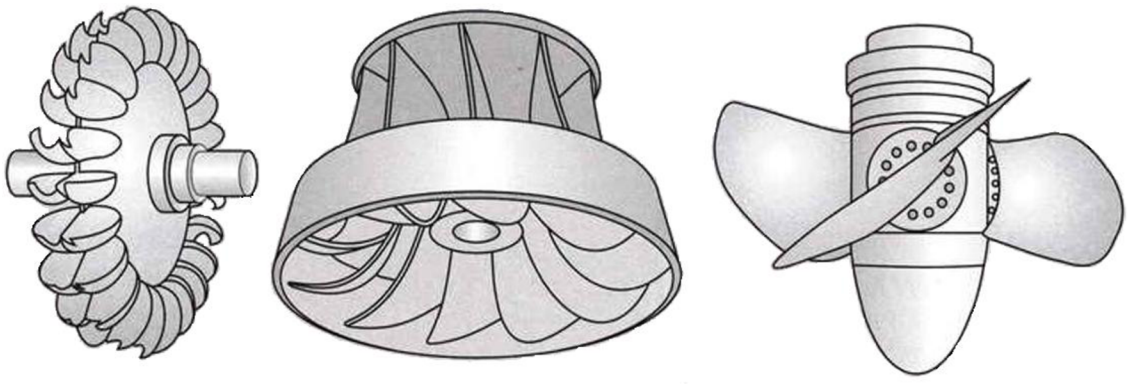
V druhém století př. n. l. vynalezl Hérón Alexandrijský rotor poháněný párou a plynem. Tyto stroje však nenašli využití z důvodu velmi malé účinnosti. Během osmnáctého a devatenáctého století byl vynalezen oběhový parní motor a stal se převládajícím pohonem ve výrobním a transportním průmyslu. První parní turbína byla sestavena de Lavalem roku 1883, která dosáhla 26 000 otáček za minutu. Roku 1884 byla sestrojena parní turbína Parsonem, která dosahovala 17 000 otáček za minutu.

Plynová turbína byla koncipována Johnem Barberem roku 1791 a poprvé byla vyrobena a otestována roku 1900 panem Stolzem. Dva roky poté sestavil Sanford Moss plynovou turbínu na Cornellské Univerzitě. Roku 1903 pánové Armenguad a Lemale z Brown Boveri zkombinovali axiální turbínu s odstředivým kompresorem k vytvoření tepelné účinnosti o velikosti 3%. Na začátku dvacátého století byl sestaven turbokompresor, který byl instalován k dieselovému motoru a dále byl použit pro zvýšení výkonu vojenských leteckých motorů. První spalovací plynová turbína byla instalována ve Švýcarsku roku 1939. Podobná turbína byla použita ve Švýcarských lokomotivách roku 1942. Letecká plynová turbína byla vyvinuta Junkersem v Německu roku 1940.

1.3 Turbíny

1.3.1 Hydraulické (vodní) turbíny

Jak z názvu vyplývá, u hydraulických turbín je zdrojem energie voda. Tyto turbíny mění kinetickou a potenciální energii vody na mechanickou energii. Hydraulické turbíny jsou všeobecně používány jako pohon generátoru elektrické energie. Hlavní dva typy turbín jsou impulzní a reakční. Dominantním typem impulzní turbíny je Peltonova turbína (obr. 1.3a), kterou lze použít pro rozmezí spádu 150 – 2 000 m. Mezi reakční turbíny spadá Francisova turbína (obr. 1.3b), charakteristická radiálním lopatkovým kolem, a Kaplanova turbína (obr. 1.3c), která je naopak axiální. Tyto tři typy turbín jsou pojmenované po jejich tvůrcích a jsou nejrozšířenější po celém světě. [3,5]

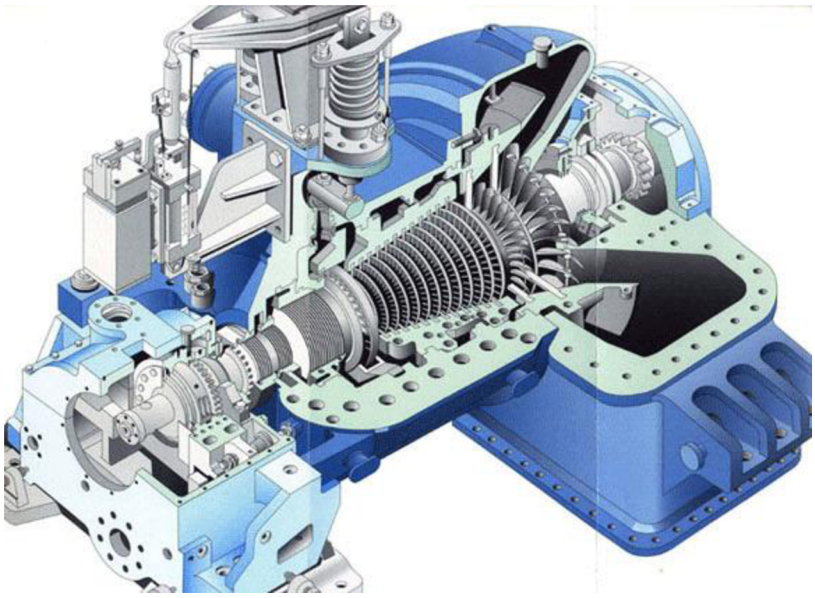


a) b) c)

Obr. 1.3 a) Peltonova turbína. b) Francisova turbína. c) Kaplanova turbína. [7]

1.3.2 Parní turbíny

U parních turbín (obr. 1.4) vysokotlaká pára z kotle expanduje v řadách stacionárních lopatek. Pára o vysoké rychlosti vystupující z řad stacionárních lopatek naráží do řad pohyblivých lopatek na oběžném kole. Zde je kinetická energie páry přenesena na rotor turbíny. Tyto turbíny jsou stejně jako hydraulické turbíny používány převážně jako pohon generátorů elektrické energie. [5]



Obr. 1.4 Řez parní turbínou. [6]

Teplota páry vstupující do turbíny dosahuje až 540 °C a má tlak až 140 barů. Otáčky rotoru se pohybují mezi 3 500 – 15 000 /min. Pro zvýšení účinnosti turbíny se zvyšují teploty páry až na 620 °C a na tlak 600 barů. [6]

1.3.3 Plynové turbíny

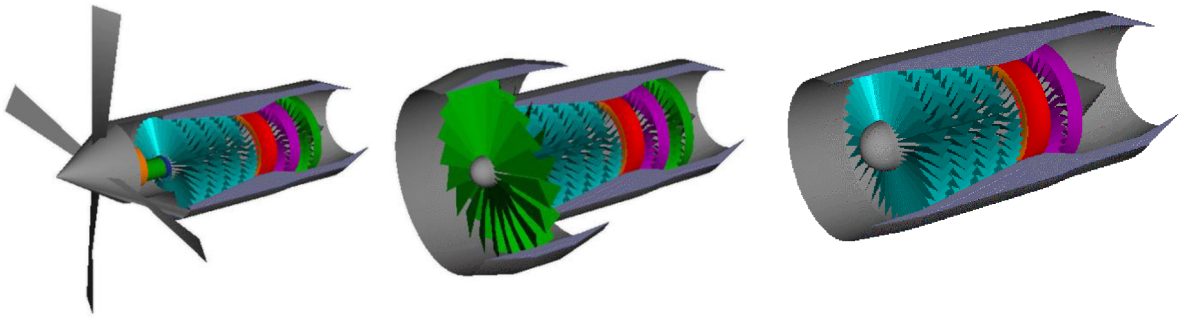
Plynové turbíny jsou použity pro různé účely od leteckých motorů a jednoduchých mechanických pohonů (na zemi, moři a ve vzduchu) až po komplikované plynové lasery a nadzvukové větrné tunely. [8]

Plynová turbína pracuje na stejném principu jako parní turbína s tím rozdílem, že oběžné kolo není roztáčeno párou, ale spalinami o vysoké teplotě ze spalovací komory.

Letecké motory

K pohybu letadla ve vzduchu je třeba použít takový pohonný systém, který vytváří tah. Nejrozšířenější formou pohonu v moderním letectví je plynová turbína. Tyto turbínové motory existují v různých variantách. [9]

Základními typy turbínových motorů v letectví jsou turbovrtulové motory (obr. 1.5a), turbodmychadlové motory (obr. 1.5b) a proudové motory (obr. 1.5c). Každý z těchto motorů sdílí některé části: kompresor, spalovací komoru, turbínu, přívod a trysku. Kompresor, spalovací komora a turbína jsou často nazývány jako jádro motoru. [8,9]



a) b) c)

Obr. 1.5 a) Turbovrtulový motor. b) Turbodmychadlový motor. c) Proudový motor. [9]

Mechanické pohony

Plynové turbíny jsou používané i pro pohon různých zařízení, jako je tomu například u vodních a parních turbín jako pohon generátoru elektrické energie. Jsou používané také jako pohony vozidel, lodí apod. [10]

1.4 Ventilátory, kompresory, čerpadla

Ventilátory, kompresory (obr. 1.6a) a čerpadla (obr. 1.6b) jsou zařízení, která přenášejí médium mezi oblastmi rozdílných tlaků, tj. z oblasti nižšího tlaku do oblasti o vyšším tlaku. Přenášeným médiem se rozumí kapalina či plyn. Kapaliny se přenáší čerpadly a plyny zase ventilátory a kompresory. Hlavní rozdíl mezi přenášením kapalin a plynů je ten, že u plynů dochází k významným změnám v objemu a teplotě jestliže dochází ke značné změně tlaku. Spolu s kapalinami a plyny mohou být přenášeny i více komplexní média, jako je například směs kapalina-plyn, kapaliny které se částečně vypařují, plyny které kondenzují, kapaliny obsahující pevné částice a plyny s pevnými částicemi. Všechny tyto komplexní média mohou vyžadovat speciální zacházení, nebo speciální zařízení. [10]

a) b)

Obr. 1.6 a) Lopatkové kolo radiálního odstředivého kompresoru. b) Hasičské čerpadlo. [11]

2 MATERIÁLY LOPATKOVÝCH KOL

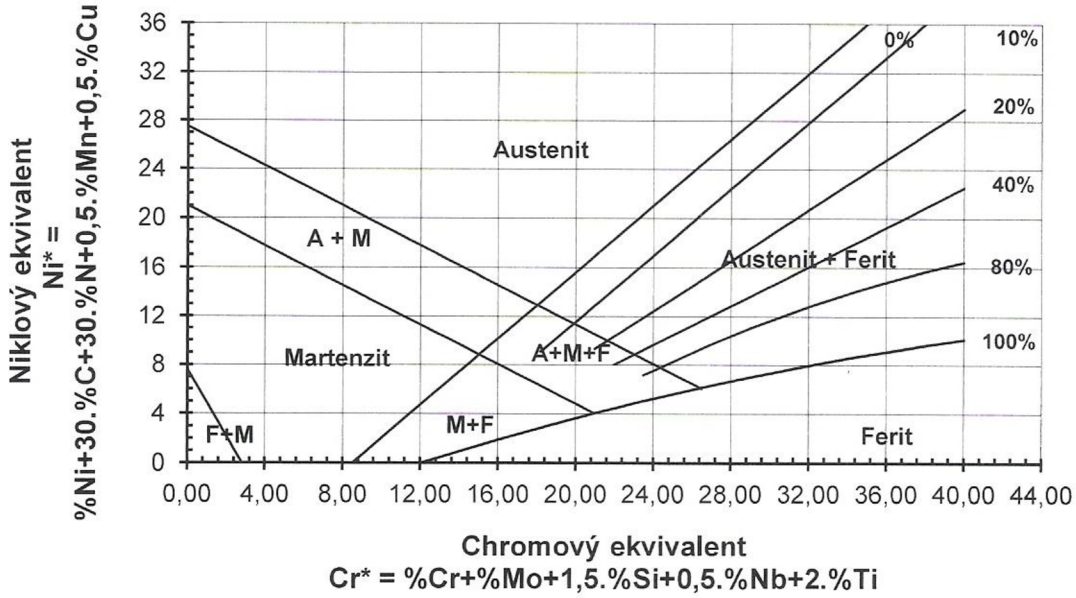
Lopatkové stroje jsou používané pro různé účely a pro různá pracovní média a tudíž i škála materiálů, ze kterých jsou jejich lopatková kola vyrobena, je velice rozsáhlá. Použitými materiály mohou být plasty, kovy, keramika, kompozitní materiály atd. Tato kapitola se zabývá těmi materiály, se kterými je možné se nejčastěji setkat. Těmito materiály jsou korozivzdorné a žáruvzdorné oceli (např. u vodních a parních turbín), hliníkové slitiny (např. u turbokompresorů), titanové slitiny (např. turbodmychadlo u leteckých motorů) a niklové slitiny (např. lopatky plynových turbín).

2.1 Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli

2.1.1 Korozivzdorné oceli

Základním prvkem ve vysokolegovaných korozivzdorných ocelích je chróm. Korozivzdorné oceli jsou schopné pasivace, která dává těmto ocelím odolnost proti elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Minimální obsah chrómu v oceli musí být 11,5 %. Obsah chrómu v tuhém roztoku, který zajišťuje korozivzdornost, závisí jak na obsahu chrómu v oceli, tak i na obsahu uhlíku, který tvoří s chrómem karbidy. Tvorba karbidů je nežádoucí, jelikož pak ocel ztrácí korozivzdornost v místech ochuzených o chróm. Z toho důvodu se do této oceli přidávají prvky s větší afinitou k uhlíku, než má chróm. Jedná se nejčastěji o Nb, Ta a Ti. Korozivzdorné oceli mají charakteristicky nízký obsah uhlíku – je většinou nižší než 0,08%. Druhým nejdůležitějším prvkem v těchto ocelích je nikl, který také přispívá ke zvýšení korozivzdornosti. [12]

U korozivzdorných ocelí byl zaveden tzv. chromový a niklový ekvivalent. Pomocí těchto ekvivalentů lze určit strukturu oceli pomocí Schäfflerova diagramu (obr. 2.1).



Obr. 2.1 Schäfflerův diagram. [13]

Korozivzdorné oceli se dělí dle struktury na [12]:

- Feritické,
- martenzitické a vytvrditelné,
- austenitické,
- duplexní (austeniticko-feritické).

Feritické korozivzdorné oceli

Tyto oceli obsahují 15 – 30% Cr a velmi nízký obsah uhlíku (pod 0,08%) a niklu. [12,14] Feritické oceli s vyššími obsahy uhlíku jsou při pokojové teplotě křehké a používají se jako oceli žáruvzdorné. [12]

Martenzitické korozivzdorné oceli

V těchto ocelích se obsah chromu pohybuje mezi 12 – 18% a 0,1 – 1,2% uhlíku. Přídavnými prvky jsou například Mo, V, Nb, Ti a Cu k dosažení požadovaných vlastností. [14,15]

Austenitické korozivzdorné oceli

Tyto oceli obsahují 17 – 25% Cr a 8 – 20% Ni. Obsah uhlíku je nízký. [15]

Duplexní korozivzdorné oceli

Jako duplexní oceli se označují austeniticko-feritické oceli s obsahem 40 – 60% feritu. Austeniticko-feritické oceli obsahují 21 – 28% Cr a 3,5 – 8% Ni. [12] Tyto oceli jsou charakteristické vysokou pevností a skvělou odolností proti korozi. [14,15]

2.1.2 Žáruvzdorné oceli

Žáruvzdorné oceli mají vysokou odolnost proti oxidaci a korozi a mají dlouhodobě stálé vlastnosti v horkých plynech. Odolnost proti oxidaci za vysokých teplot získávají oceli legováním Cr, Si, Al a Ni. Při obsahu chrómu nad 13% se na povrchu oceli tvoří oxid Cr_2O_3 obsahující malé množství železa a niklu. Nikl zlepšuje přilnavost vrstvy oxidů Cr, které chrání povrch kovu před další oxidací. Podobně jako chróm vytvářejí oxidické vrstvy přilnavé k povrchu kovu v oxidačním prostředí za vysokých teplot křemík a hliník. Jejich složení je podobné jako u nerezavějících ocelí a jak bylo uvedeno, některé nerezavějící oceli se používají jako žáruvzdorné. Podle struktury se rozdělují na feritické, austenitické a feriticko-austenitické. [12]

2.2 Hliník a jeho slitiny

Slitiny hliníku patří kromě ocelí k nejpoužívanějším kovovým konstrukčním materiálům. Surovinou pro výrobu hliníku je minerál bauxit, v čistém stavu oxid hlinitý. Výroba hliníku byla patentována v roce 1886 a od roku 1890 zahájena v průmyslovém měřítku. V roce 1906 byla vyvinuta první slitina hliníku známá jako dural (AlCu4Mg). Dnešní základní řada nejvíce používaných slitin hliníku je celosvětově unifikována a její vývoj je v podstatě ukončen. [12]

K přednostem hliníku lze počítat zejména nízkou měrnou hmotnost a poměrně dobrou pevnost, což znamená, že pevnostní charakteristiky některých slitin hliníku jsou srovnatelné s obdobnými charakteristikami ocelí, případně jsou lepší. Slitiny hliníku, pokud neobsahují měď, velmi dobře odolávají korozi v atmosféře a látkám kyselé povahy. [12]

Čistý hliník je měkký, lehký kov se světle šedým stříbřitým vzhledem. Jeho mez pevnosti se pohybuje mezi 90 – 140 MPa. V této čisté formě je hliník použit například v domácnosti jako plechovka nebo alobal, nebo také jako elektrický vodič. Z důvodu malé pevnosti hliníku v čisté formě je použito legování pro dosažení lepších mechanických vlastností. Legováním může být dosaženo až 500 MPa v mezi pevnosti. [16]

Slitiny hliníku se dělí na slitiny pro tváření a slitiny na odlitky (obsahují křemík pro lepší zabíhavost), které jsou dále rozděleny do osmi skupin dle hlavního legujícího prvku. Hlubší rozdělení je dle tepelného zpracování na tepelně zpracovatelné a nezpracovatelné (schopnost zvýšit tvrdost a pevnost tepelným zpracováním). Hlavními legujícími prvky jsou: měď, mangan, křemík, hořčík a zinek. [12,17]

Nejdůležitější slitiny hliníku jsou magnalium (10 – 35% Mg), duraluminium (Cu, Mg, Mn), silumin (13 – 25% Si), hydronalium (Mg) nebo pental (Mg, Si). Mezi nejpevnější slitiny hliníku patří slitiny obsahující zinek, hořčík, titan, chrom a měď. Za nejznámější slitinu by se dalo považovat duraluminium, neboli dural. [18]

2.3 Titan a jeho slitiny

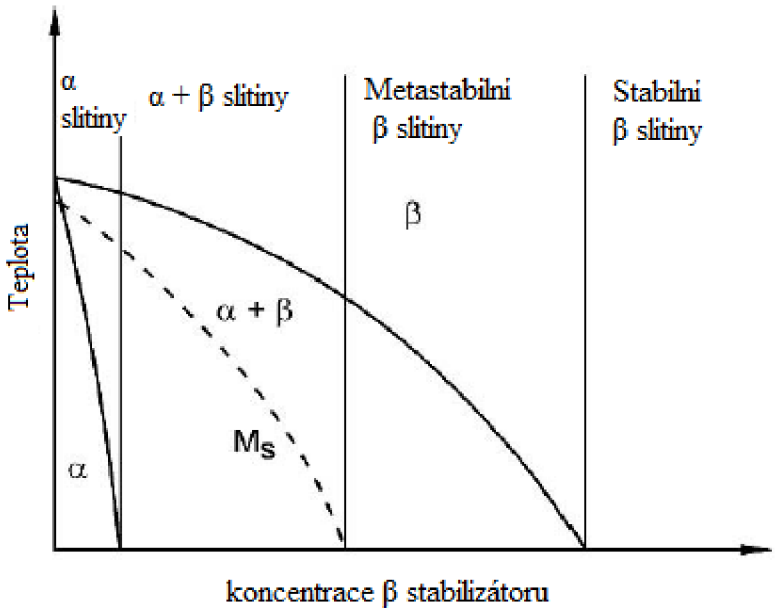
Vývoj slitin titanu byl vyvolán a usměrňován v převážné míře požadavky konstruktérů leteckých motorů. Praktické použití titanu se datuje od roku 1948, kdy byly v USA vyrobeny první dvě tuny. V bývalém SSSR byl titan vyráběn od roku 1950. Surovinou je oxid titaničitý z minerálů rutilu nebo ilmenitu, který je převáděn chlorováním na chlorid titaničitý, a ten pak redukován hořčíkem na kovový titan. [12]

Titan má velmi dobrý poměr pevnosti/váhy, vysokou odolnost proti korozi a tepelnou stabilitu (v tabulce 2.1 jsou ukázány základní charakteristiky titanu v porovnání s železem, niklem a hliníkem). Titan má také mnohem vyšší teplotu tavení než hliník, hlavní konkurent titanu u lehkých konstrukcí, a proto má výhodu v použití nad teplotami 150 °C. Nevýhodou je jeho vysoká cena z důvodu nákladné výroby. Titan je vysoce reaktivní s kyslíkem nad teplotou přibližně 650 °C. Nad touto teplotou je difuze kyslíku skrz zoxidovanou povrchovou vrstvu příliš rychlá, což má za následek nárůst zoxidované vrstvy a její zkřehnutí. [12,19]

Tab. 2.1 Charakteristiky titanu v porovnání s Fe, Ni a Al. [19]

	Ti	Fe	Ni	Al
Teplota tavení [°C]	1670	1540	1455	660
Alotropická přeměna [°C]	β → α 882	γ → α 912	/	/
Krystalická struktura	bcc → hcp	fcc → bcc	fcc	fcc
Modul pružnosti v tahu E [GPa]	115	215	200	72
Hustota [g/cm3]	4,5	7,9	8,9	2,7
Srovnávací odolnost proti korozi	velmi vysoká	nízká	střední	vysoká
Srovnávací reaktivita s kyslíkem	velmi vysoká	nízká	nízká	vysoká
Srovnávací cena kovu	velmi vysoká	nízká	vysoká	střední

Slitiny titanu lze rozdělit do tří skupin dle jejich pozice v pseudo-binárním β izomorfním fázovém diagramu (obr. 2.2) na slitiny α, α+β a β. [19]



Obr. 2.2 Schématický pseudo-binární β izomorfní fázový diagram. [19]

Slitiny α mají mřížku hcp a jsou stabilní do 882,5 °C. Slitiny β mají mřížku bcc a jsou stabilní od 882,5 ° do teploty tání 1670 °C. Přísadové prvky přispívající ke vzniku α fáze se nazývají α stabilizátory (Al, O, N, C) a naopak prvky přispívající ke vzniku β fáze se nazývají β stabilizátory (V, Nb, Mo, Ta). Tuhý roztok β se také může při nízké teplotě rozpadnout eutektoidní přeměnou (Cu, Si, Cr, Mn, Fe, Co, Ni). Neutrálními prvky jsou Sn a Zr. [12,20]

Slitiny α jsou slitiny s velkou tepelnou stabilitou, dobrou pevností a odolností proti křehkému porušení i za velmi nízkých teplot. Mají dobrou žáropevnost do 300 °C. Optimální vlastnosti mají slitiny s asi 5 % Al a 2 – 3% Sn. Nekovy O, N a C sice přispívají k tvorbě α fáze, ale jsou to nečistoty, které je potřeba udržovat v nízkém obsahu. Z tohoto důvodu je praktickým α stabilizátorem pouze hliník. [12,20]

Slitiny α + β jsou nejčastěji používané slitiny (např. Ti-6Al-4V s pevností v tahu až 1125 MPa). Mají lepší tvařitelnost v žíhaném stavu než slitiny α, lepší odolnost proti únavovému namáhání a lze je tepelným zpracováním vytvrdit. Tyto slitiny se používají pro silově zatížené součásti jako lopatky turbín a kompresorů apod. [12]

Slitiny β mají velmi vysokou odolnost proti korozi a dobrou tvařitelnost za studena. Mají také lepší pevnost než slitiny α + β ve vysokých teplotách. Tyto slitiny jsou však velmi drahé z důvodu nákladné výroby legujících prvků. Může u nich být dosaženo až 1400 MPa v mezi pevnosti v tahu. [12,20]

Lze se také setkat se slitinami pseudo α (slitina α obsahující max 6% fáze β) a slitinami pseudo β (slitina β s malým množstvím fáze α. [12,20]

2.4 Nikl a jeho slitiny

Nikl je stříbrobílý, lesklý, kujný, tažný a korozivzdorný feromagnetický kov. Výhodou aplikace niklu a jeho slitin je zejména to, že si uchovává svoje mechanické vlastnosti do poměrně vysokých teplot (500 °C u běžných slitin a u některých superslitin až do cca 900 °C). Nikl je z 60% využíván jako přísada do ocelí (korozivzdorné apod.), asi 15% je využit na polotovary a zbylých 25% jsou niklové slitiny. [12,21]

Nikl je poměrně stálý vůči působení vzduchu i vody a proto se často používá jako ochranná vrstva jiných kovů, především železa. Je také značně stálý vůči působení alkálií a používá se proto k výrobě zařízení pro práci s alkalickými hydroxidy neboli louhy. [22]

Slitiny niklu mají vysoký elektrický odpor, vysokou odolnost proti korozi a opalu, vysokou pevnost, žáropevnost a houževnatost. Rozdělují se dle použití na slitiny konstrukční, slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi a na žáruvzdorné a žáropevné slitiny. [12.22]

Konstrukční slitiny [12,22]

Ni – Cu slitiny, tzv. monely mají vysokou odolnost proti korozi, dobrou pevnost, houževnatost a tepelnou vodivost. Používají se v potravinářském, farmaceutickém a chemickém průmyslu, dále jako součásti čerpadel, lopatky turbín atd.

Ni – Be slitiny s obsahem do 2% Be lze vytvrdit až na mez pevnosti 1800 MPa. Vyrábí se z nich pružiny, membrány, trysky a formy na vstřikování plastů pro teploty až 500 °C.

Ni – Mn slitiny výborně odolávají korozi za vyšších teplot v prostředí se sírou. Použity jsou např. jako kontakty zapalovacích svíček.

Ni – Mo slitiny odolávají koroznímu působení kyseliny solné a chloridů.

Dále to můžou být slitiny **Ni – Al**, **Ni – Si** a **Ni – Co**.

Žáruvzdorné a žáropevné slitiny

Tyto slitiny jsou výrazně žáruvzdornější a žáropevnější než kterékoli železné slitiny. Používají se pro teplotně a mechanicky nejvíce namáhané součásti. Jsou využívané pro pracovní teploty nad 500 °C. Jejich tváření a obrábění je velice obtížné. [12,21,22]

Žáruvzdorné slitiny jsou na bázi Ni – Cr, nebo Ni – Cr – Fe. Chrom je základním prvkem udržujícím žáruvzdornost. Obsah chrómu bývá od 15 – 30%. Obsah železa může být až 20%. [12,22]

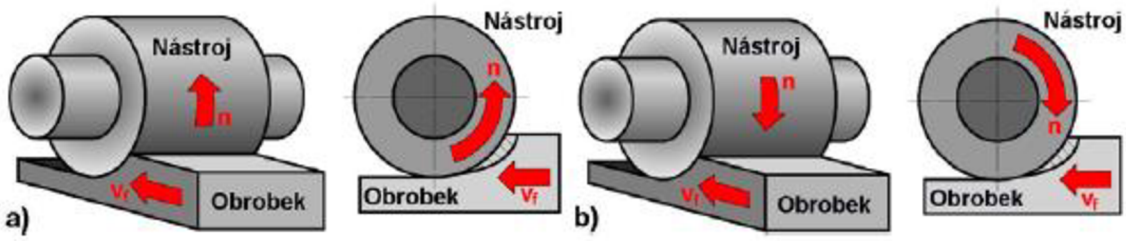
Žáropevné slitiny jsou také na bázi Ni – Cr + přísady Al a Ti, tvořící hlavní vytvrzující fázi. [12]

Obchodní značení těchto slitin mohou být: Hasteloy, Inconel, Incoloy, Inco, Nivnic, Udimet, Waspaloy atd. [12,22]

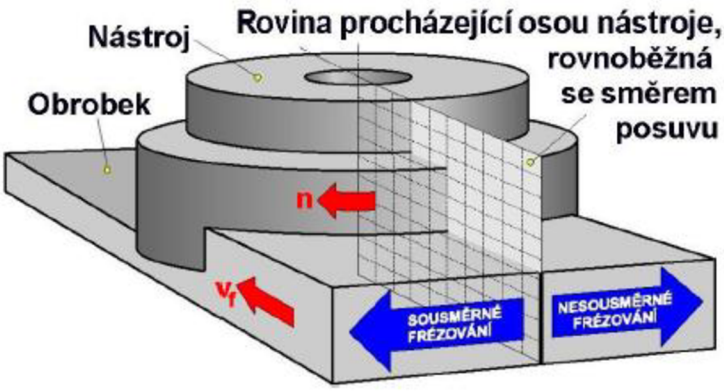
3 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je obráběcí metoda, při které je materiál obrobku odebírán vícebřitým nástrojem. Hlavní, rotační pohyb, vykonává nástroj - fréza. Vedlejší pohyb koná obrobek nebo i nástroj, záleží na konstrukci obráběcího stroje. Vedlejší pohyb bývá většinou přímočarý, nebo rotační. U moderních frézovacích strojů lze posuvové pohyby plynule měnit a to až v pěti osách. Řezný proces je přerušovaný – každý zub frézy odebírá krátké třísky proměnného průřezu. [23,24] Nástroj pro frézování se nazývá fréza a stroj zase frézka nebo obráběcí centrum.

Z hlediska technologie se dle aplikovaného nástroje frézování dělí na frézování válcové (obr. 3.1) a frézování čelní (obr. 3.2). Další rozdělení je na sousledné (sousměrné) a nesousledné (nesousměrné) frézování. [23,24,25]



Obr. 3.1 a) Válcové frézování nesousledné. b) Válcové frézování sousledné.



Obr. 3.2 Čelní frézování.

U válcového frézování jsou zuby pouze po obvodu frézy. Obrobená plocha je rovnoběžná s osou otáčení frézy a rovinou posuvu. Tento způsob frézování se uplatňuje při práci s válcovými a tvarovými frézami. Frézovací stroje pro tento způsob frézování jsou většinou horizontální frézky. Z tohoto důvodu je tento způsob frézování také nazýván jako horizontální frézování. [23,24,25]

U čelního frézování jsou zuby na obvodu i na čele frézy. Obrobená plocha je kolmá na osu rotace frézy. [23,24] Při používání nástroje o velkém průměru je v praxi dobré naklopit osu nástroje o 1 - 3° ve směru posuvu pro eliminaci prohnutí nástroje vlivem silového zatížení. Čelní frézování se většinou provádí na vertikálních strojích, proto se mu může říkat vertikální frézování. [25]

Nesousledné frézování je docíleno rotací nástroje proti směru posuvu obrobku. Zub frézy odebírá třísku postupně od nulové tloušťky a zvětšuje její průřez postupem řezání na maximální tloušťku. To má za následek, že zub nejdříve klouže po obrobené ploše, poté dochází k plastické deformaci obráběného materiálu a až poté vniká zub do materiálu a začíná oddělovat třísku. Takto vznikají silové účinky a deformace, které mají za následek zvýšené opotřebení břitu. U některých kovů nesousledné frézování způsobuje vytvrzení povrchu obrobené plochy. Řezná síla má složku působící směrem ven z obrobku a odtahuje ho od stolu stroje -> dobré upevnění obrobku na stole. [23,24,25]

Výhody nesousledného frézování jsou [23,24,25]:

- Opotřebení nástroje nezáleží na špatném nebo nečistém povrchu obráběné plochy (okuje, písek, apod.),
- menší opotřebení šroubu a matice u posuvů stroje,
- není nutné vymezovat vůle mezi posuvovým šroubem a maticí stroje,
- zatěžování zubů frézy je postupné.

Při sousledném frézování nástroj rotuje ve směru posuvu obrobku. U tohoto typu frézování se tříska tvoří od maximální tloušťky do nulové tloušťky. Řezné síly působí do obrobku, a tudíž ho přitlačují ke stolu stroje. Tento způsob frézování může být prováděn pouze na přizpůsobeném stroji s vymezenými vůlemi mezi šroubem a maticí posuvu, jinak může dojít k poškození stroje. [23,24,25]

Výhody sousledného frézování jsou: [23,24,25]

- Upínače pro obrobek jsou jednodušší a levnější díky řezné síle přitlačující obrobek ke stolu stroje,
- vyšší řezné podmínky díky menšímu opotřebení břitů,
- menší sklon k vibracím,
- lepší struktura obrobeného povrchu.

3.1 Základní parametry při frézování

Základními parametry při frézování jsou [26]:

- Řezná rychlost (v_c),
- posuv na zub (f_z) a posuvová rychlost (v_f),
- axiální hloubka řezu (a_p) a radiální hloubka řezu (a_e).

Řezná rychlost a posuvová rychlost se stanoví na základě těchto vztahů [26,27]:

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} \; [m \cdot min^{-1}] \tag{3.1}$$

$$v_f = z \cdot f_z \cdot n \; [mm \cdot min^{-1}] \tag{3.2}$$

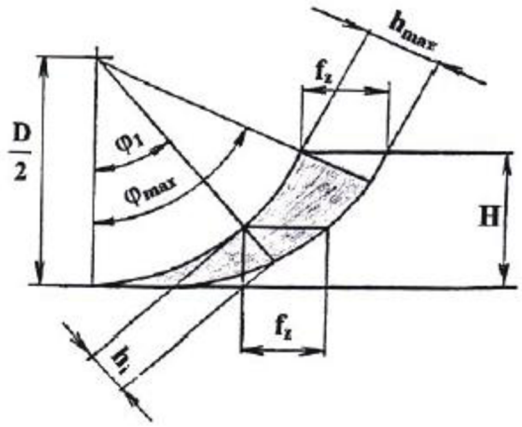
Kde: D [mm] – průměr frézy

n [min^{-1}] – otáčky

f_z [mm] – posuv na zub a z [-] – počet zubů frézy

3.2 Průřez třísky

Okamžitá tloušťka třísky h_i (obr. 3.3) závisí na úhlu zubu v záběru φ_i. To znamená, že každý zub odebírá jinou tloušťku. [26]



Obr. 3.3 Průřez třísky. [27]

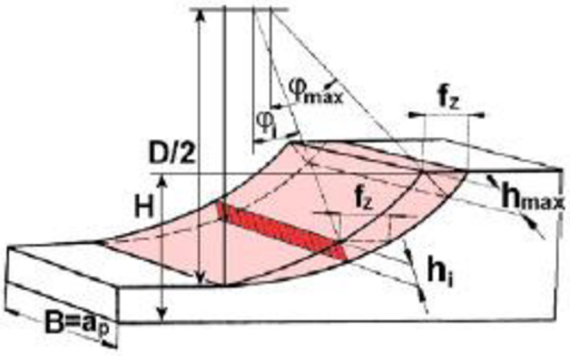
Tloušťka odřezávané třísky h_i se při válcovém frézování (obr. 3.4) vyjádří vztahem [24,26,27]:

$$h_i = f_z \cdot sin\varphi_i \; [mm] \tag{3.3}$$

Kde: f_z [mm] – posuv na zub,

φ_i [°] – úhel posuzovaného zubu.

Úhel posuzovaného pohybu φ_i se mění nejen v závislosti na poloze řešeného zubu, ale u fréz se šikmými zuby nebo zuby ve šroubovici, také podél příslušného ostří. [24,27]



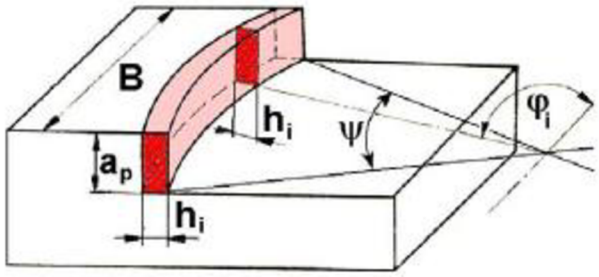
Obr. 3.4 Průřez třísky při válcovém frézování. [24]

Jmenovitý průřez třísky pro danou polohu zubu i se značí A_{Di} a vyjádří se pomocí vztahu [24,27]:

$$A_{Di} = a_p \cdot h_i = a_p \cdot f_z \cdot sin\varphi_i \; [mm^2] \tag{3.4}$$

Maximální hodnota jmenovitého průřezu bude tehdy, když bude největší hodnota tloušťky odřezávané třísky h_i, což nastane v úhlu $\varphi i = 90°$. V tomto úhlu je $h_i = f_z$. [24.26.27]

U čelního frézování se tloušťka třísky (obr. 3.5) vypočítá stejným způsobem jako u válcového frézování.

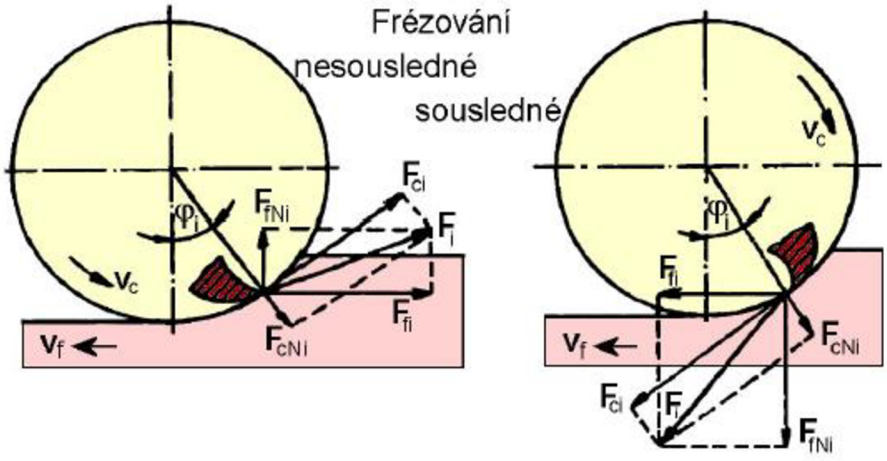


Obr. 3.5 Průřez třísky při čelním frézování. [24]

3.3 Řezné síly

Řezné síly se počítají za účelem zajištění bezpečného obrábění -> dostatečné upínací síly obrobku, dostatečný výkon stroje, dostatečná tuhost nástroje atd. Velikost řezné síly závisí na mnoha faktorech, jako je například geometrie břitu nástroje a materiál obrobku.

Při určování řezných sil se vychází ze silových poměrů na jednom břitu, který je v poloze určené úhlem φ_i. Pro válcové frézování nástrojem s přímými zuby se celková řezná síla působící na břitu F_i rozkládá na složky F_{ci}, F_{fi} a F f_{Ni} (obr. 3.6). [24]



Obr. 3.6 Řezné síly na zubu válcové frézy. [24]

Řezná síla F_{ci} se vyjádří na základě měrné řezné síly k_{ci} a průřezu třísky A_{Di} [24]:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot sin\varphi_i \; [N] \tag{3.5}$$

Měrná řezná síla se určí vztahem [24]:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot sin\varphi_i)^{1-x}} \; [MPa] \tag{3.6}$$

Kde: C_{Fc} [-] – konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu

x [-] – exponent vlivu tloušťky třísky

Po dosazení vztahu 3.6 do vztahu 3.5 a po úpravě bude vzorec pro řeznou sílu vypadat následovně [24]:

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \; [N] \tag{3.7}$$

Pro čelní frézování se řezná síla určí obdobným způsobem [24]:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot sin\kappa_r \cdot sin\varphi_i)^{1-x}} \; [MPa] \tag{3.8}$$

$$F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot sin^{(x-1)}\kappa_r \cdot \sin^x \varphi_i \; [N] \tag{3.9}$$

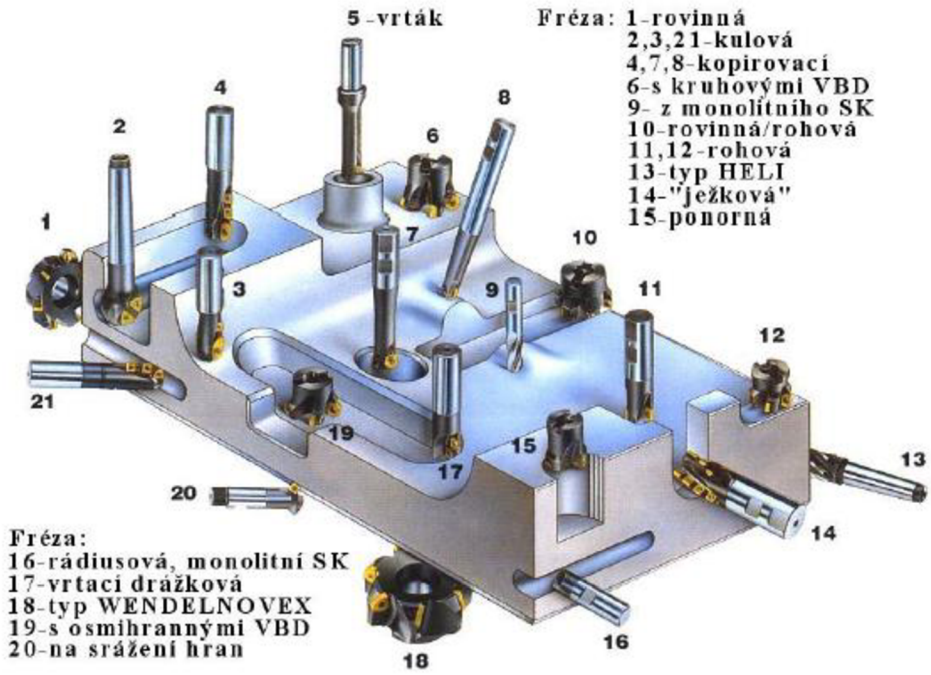
Takto se spočítají řezné síly pro všechny zuby v záběru a určí se výslednice jednotlivých sil. Počítá se většinou maximální řezná síla, kdy je nejvíce zubů v záběru a odebírají největší třísku.

3.4 Rozdělení fréz

Pro frézování jako obráběcí metodu se využívá mnoho druhů frézovacích nástrojů. Frézy se v závislosti na jejich technologickém uplatnění dělí dle těchto hledisek [23,24,27]:

- Dle umístění zubů na tělese nástroje se frézy dělí na válcové, čelní a válcové čelní frézy.
- Dle nástrojového materiálu zubů se rozlišují frézy z rychlořezné oceli, slinutých karbidů, cermetů, řezné keramiky, KNB a PKD.
- Dle směru zubů vzhledem k ose rotace se frézy dělí na frézy s přímými zuby a zuby ve šroubovici, pravé nebo levé. Zuby ve šroubovici vnikají do záběru postupně, takže řezný proces je plynulý a klidnější.
- Dle počtu zubů se frézy dělí na jemnozubé a hrubozubé frézy. Pro klidný chod frézy má být počet zubů takový, aby současně řezaly nejméně dva zuby.
- Dle konstrukčního uspořádání frézy dělíme na celistvé (těleso i zuby jsou z jednoho materiálu – rychlořezná ocel, nebo slinutý karbid), s vloženými noži (v dnešní době nejsou moc používané) a na frézy s vyměnitelnými destičkami.
- Dle geometrického uspořádání se rozlišují frézy válcové, kotoučové, úhlové, drážkovací, kopírovací, rádiusové, tvarové atd.
- Dle způsobu upnutí se frézy dělí na nástrčné a stopkové frézy.
- Dle smyslu otáčení při pohledu z vřetene se frézy dělí na pravořezné a levořezné.

Na trhu existuje velké množství výrobců frézovacích nástrojů (obr. 3.7) s bohatým výběrem pro jakýkoli frézovací úkon. Těmito výrobci jsou například: Kennametal-Widia, Mitsubishi, Pramet Tools, Sandvik Coromant, Seco, Walter a spousta dalších.



Obr. 3.7 Frézy firmy Walter. [24,27]

3.5 Frézovací stroje

Frézovací stroje – frézky jsou vyráběny a dodávány ve velkém počtu modelů a velikostí, často pak s rozsáhlým zvláštním příslušenstvím. Zpravidla se člení do čtyř základních skupin – konzolové, stolové, rovinné a speciální. Z hlediska řízení pracovního cyklu se rozlišují frézky ovládané ručně a řízené programově (CNC). [23,24,27]

Velikost frézky určuje šířka upínací plochy stolu a velikost kužele ve vřetenu pro upnutí nástroje. Dalšími důležitými technickými parametry jsou maximální délky pohybu pracovního stolu nebo vřeteníku, rozsah otáček vřetena a posuvů, výkon elektromotorů atd. [23,24]

V dnešní době se hodně využívají tzv. obráběcí centra, schopná provádět soustružení, vrtání a frézování a to i v pěti osách.

3.6 Chlazení při obrábění

Fyzikální a chemické vlastnosti prostředí, ve kterém probíhá řezný proces, mohou významně ovlivnit primární a sekundární plastickou deformaci třísky, teplotu řezání a řezný odpor, trvanlivost nástroje, přesnost a jakost obrobené plochy. Vhodným řezným prostředím lze obvykle zvýšit hospodárný úběr o 50 až 200% v porovnání s prací za sucha. Řezné prostředí vytvářejí nejčastěji kapaliny, procesní plasty, olejová mlha nebo plyn. [28]

Řezné kapaliny mají chladící, mazací a čistící vlastnosti. Dále také chrání obrobek proti korozi a snižují vibrace při obrábění. [28] Některé obráběcí operace vyžadují chlazení a mazání a u některých operací je naopak nežádoucí. Obecně je snaha chlazení a mazání omezovat z důvodu ekologičnosti.

4 CAD/CAM TECHNOLOGIE

CAD/CAM technologie jsou jedněmi z mnoha skupin spadajících do CAx technologií, tedy počítačově podporovaných. V těchto technologiích můžeme nalézt např. konstruování, řízení výroby, kontrolu kvality, plánování výroby atd. Tyto a další technologie spadají do jednoho velkého celku – PLM (product lifecycle management), v překladu správa životního cyklu výrobku.

4.1 CAD technologie

CAD – Computer aided design (počítačově podporovaná konstrukce). CAD systémy byly vyvinuty ve snaze zvýšit produktivitu práce konstruktérů zautomatizováním zdlouhavých a opakujících se aspektů konstrukce. Také pro navýšení preciznosti navrhovaných modelů. CAD umožňuje konstruktérovi řešit úlohy rychleji a přesněji, nežli jakýmkoli jiným způsobem.

Na trhu existuje velké množství CAD softwarů. Nejjednodušší a nejlevnější jsou softwary pracující pouze ve 2D – kreslení výkresů. Mezi nejznámější 2D CAD software patří AutoCAD. Některé tyto 2D softwary jsou schopné vytvořit i jednoduchý drátový 3D model. Další řadou CAD softwarů jsou ty, co dokáží vytvořit složitý plošný nebo objemový 3D model, jeho vizualizaci, dále výkresy na základě vytvořeného modelu a možnost vytváření sestav z jednotlivě vytvořených dílů. Mezi nejznámější 3D CAD modelátory patří Autodesk Inventor a SolidWorks. Nejvyšší řadou jsou takzvané CAx softwary, které neobsahují pouze CAD, ale také CAM apod. Tyto softwary jsou modulární a zákazník si může objednat jednotlivé funkce softwaru. Mezi nejznámější CAx softwary patří Catia, Pro/E a NX.

Počítačová reprezentace geometrie součásti pomocí softwaru se nazývá geometrický model. Geometrické modelování je prováděno třemi základními způsoby: drátové modelování, plošné modelování a objemové modelování.

Drátové modelování je nejstarší způsob tvorby modelu a je to základ pro všechny ostatní způsoby, jelikož jakékoli modelování začíná u 2D náčrtu. 3D drátové modely se stávají nepřehlednými, jakmile je součást složitější a navíc postrádají topologické informace. Výhodou těchto modelů je to, že zabírají malé množství místa na disku PC. Drátový model lze použít jako vodící dráhu pro nástroj v CAM softwarech.

U plošného modelování je těleso reprezentováno jeho plochami. Tento způsob modelování je využíván např. v automobilovém a leteckém průmyslu. Tvorba ploch může být náročná, a proto také vyžaduje dobré zkušenosti konstruktéra. Na základě plošného modelu lze vygenerovat dráhu nástroje v CAM softwarech.

Objemové modelování bylo vytvořeno pro úplnou reprezentaci modelu. Tento model je určen jeho plochami a vnitřním objemem. Takovémuto modelu je možné přiřadit materiálové vlastnosti a s nimi dále pracovat v pevnostních analýzách apod. Tento model umožňuje v CAM softwarech určit polotovar – objem, který je nutné odebrat k vytvoření konečného tvaru obrobku.

Výstupem všech CAD softwarů jsou elektronická data, se kterými se dá dále pracovat v CAx softwarech. Přenos dat mezi jednotlivými CAx softwary se provádí buď přímo, nebo pomocí výměnných formátů vytvořených přímo CAD softwarem, nebo externím překladačem.

4.2 CAM technologie

CAM – Computer aided manufacturing (počítačově podporovaná výroba). CAM softwary slouží pro tvorbu programu na ovládání CNC strojů, takzvaného G kódu. Účelem těchto programů je snížení doby přípravy výroby. Ruční psaní G kódu může být někdy velmi náročné a zdlouhavé a při psaní může velmi snadno dojít k chybě. CAM softwary nám dráhu nejen spočítají, ale některé lepší softwary dokonce kontrolují kolize jednotlivých pohyblivých komponentů stroje. Nejrozšířenější oblastí pro CAM je soustružení a frézování.

CAM softwary by se daly rozdělit na 2D; 2,5D; 3D a 5-osé. 2D je záležitostí hlavně soustružení, kde se nástroj pohybuje pouze ve dvou osách, ostatní softwary jsou spíše pro frézování. 2,5D CAM frézování se používá pro vytváření jednoduchých drážek, kde nástroj zajede do určité hloubky a pak se pouze pohybuje ve dvou osách, tudíž všechny vyrobené stěny jsou svislé, nebo mají stejný sklon dle tvaru nástroje. 3D CAM frézování slouží k obrábění tvarově složitých součástí. Nástroj se zde pohybuje ve třech osách. 5-osé CAM frézování slouží pro výrobu součástí vyžadujících obrábění z různých stran, které by se musely u 3D obrábění několikrát upínat a polohovat pro kompletní obrobení. Tento způsob obrábění využívá 3 osy s přímočarým pohybem a dvě rotační osy. 5-osé frézování se rozděluje na 3+2-osé a souvislé 5-osé. U 3+2 osého obrábění se nejdříve obrobek natočí a naklopí a poté se provede 3D obrobení, kdežto u souvislého 5-osého obrábění se nástroj pohybuje ve všech pěti osách současně.

Jednotlivé CAM softwary na trhu se liší v počtu nabízených obráběcích strategiích, v možnostech upravovat dráhu nástroje, v kontrolování kolizí apod. (pro kontrolování kolizí je nutné mít možnost do softwaru importovat celý stroj, nástroj, obrobek a upínače). Samozřejmě čím více možností CAM software nabízí, tím je také dražší.

5 TVORBA MODELU LOPATKOVÉHO KOLA

Lopatková kola byla vytvořena v programu Catia V5R20 od francouzské společnosti Dassault Systemes. Lopatková kola nebyla nijak počítána a nejsou určena pro praktické využití, účel tvorby modelů je pro práci s CAM softwarem.

Pro ukázku modelování a následné obrábění bylo vybráno odstředivé lopatkové kolo s mezilopatkami (viz. Obr. 1.6 a), jako klasický představitel pro pěti-osé obrábění. Pro modelování kola byla limitující materiálová vybavenost dílen VUT FSI kvůli možné výrobě kola. Polotovarem pro kolo je duralová tyč o průměru 110 mm.

5.1 Společnost Dassault Systemes

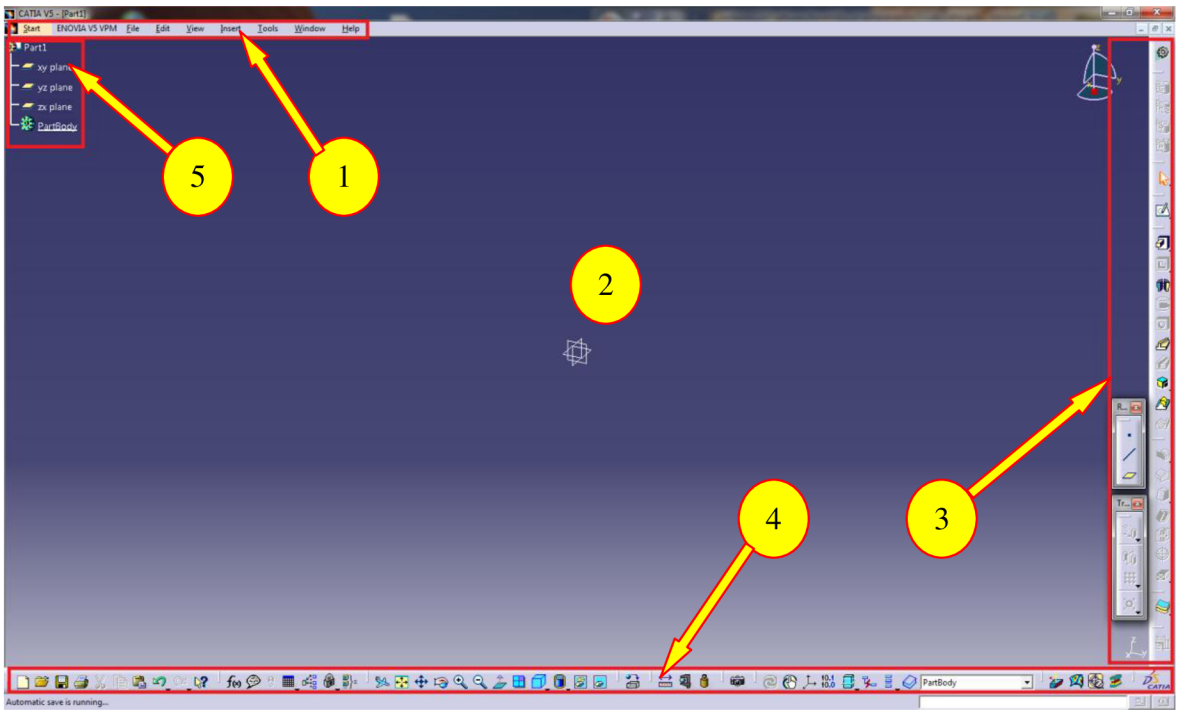
Dassault Systemes, společnost 3DEXPERIENCE, poskytuje firmám a lidem virtuální světy pro naleznutí inovací ohleduplných vůči životnímu prostředí. Její platforma 3DEXPERIENCE využívá špičkové 3D softwarové aplikace společnosti ke změně způsobu, jakým jsou navrhovány, vyráběny a podporovány výrobky a umožňuje tak firmám uspokojit zákazníky. [29]

Firma nabízí aplikace, jako jsou nejlepší návrhářské a konstrukční softwarové produkty ve třídách CAD, modelování, simulace konečných prvků atd. Firma nabízí také služby jako je poradenství pro podnikový proces správy životního cyklu výrobku, podnikové vzdělávání apod. [29]

Nejznámějšími produkty této firmy mohou být CAD softwary SolidWorks a Catia.

5.2 Modelování lopatkového kola

Po poklepání na ikonu Catie se otevře základní okno, kde se pro vytvoření nového dílu (obr. 5.1) klepne na ikonu File, dále New → Part → Ok. V následujícím okně se vyplní název dílu a potvrdí se tlačítkem Ok.



Obr. 5.1 Pracovní prostředí softwaru Catia V5R20.

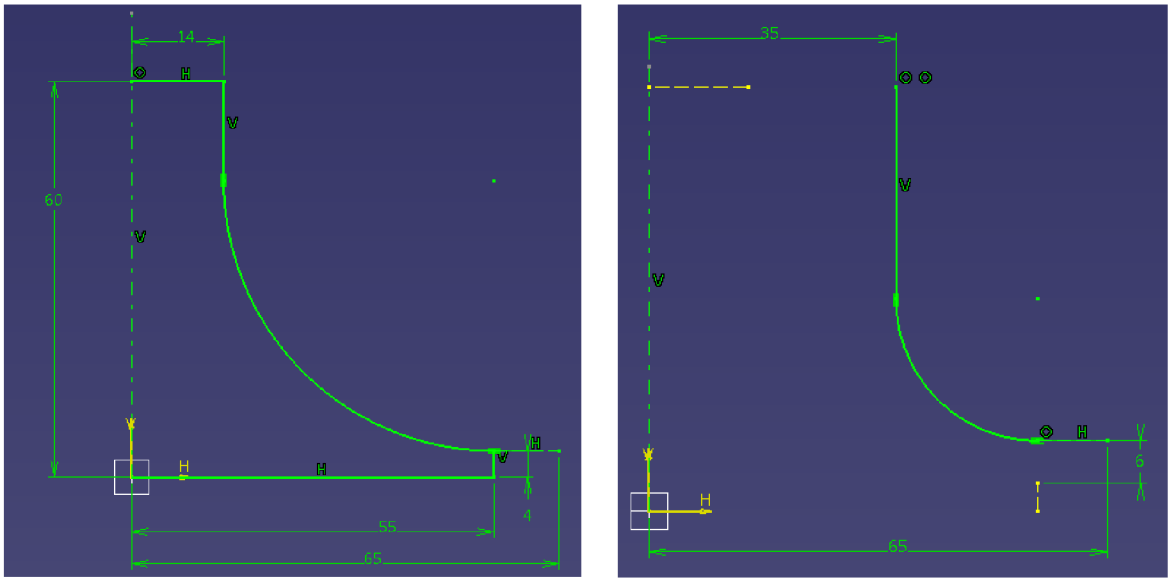
Vysvětlivky:

1. Hlavní panel nástrojů.
2. Pracovní prostor – tvorba a vizualizace modelu.
3. Prvky pro tvorbu modelu.
4. Panel vizualizačních nástrojů.
5. Strom historie vzniku modelu.

V prvním kroku modelování byly vytvořeny lopatky (se ztenčujícím se profilem od středu lopatkového kola směrem ven). Lopatky byly vytvářeny pomocí plošného modelování. Pro plošné modelování je v Catii nutné klepnout na ikonu Start → Shape → Generative Shape Design. Po zapnutí tohoto modulu se na pravé straně v okně softwaru zobrazí prvky pro tvorbu ploch. Po zapnutí modulu pro tvorbu ploch se do stromu historie vzniku modelu vložil Geometrický set klepnutím na ikonu Insert → Geometrical set. Tento set bude obsahovat všechny prvky plošného modelování.

Pro určení tvaru lopatek byl v první řadě vytvořen střed lopatkového kola a poté jeho vnější tvar. Pro vytvoření středu lopatkového kola byla založena skica (Sketch) v rovině YZ a dále nakreslen obrys středu (obr. 5.2 a). To samé pak pro obal lopatkového kola (obr. 5.2 b).

Všechny komponenty skici je nutné zakótovat a případně je zavazbit geometrickými vazbami (plně zavazbená komponenta se pozná zelenou barvou).



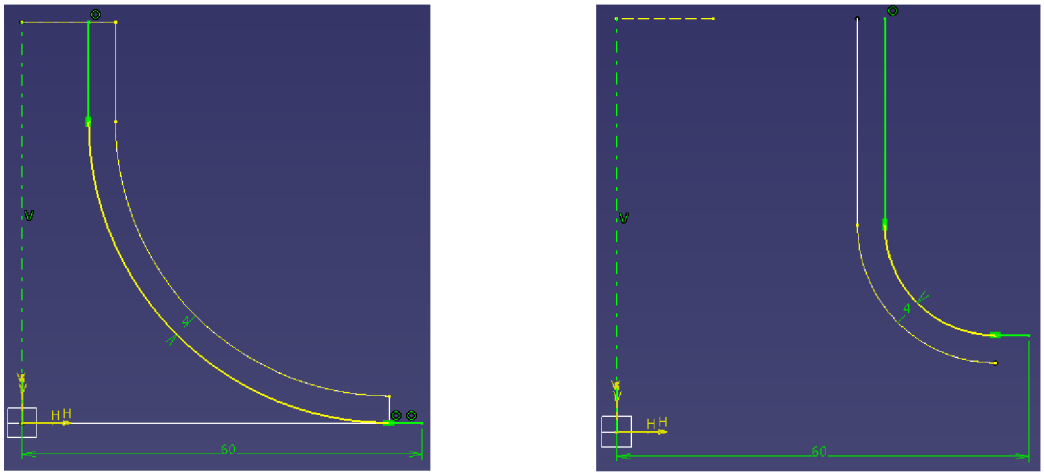
a) b)

Obr. 5.2 a) Náčrt středu lopatkového kola. b) Náčrt vnějšího tvaru lopatkového kola.

Pro vytvoření vnějšího tvaru kola bylo použito pár prvků ze skici středu kola, tyto prvky se poznají žlutou barvou.

V dalším kroku byly na základě těchto dvou skic vytvořeny dvě nové skici, kde jsou náčrty pouze odsazeny (offset) - u středu kola směrem k ose (obr. 5.3 a) a u vnějšího tvaru zase směrem od osy (obr. 5.3 b). Tento krok byl proveden proto, aby vytvářené lopatky byly

větší, než budou v konečném stavu, jelikož je obecně vždy lepší a jednodušší vytvořenou plochu ořezávat, nežli prodlužovat.

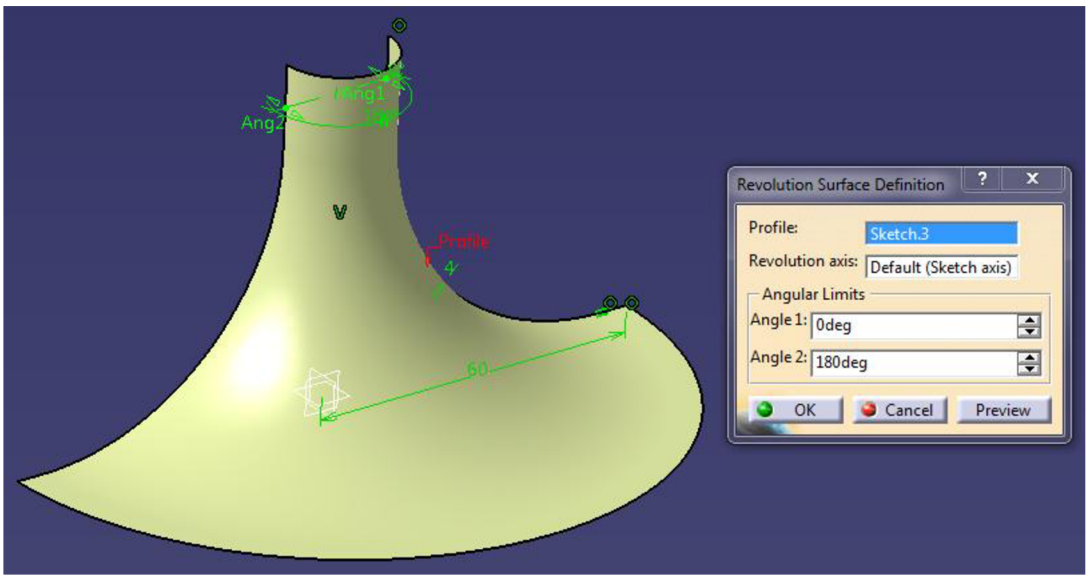


a) b)

Obr. 5.3 a) Offset středu kola. b) Offset vnějšího tvaru kola.

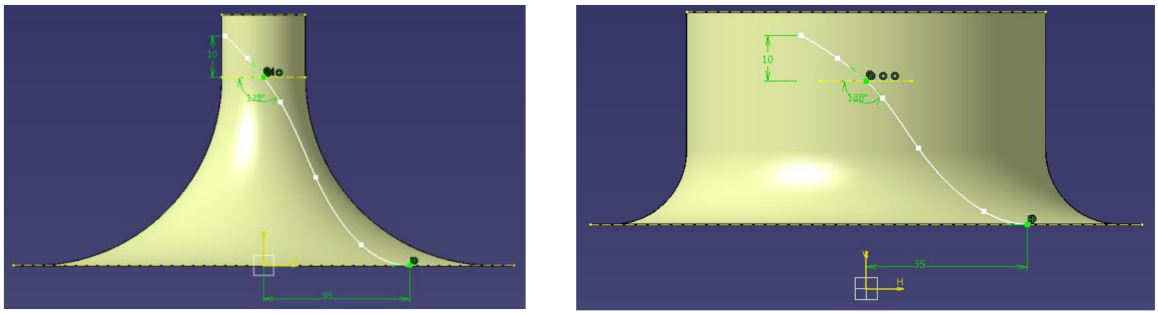
Bílé čáry na obrázku 5.3 znázorňují skici z obrázku 5.2, podle kterých byl offset proveden.

Obě tyto vytvořené skici byly poté orotovány dle osy rotace kola pomocí ikony Revolve. Pro další modelování postačilo orotování pouze v rozmezí 0 - 180° (obr. 5.4).



Obr. 5.4 Orotování offsetu středu kola.

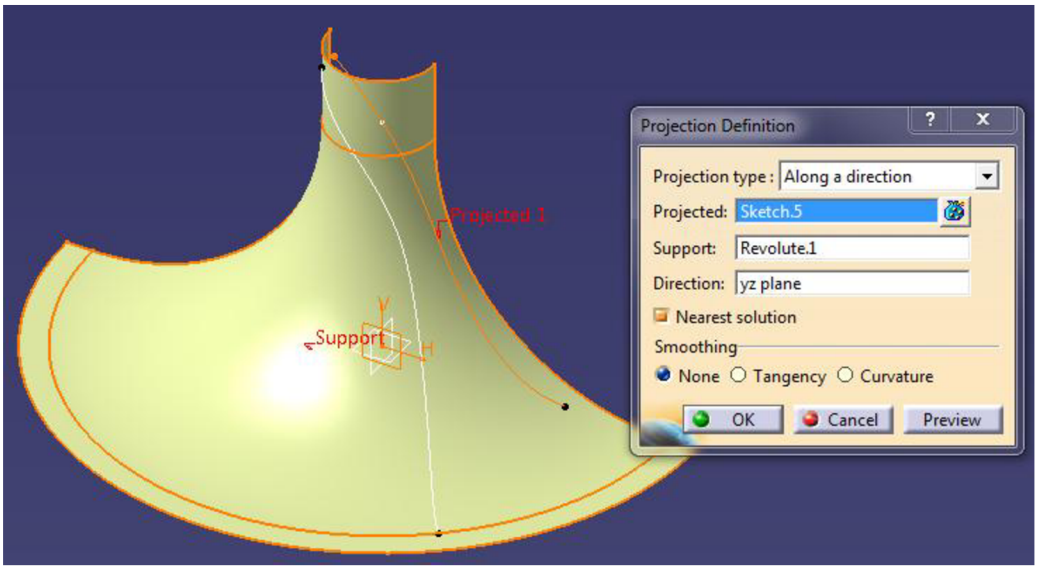
V následujícím kroku byla vytvořena skica v rovině YZ, ve které byl pomocí spline křivky nakreslen tvar lopatky na středu lopatkového kola (obr. 5.5 a). Stejný úkon byl proveden i pro tvar lopatky na ploše vnějšího tvaru kola (obr. 5.5 b).



a) b)

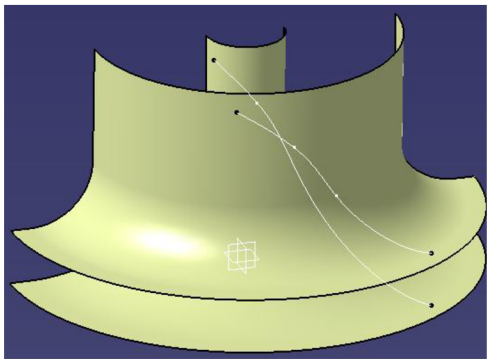
Obr. 5.5 a) Tvar lopatky na offsetu středu kola. b) Tvar lopatky na offsetu vnější plochy kola.

Tyto vytvořené křivky byly dále pomocí příkazu Projection promítnuty na danou plochu kolmo od roviny náčrtu - YZ (obr. 5.6).



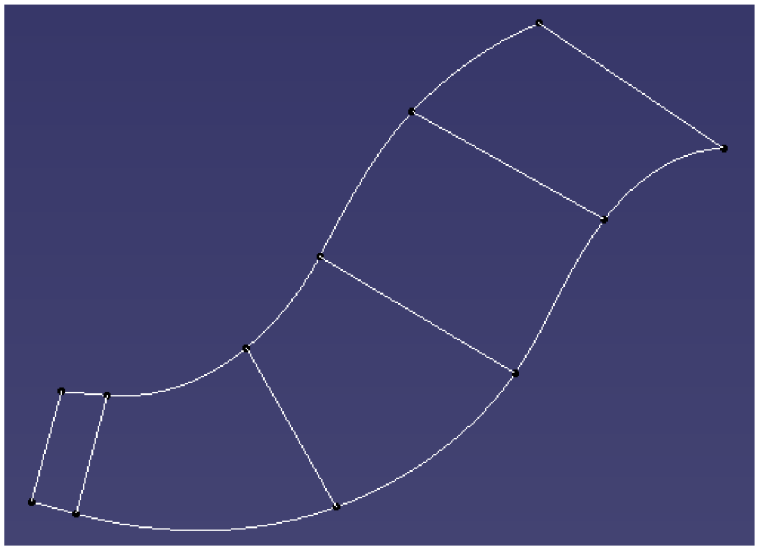
Obr. 5.6 Promítnutí křivky na offset středové plochy kola.

Promítnutím těchto 2D křivek na vytvořené plochy vznikly dvě prostorové křivky utvářející hrany lopatky (obr. 5.7).



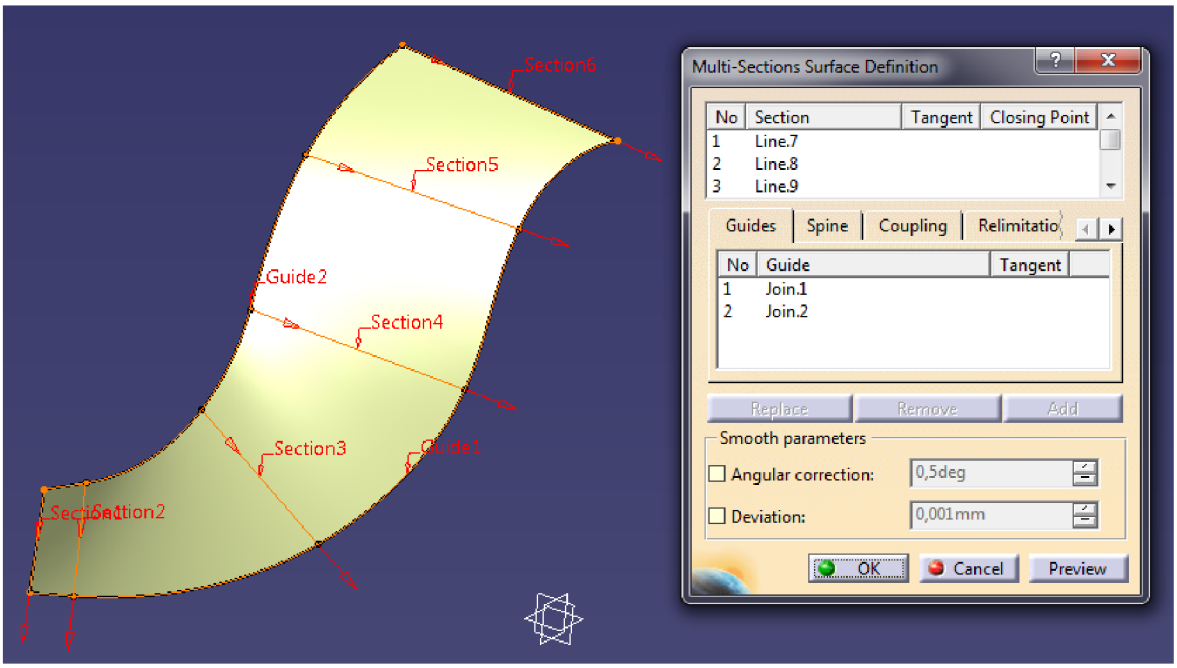
Obr. 5.7 Promítnuté křivky na plochy.

Tyto dvě křivky byly dále spojeny úsečkami v jejich koncových bodech a v různých bodech mezi nimi (obr. 5.8)



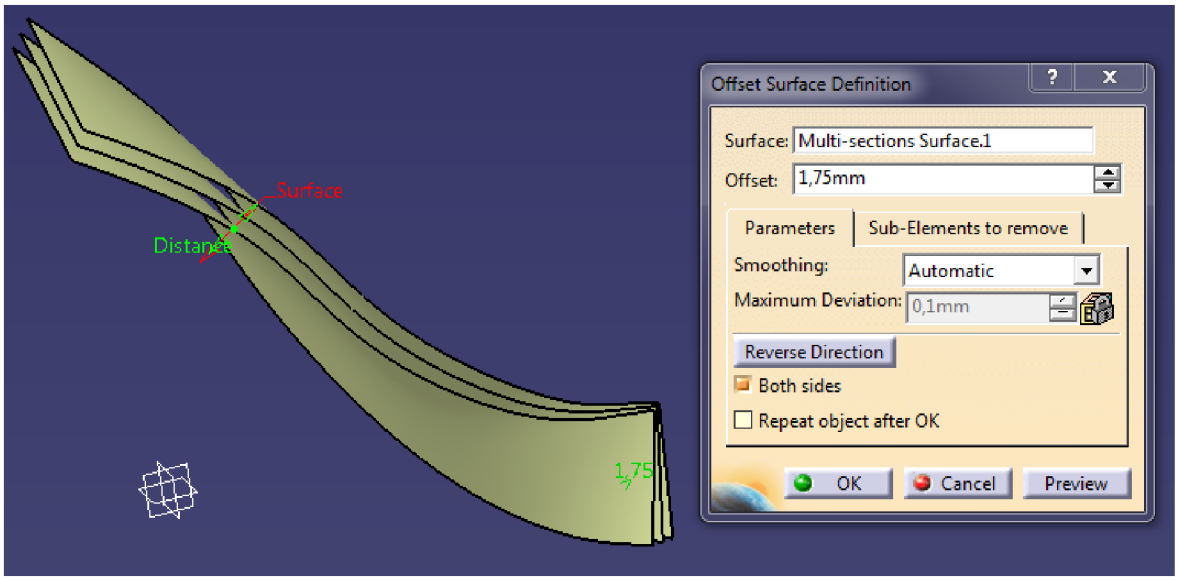
Obr. 5.8 Kostra lopatky.

Takto vytvořená kostra lopatky byla dále pomocí příkazu Multi-sections Surface přetvořena na plochu (obr. 5.9). Úsečky spojující křivky hran lopatky posloužili jako profily spojování a samotné křivky jako vodící křivky.



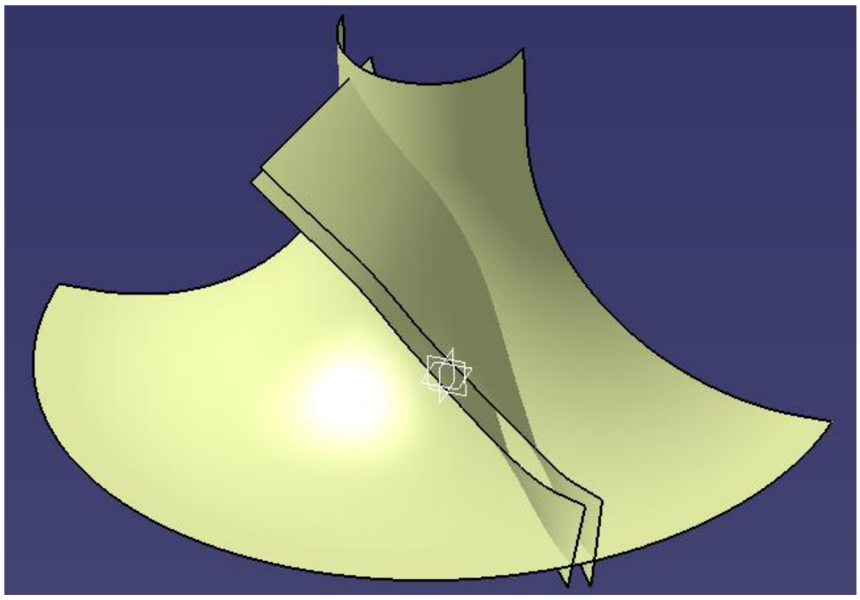
Obr. 5.9 Tvar lopatky tvořen plochou spojovaných profilů.

Pomocí příkazu Offset byla plocha z obrázku 5.9 odsazena na obě strany o 1,75 mm (obr. 5.10).



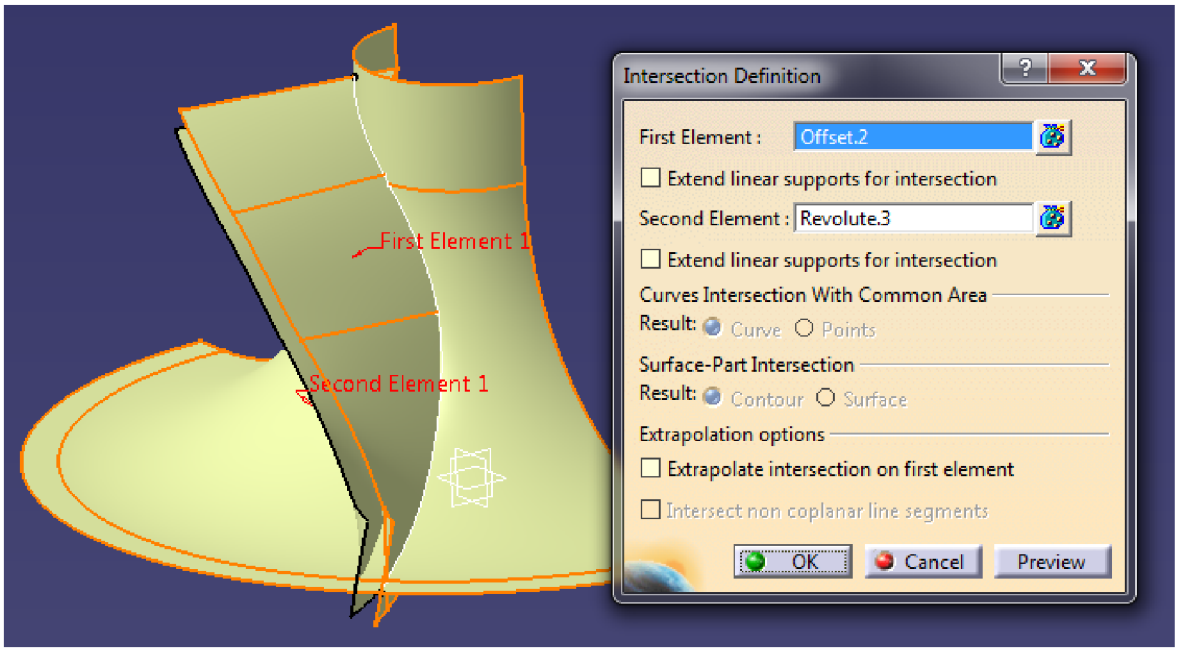
Obr. 5.10 Offset plochy.

Po odsazení plochy byla použita část skici z obrázku 5.2 a, tedy konečný tvar středu lopatkového kola. Tato část skici byla orotována, stejně jako odsazená skica na obrázku 5.4. Výsledná plocha protíná offsety plochy lopatky (obr. 5.11).



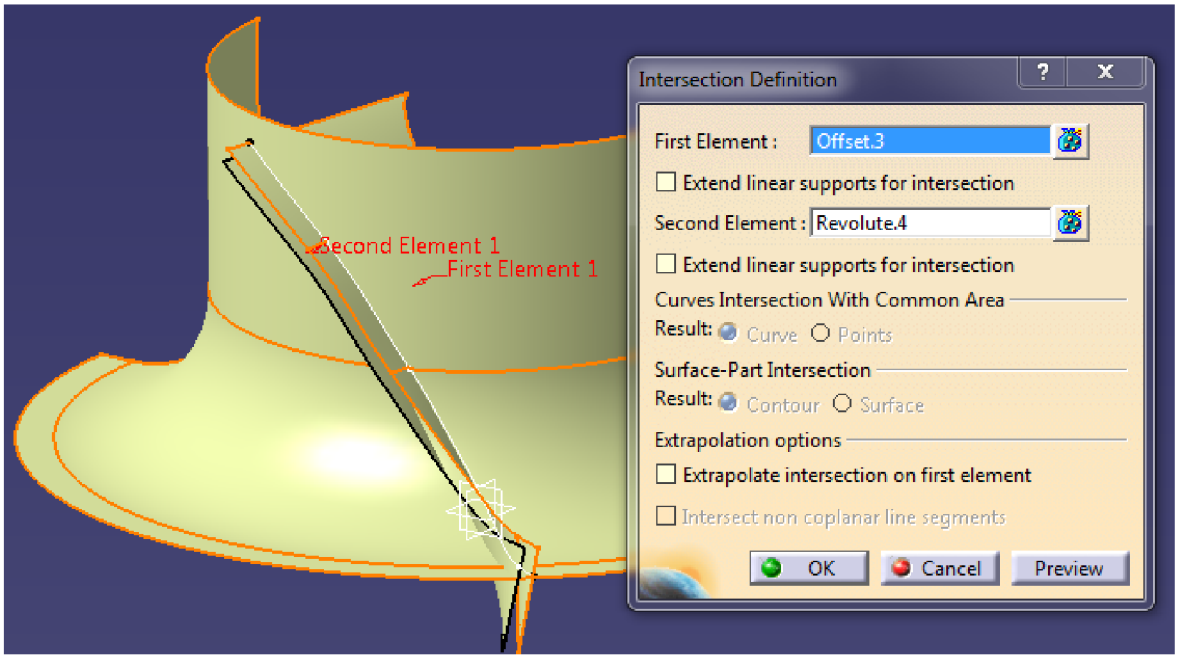
Obr. 5.11 Konečná plocha středu kola s offsety plochy lopatky.

Následujícím krokem bylo vytvoření křivek z protínajících se ploch. Tato křivka byla vytvořena pomocí příkazu Intersection (obr. 5.12). Křivka byla vytvořena pro obě plochy offsetu lopatky. Pro vytvoření první křivky byla vybrána jedna ze dvou ploch offsetu lopatky a plocha středu kola. Pro druhou křivku byla vybrána druhá plocha offsetu lopatky a střed kola. Takto vznikly dvě samostatné křivky ležící na ploše středu kola.



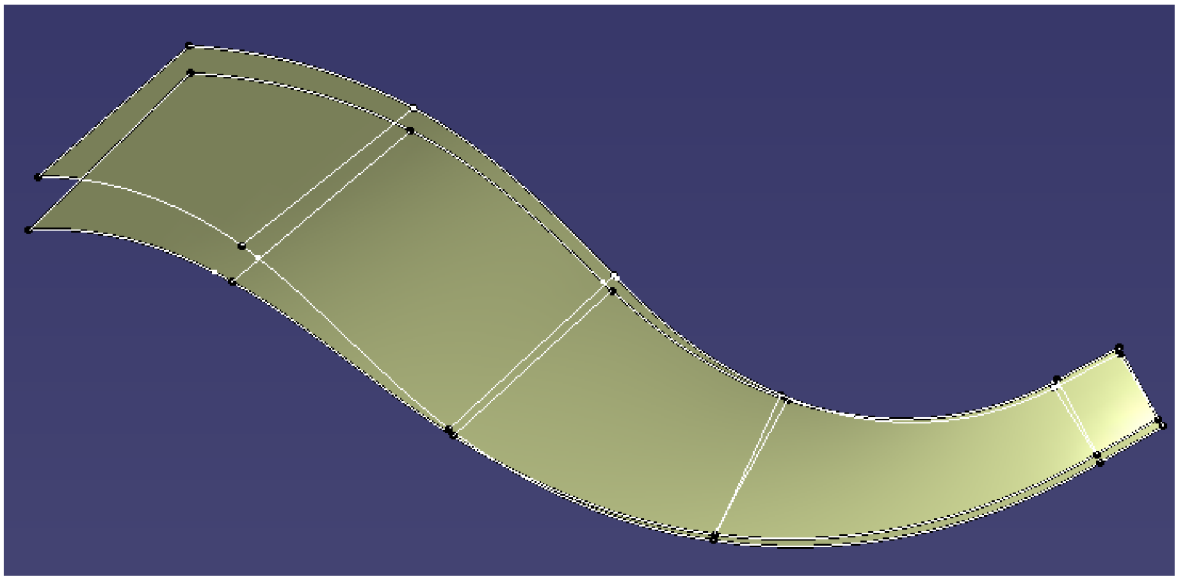
Obr. 5.12 Tvorba křivky z protínajících se ploch na středu kola.

Po vytvoření dvou křivek na středu kola byly vytvořeny další dvě křivky na obalové ploše. Pro vytvoření těchto křivek byl znovu proveden offset plochy lopatky z obrázku 5.10 s tím rozdílem, že offsetová vzdálenost byla nastavena na 1 mm na obě strany. Dále byla vytvořena obalová plocha lopatkového kola orotováním skici na obrázku 5.3 b, tedy konečného tvaru obalové plochy kola. Na závěr byla opět provedena tvorba křivek z protínajících se ploch offsetů plochy lopatky a plochy obalu kola (obr. 5.13).



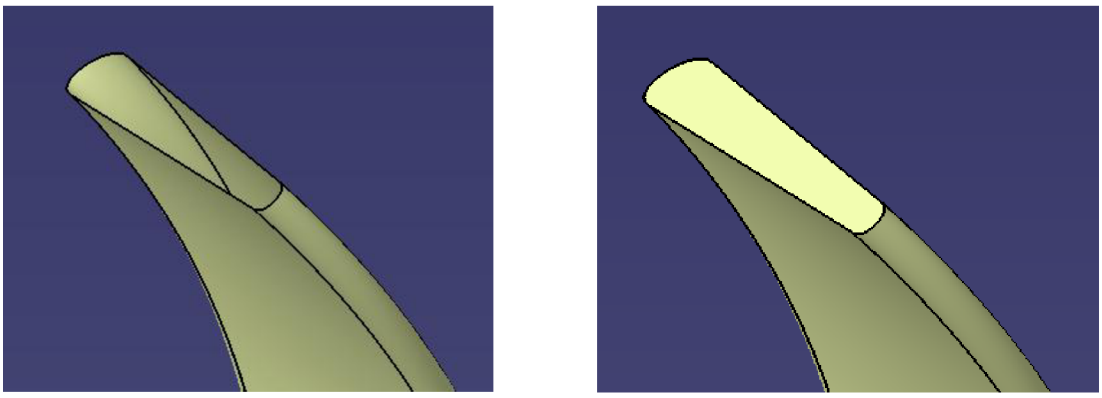
Obr. 5.13 Tvorba křivky z protínajících se ploch na obalové ploše kola.

Takto byly vytvořeny čtyři hrany konečné lopatky. Pro vytvoření bočních stěn lopatky byl použit stejný postup ukázaný na obrázku 5.8 – hrany levé stěny lopatky byly spojeny úsečkami v koncových bodech a v různých bodech mezi nimi, to samé bylo provedeno i pro hrany pravé stěny lopatky. Tyto kostry bočních stěn lopatky byly převedeny na plochy (obr. 5.14) stejně jako kostra lopatky na obrázku 5.9.



Obr. 5.14 Plochy bočních stěn lopatky se zužujícím se profilem od středu kola.

Následně byly tyto dvě plochy spojeny pro vytvoření jednolité plochy lopatky. Nejdříve byly spojeny hrany lopatky na středu a obalu kola pomocí příkazu Blend (obr. 5.15 a). Pro vytvoření spojení ploch pomocí příkazu Blend byla nejdříve vybrána hrana a plocha jedné boční stěny lopatky a poté i druhé. Po spojení hran lopatky na středu a obalu kola byly spojeny zbývající hrany pomocí příkazu Fill (obr. 5.15 b). Pro provedení příkazu Fill byly vybrány hrany, mezi kterými bylo nutné plochu vytvořit.

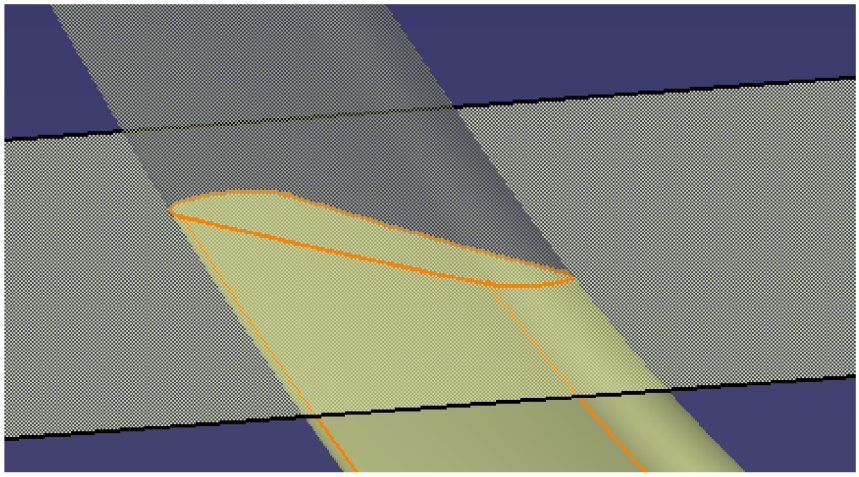


a) b)

Obr. 5.15 a) Spojení bočních stěn lopatky příkazem Blend. b) Spojení zbývajících hran příkazem Fill.

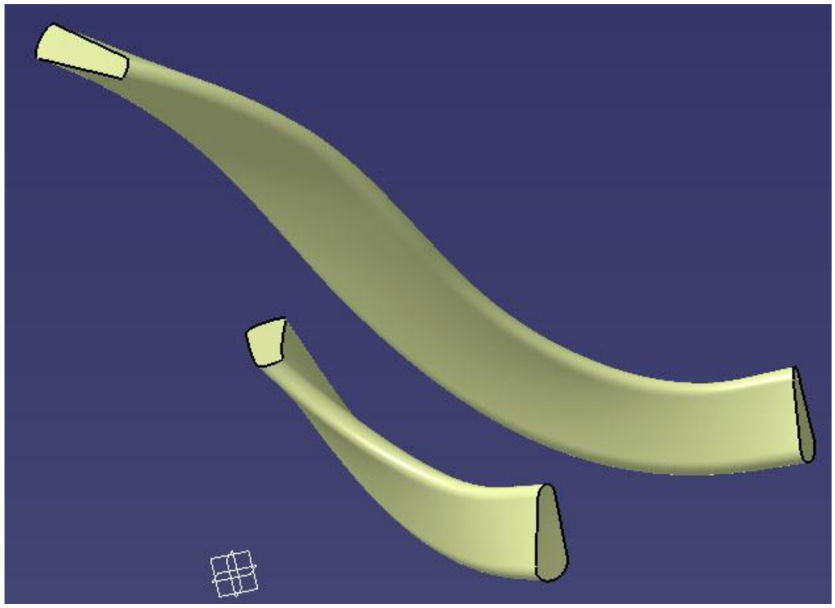
Pro vytvoření jednolité plochy lopatky byl dále použit příkaz Join pro spojení všech jednotlivých ploch lopatky v jednu celistvou plochu.

Následovalo vytvoření mezilopatky. Nejdříve byl vytvořen náčrt v rovině YZ, kde byla načrtnuta pouze jedna úsečka kolmá na osu Z a vzdálená 25 mm od osy Y. Tato úsečka byla dále pomocí příkazu Extrude vytažena na rovinnou plochu protínající plochu lopatky. Touto plochou byla následovně odříznuta horní část lopatky příkazem Trim (obr. 5.16).



Obr. 5.16 Tvorba mezilopatky.

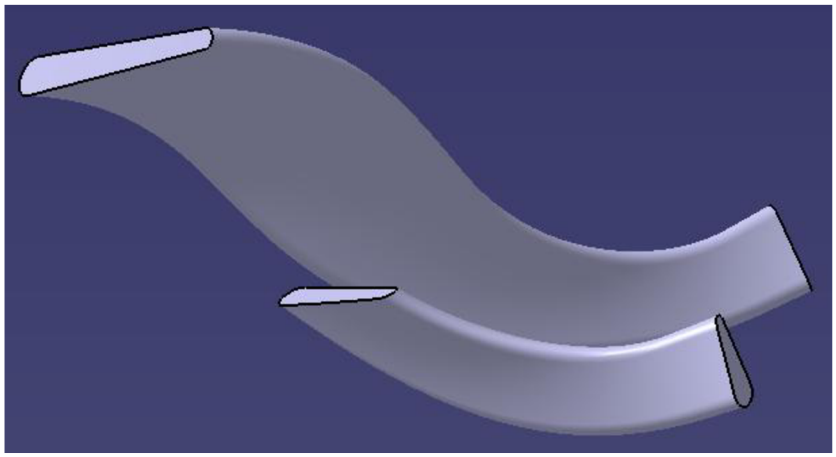
Posledním krokem ve tvorbě lopatek bylo vytvoření celistvé lopatky. Tato lopatka byla vytvořena posunutím celistvé plochy lopatky (ve stromu historie vzniku modelu byla vybrána celistvá lopatka před vytvořením mezilopatky, tedy neořezaná rovinnou plochou z obrázku 5.16) příkazem Rotate okolo osy Z o 36°. Tímto vznikla samostatná celistvá lopatka vedle mezilopatky (obr. 5.17).



Obr. 5.17 Hotové lopatky.

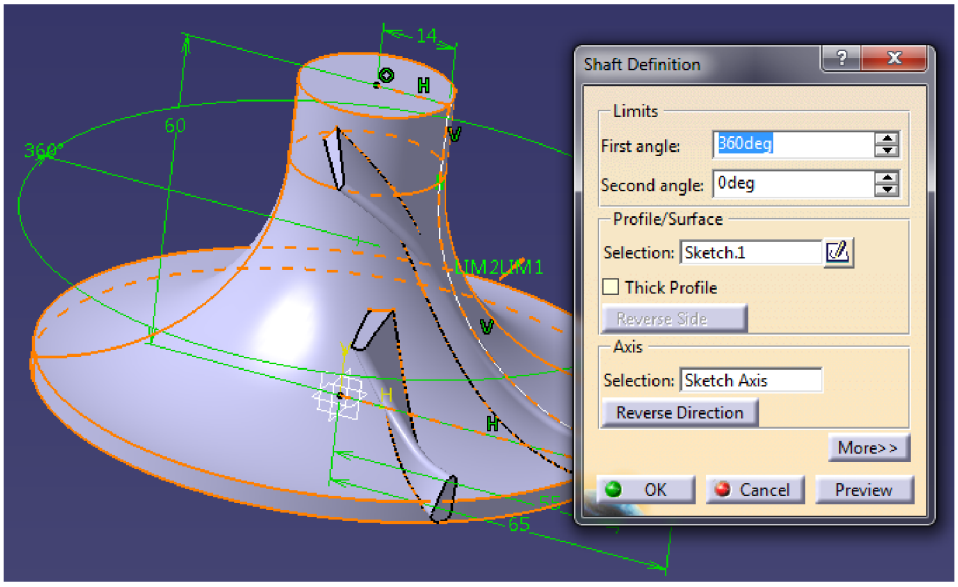
Po zhotovení ploch lopatek bylo pracováno v oblasti objemového modelování. Modul objemového modelování byl zapnut příkazem Start → Mechanical Design → Part Design. Do stromové struktury modelu byl vložen set Body příkazem Insert → Body. Tento set bude obsahovat všechny prvky objemového modelování.

V prvním kroku byl z ploch lopatek vytvořen objem příkazem Close Surface. Tento příkaz je možné použít pouze na uzavřené a celistvé plochy. Po klepnutí na tento příkaz byla vybrána plocha lopatky či mezilopatky a vnitřní prostor uzavřené plochy byl vyplněn objemem (obr. 5.18).



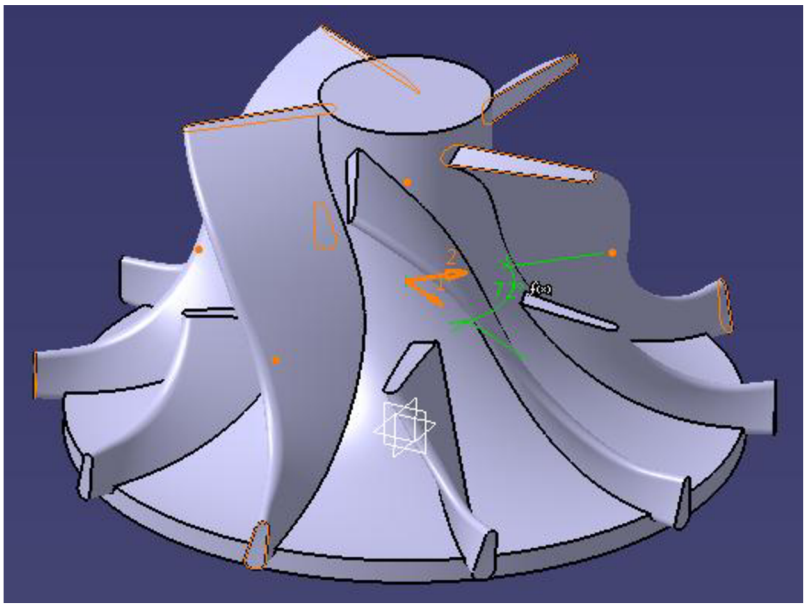
Obr. 5.18 Objemové modely lopatek.

Následným krokem bylo vytvoření středu kola. Střed kola byl vytvořen orotováním skici z obrázku 5.2 okolo osy Z příkazem Shaft. Orotování bylo provedeno o celých 360° (obr. 5.19).



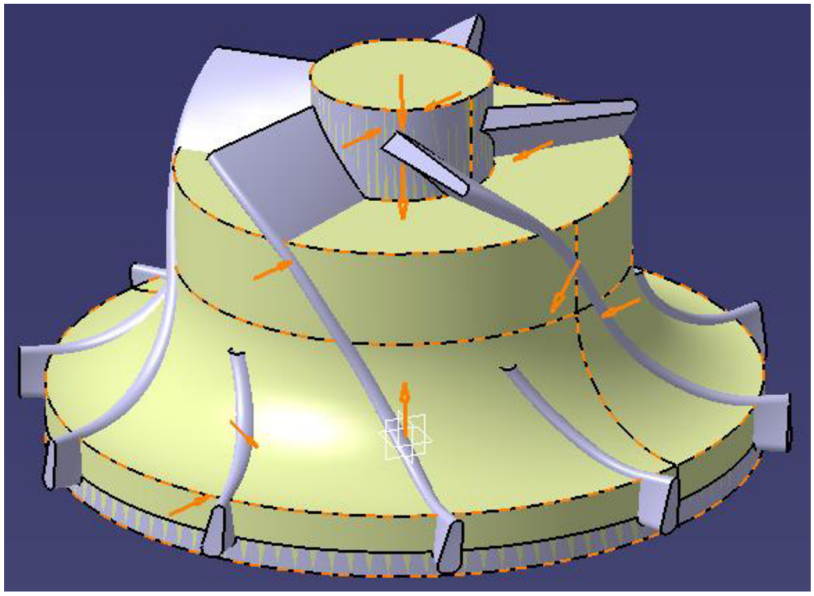
Obr. 5.19 Tvorba středu lopatkového kola.

Po vytvoření středu kola byly lopatky zkopírovány okolo osy Z příkazem Circural Pattern. Lopatky byly zkopírovány souměrně tak, aby jich bylo po obvodě celkově pět, tedy jsou rozmístěny po úhlu 72° (obr. 5.20).



Obr. 5.20 Kopírování lopatek podél osy Z.

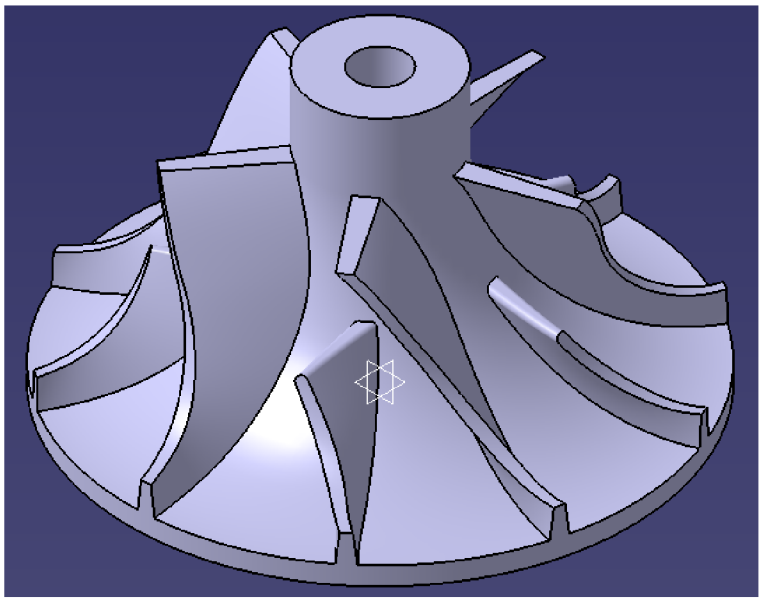
Posledním krokem v tvorbě lopatkového kola bylo ořezání vnějšího tvaru. Pro ořezání byla vytvořena skica na základě skic z obrázku 5.2. Tato skica byla dále orotována na plochu podél osy Z příkazem Revolute z modulu pro plošné modelování. Vytvořenou plochou se poté ořezal vnější tvar příkazem Split (obr 5.21).



Obr. 5.21 Ořezání vnějšího tvaru lopatkového kola.

Oranžové šipky znázorňují tu část modelu, která má být zachována.

Po ořezání vnějšího tvaru je lopatkové kolo hotové (obr. 5.22).

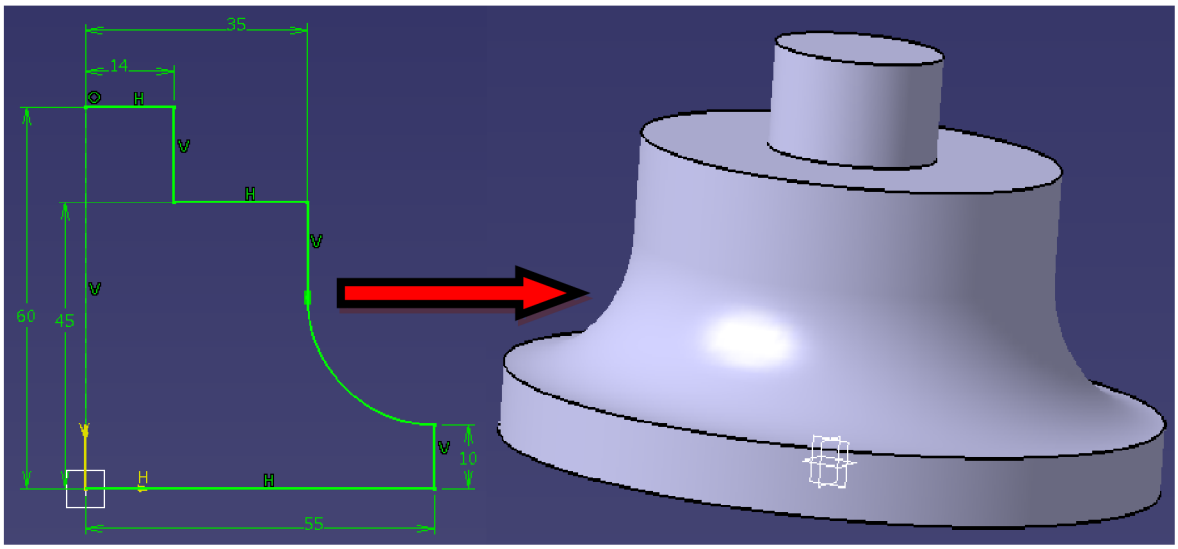


Obr. 5.22 Model odstředivého lopatkového kola.

Obrázky všech vytvořených modelů kol jsou v příloze.

5.3 Tvorba polotovaru a upínače lopatkového kola.

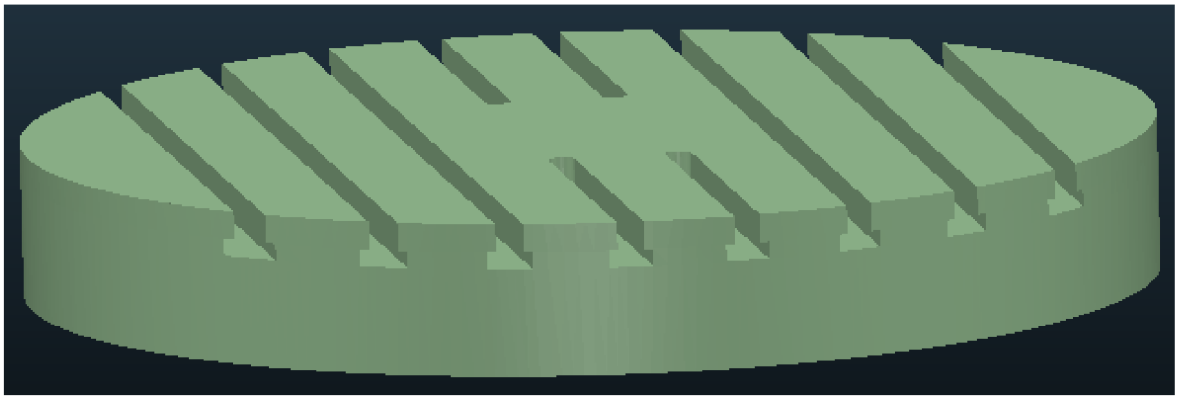
Polotovar lopatkového kola má stejný tvar jako plocha na obrázku 5.21, která byla použita pro ořezání vnějšího tvaru kola. Nebyl však vytvořen plošný model, ale objemový model pomocí příkazu Shaft (obr. 5.23).



Obr. 5.23 Polotovar lopatkového kola.

Pro tvorbu upínače byla stejně jako u lopatkového kola limitující vybavenost dílen VUT FSI. Velikost upínače také závisela na velikosti a uspořádání T-drážek obráběcího stroje. Obráběcím strojem pro lopatkové kolo bylo určeno portálové obráběcí centrum MCV 1210

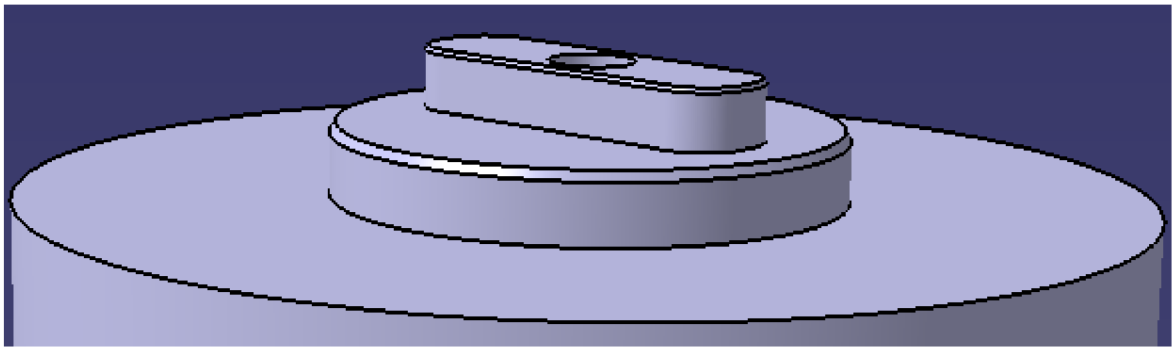
od firmy TAJMAC-ZPS (více o stroji v kapitole 6.2). Vzdálenosti mezi T-drážkami (velikost 14 H8) jsou 62,5 mm. Rozměr upínací plochy stolu je Ø 600 mm (obr. 5.24).



Obr. 5.24 Upínací stůl obráběcího centra MCV 1210.

Polotovarem pro upínač byl určen přířez z tyče o průměru 210 mm a výšce 90 mm. Materiál tohoto přířezu je ocel 12 050. Upínač byl navržen tak, aby byl tuhý a byla jednoznačně určena jeho poloha na upínacím stole obráběcího centra.

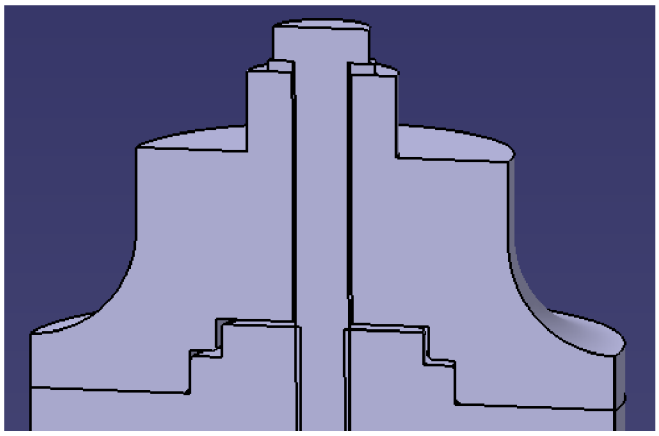
Polotovar lopatkového kola musí být upnut jednoznačně a nesmí mít žádný stupeň volnosti. Navržený způsob upnutí polotovaru je ukázán na obrázku 5.25.



Obr. 5.25 Horní část upínače pro upnutí polotovaru lopatkového kola.

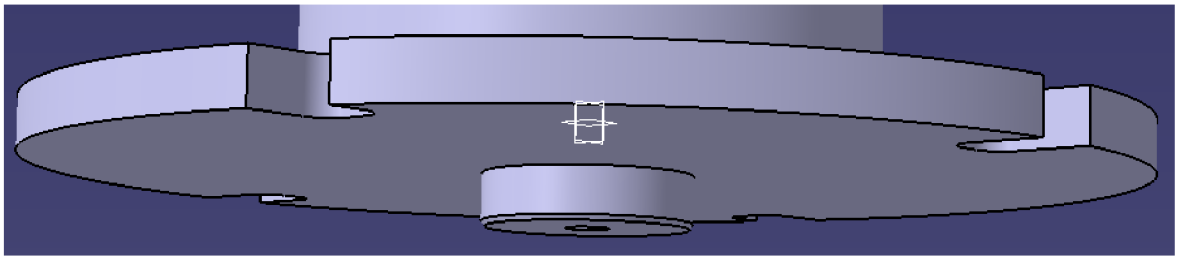
Čelní plocha největšího průměru slouží jako dosedací plocha čelní plochy polotovaru lopatkového kola. Menší průměr je určen pro přesné umístění osy polotovaru. Obdélníkový výstupek slouží proti protočení. Polotovar je dále přišroubován k upínači (obr. 5.26). Upnutí šroubem je běžnou záležitostí při obrábění lopatkových kol.

Pro určení polohy upínače na středu upínacího stolu obráběcího centra byl vytvořen na spodní straně upínače čep, který odpovídá průměru



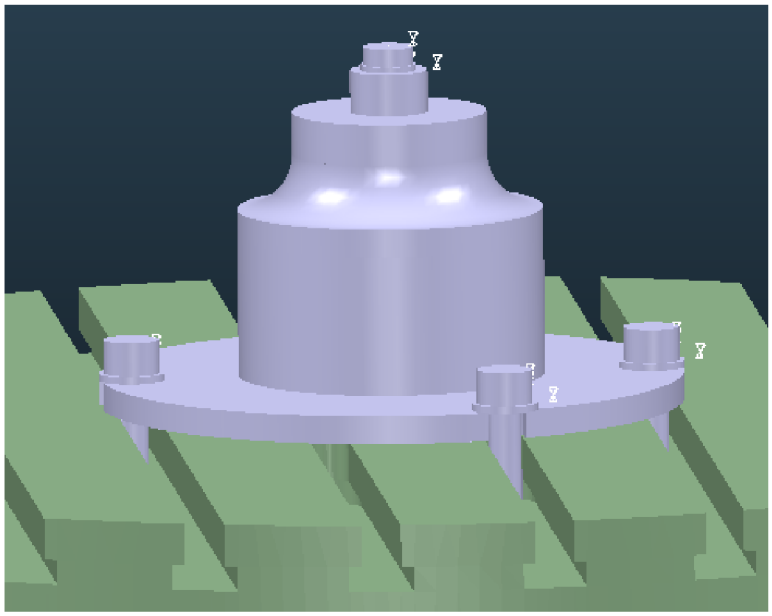
Obr. 5.26 Upnutí polotovaru lopatkového kola.

otvoru ve středu upínacího stolu. Na obvodu upínače byly dále vytvořeny drážky pro šrouby na upevnění upínače (obr. 5.27).



Obr. 5.27 Spodní část upínače pro upnutí ke stolu obráběcího centra.

Ke stolu obráběcího centra je upínač přišroubován (Obr. 5.28).



Obr. 5.28 Sestava upínače s polotovarem lopatkového kola na upínacím stole stroje.

Výkresy pro upínač a polotovar lopatkového kola jsou v příloze.

6 TVORBA DRAH PRO OBROBENÍ LOPATKOVÉHO KOLA

Tvorba drah pro obrobení lopatkového kola probíhala v programu PowerMILL od Anglické společnosti Delcam. Nástrojové a strojní vybavení odpovídá vybavení dílen VUT FSI.

6.1 Obrobitelnost hliníku

Jelikož materiálem lopatkového kola je dural, je nutné si říci něco o jeho obrobitelnosti.

Obrobitelnost je schopnost materiálu být obráběn. Obrobitelnost závisí na mnoha faktorech, jako je materiál obrobku a nástroje, geometrie břitu nástroje, obráběcí prostředí, ekonomičnost obrábění atd.

Obecně platí, že hliníkové slitiny patří mezi ostatními konstrukčními materiály mezi ty lépe obrobitelné. Například ve srovnání s ocelemi stejné pevnosti jsou řezné síly výrazně menší. Obrobitelnost čistého hliníku je velmi špatná, avšak obrobitelnost hliníkových slitin je velmi dobrá. [17]

Do nejlépe obrobitelných slitin hliníků patří slitiny obsahující Cu, Mg a Zn (tzv. duraly a superduraly). Mezi středně obrobitelné slitiny patří slitiny obsahující maximálně 5% Si. Nejhůře obrobitelné slitiny obsahují větší množství Si (až 12%) s přísadou Ni, Fe, Mn, Co, Cu a Mg. [17,28]

6.2 Obráběcí centrum MCV 1210

Portálové obráběcí centrum MCV 1210 (obr. 6.1) je vysoce produktivní stroj s širokým uplatněním při obrábění složitých prostorových tvarů ve třech nebo v pěti osách. Vzhledem k vysoké dynamice, velmi vysoké tuhosti a tlumícím vlastnostem konstrukce stroj umožňuje využití výhod HSC technologie. [30]

Veškeré pohyby stroje jsou realizovány prostřednictvím lineárního vedení s valivými elementy. Odměřování polohy v osách X, Y a Z, je prováděno přímo absolutními odměřovacími jednotkami. [30]

Obr. 6.1 Obráběcí centrum MCV 1210. [30]

6.2.1 Technická data stroje [31]

Parametry otočného stolu

- Rozměr upínací plochy stolu — Ø600 mm
- Hmotnost obrobku — max. 500 kg
- 8 T-drážek — 14 H8
- Vzdálenost mezi T-drážkami — 62,5 mm
- Rozsah osy A — +30 - 90°
- Výkon osy A — max. 5,2 kW
- Rozsah osy C — 360°
- Výkon osy C — max. 6,6 kW

Posuv v osách X, Y, Z

- Max. pracovní posuv — 20 m/min
- Rychloposuv — 40 m/min
- Přesnost polohování — 0,01 mm

Vřetenová jednotka Weiss 176

- Max. otáčky — 18 000 min^{-1}
- Upínací kužel — HSK-A63
- Krouticí moment — 80 Nm

6.3 Společnost Delcam

Delcam je jedním z vedoucích světových dodavatelů vysoce kvalitních CAD/CAM řešení. Škála softwarů Delcamu pro konstrukci, výrobu a kontrolu jakosti přináší kompletní automatizované CAD/CAM řešení pro řešení komplexních tvarů od konceptu po realitu. [32]

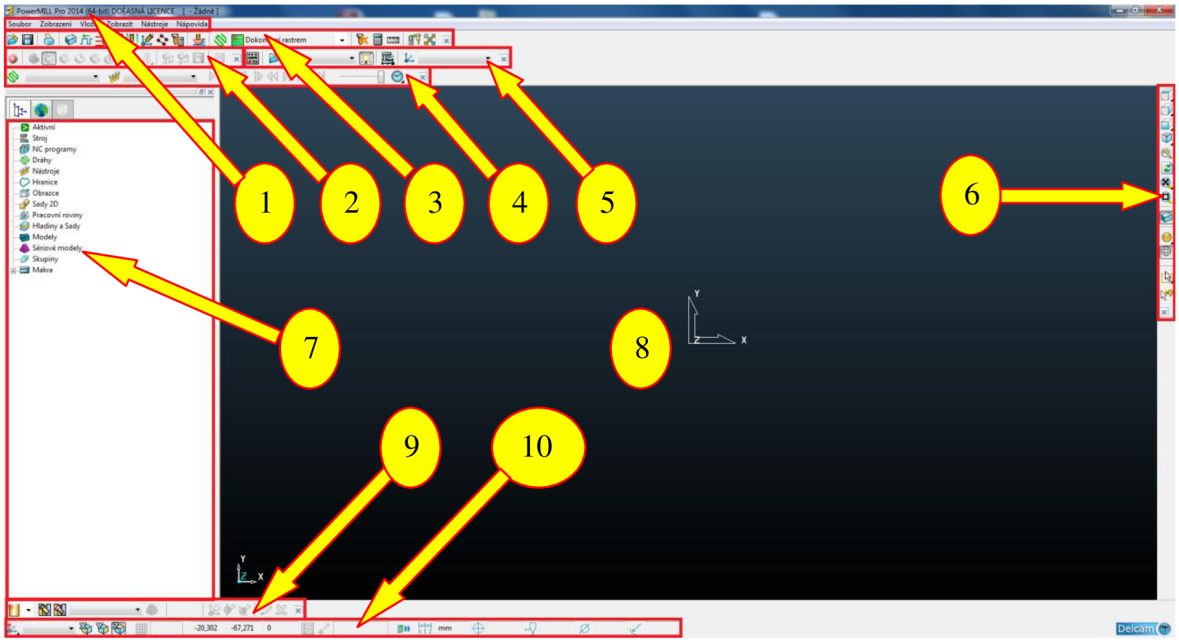
Obr. 6.2 Logo firmy Delcam. [33]

Hlavní sídlo společnosti se nachází v Anglii ve městě Birmingham. Firma byla založena roku 1977. Nyní má po světě 18 přímých poboček a více jak 800 zaměstnanců v hlavním sídle společnosti. Firma dále obdržela roku 2003, 2004 a 2010 Královské ocenění za inovace v podnikání a dále v letech 1991, 2005 a 2011 Královské ocenění za podnikání v mezinárodním obchodu. [32]

PowerMILL, produkt firmy Delcam, je špičkou mezi CNC frézovacími softwary.

6.4 Práce s programem PowerMILL

Po poklepání na ikonu programu PowerMILL se otevře pracovní okno (obr. 6.3).



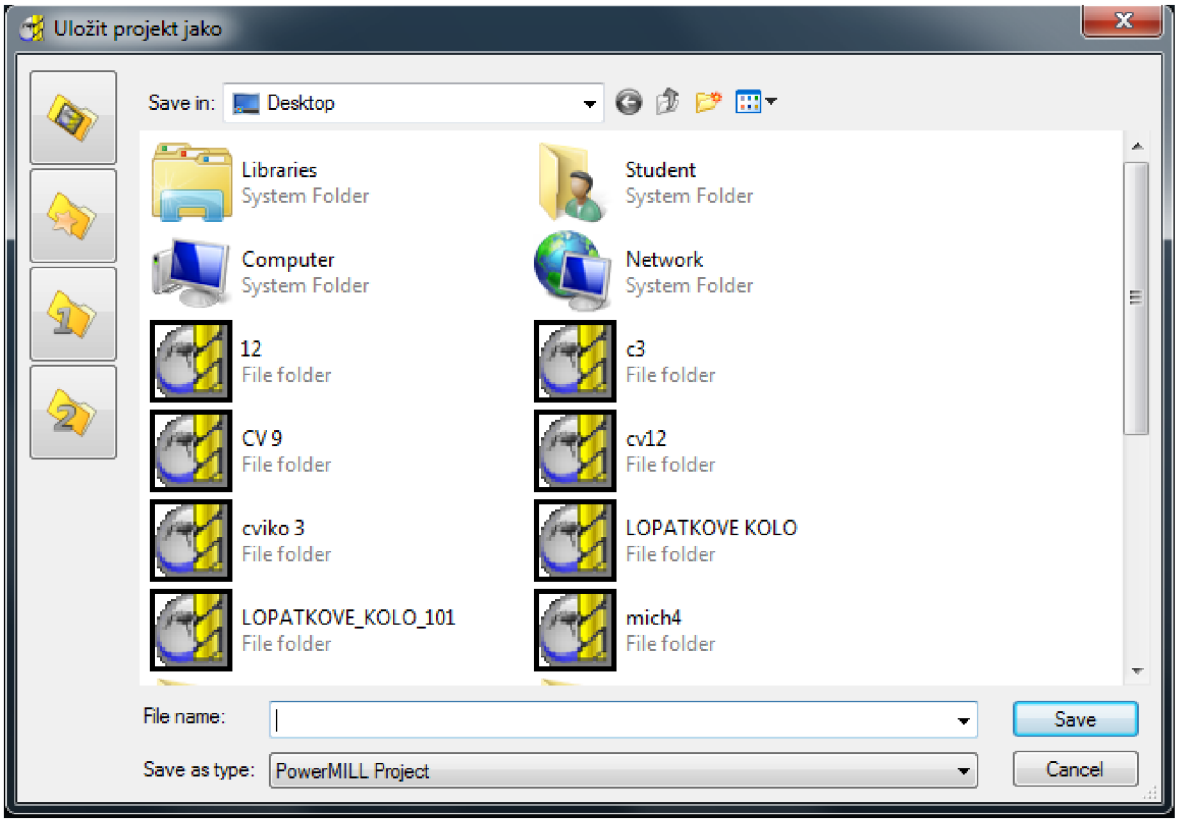
Obr. 6.3 Pracovní okno programu PowerMILL.

Vysvětlivky:

1. Hlavní menu.
2. ViewMILL – pro vizualizaci.
3. Hlavní panel nástrojů.
4. Simulace pohybu nástrojů.
5. Vkládání stroje.
6. Panel pohledů.
7. Strom prohlížeče.
8. Pracovní plocha.
9. Panel tvorby nástrojů.
10. Informační panel.

V prvním kroku je dobré si program nastavit dle vlastních potřeb přes panel Nástroje → Nastavení. V tomto okně lze nastavit tolerance vkládaných modelů, postprocesor pro NC dráhy atd. Dalším užitečným nastavením jsou uživatelské cesty přes panel Nástroje → Cesta PowerMILLu. Tímto nástrojem se nastaví cesty do používaných složek v PC a uživateli se tak zkrátí čas hledáním těchto složek. Cesty jsou vytvářeny pro jednotlivá tlačítka v okně vkládání modelů apod. (viz. Obr. 6.4 tlačítko 1 a 2).

Po nastavení programu se uloží projekt přes panel Soubor → Uložit projekt (obr. 6.4). Nejlépe do souboru kam je nastavená cesta pro tlačítko označené 1 nebo 2 na levé straně okna.

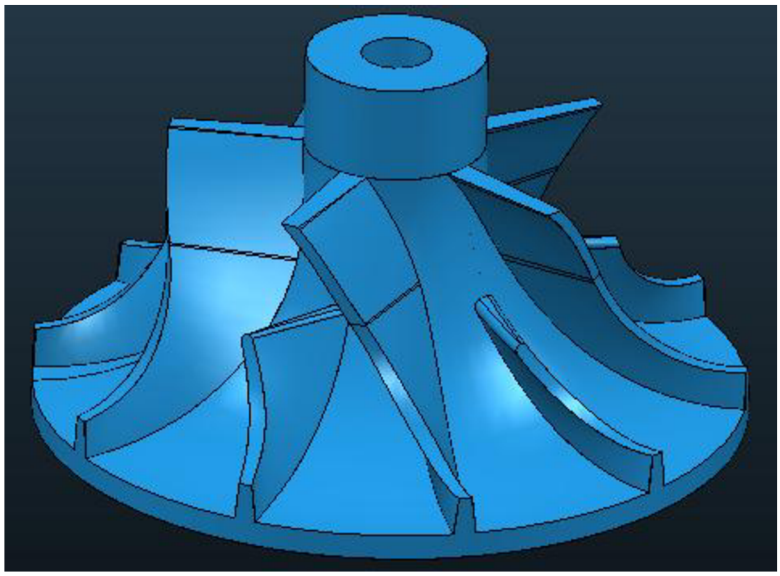


Obr. 6.4 Okno pro uložení projektu.

Po uložení projektu je možné začít pracovat.

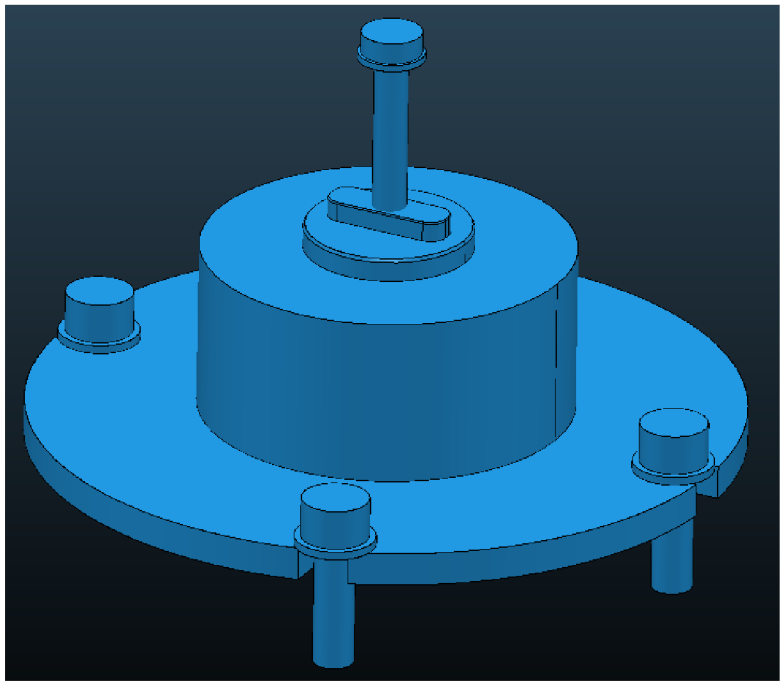
V prvním kroku byl vložen model lopatkového kola (obr. 6.5). Pro vložení modelu bylo nejprve nutné přeložit CAD formát Catie (CATIA Part) do formátu DGK. Tento formát je určen pro obrobky a upínače, jelikož pracuje pouze s plochami. Přeložení dat je možné přes externí překladač přímo od firmy Delcam s názvem Exchange. Práce s tímto překladačem je velmi jednoduchá. Pro vložení modelu se klepne na ikonu Open, přes prohlížeč se vyhledá požadovaný soubor, dále se nastaví formát vkládaného souboru (mělo by být automatické) a klepne se na Ok. Poté už jen stačí uložit model v požadovaném formátu přes ikonu Export, kde se stejně jako při vkládání modelu zvolí cesta pro uložení a požadovaný formát. Další způsob vložení modelu jiného formátu je přímo do programu PowerMILL, Vkládání modelů se provádí přes panel Soubor → Importovat model. Objeví se stejné okno jako pro uložení projektu (viz, obr. 6.4) kde se vyhledá složka obsahující požadovaný soubor a poté se klepne na ikonu Open. V případě že je vkládán jiný formát než DGK, tak se automaticky zapne Exchange integrovaný do PowerMILLu a automaticky data přeloží. Občas se stává, že u importovaných modelů chybí plocha díky špatnému přeložení dat. Tato chyba se v tomto případě neobjevila.

Do softwaru byla také vložena obalová plocha kola (viz. Obr. 5.13). Této ploše byla však vypnuta viditelnost pro lepší vizualizaci kola. Je možné ji vidět až na obrázku 6.11. Obalová plocha je použita k tvorbě drah nástroje pro obrábění lopatek, jak je dále ukázáno.



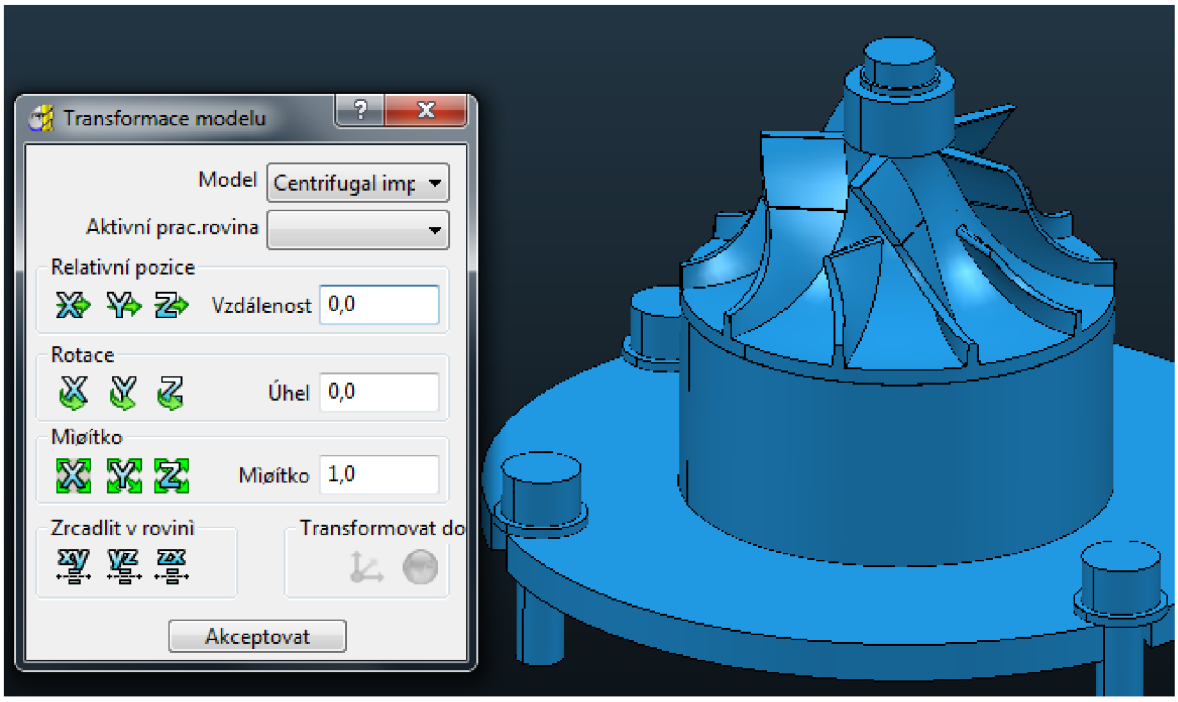
Obr. 6.5 Model lopatkového kola v pracovním prostředí PowerMILLu.

Po úspěšném vložení modelu lopatkového kola byl vložen i model upínače (obr. 6.6)



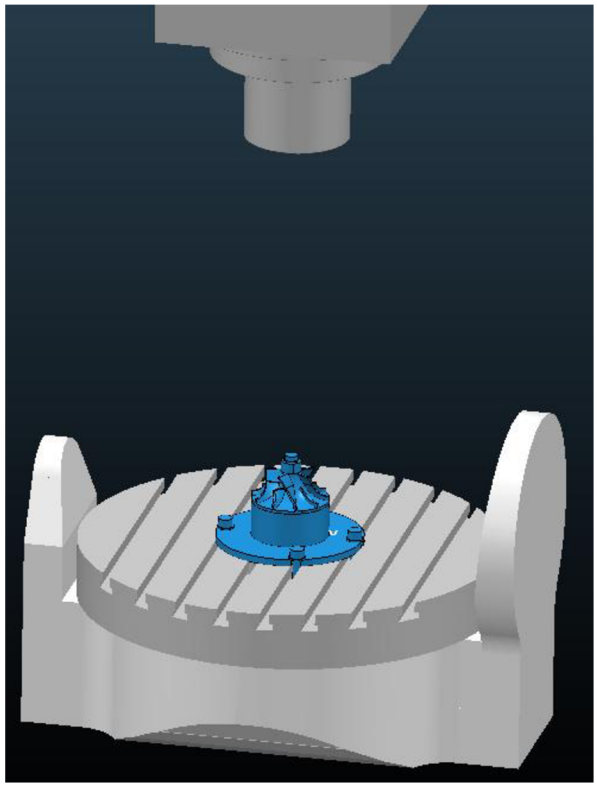
Obr. 6.6 Model upínače v pracovním prostředí PowerMILLu.

Jak je na obrázku 6.6 možné vidět, model upínače se překrývá s modelem lopatkového kola. Model kola musel být tedy posunut. Posouvání modelů se v powerMILLu provádí pomocí příkazu Transformace modelu. Pro transformaci modelu se pravým tlačítkem myši klepne na ikonu Upínač ve stromu prohlížeče pod složkou Modely, dále se vybere Upravit → Transformovat. V okně transformací se zadá požadovaná hodnota posunutí pro danou osu (obr. 6.7).



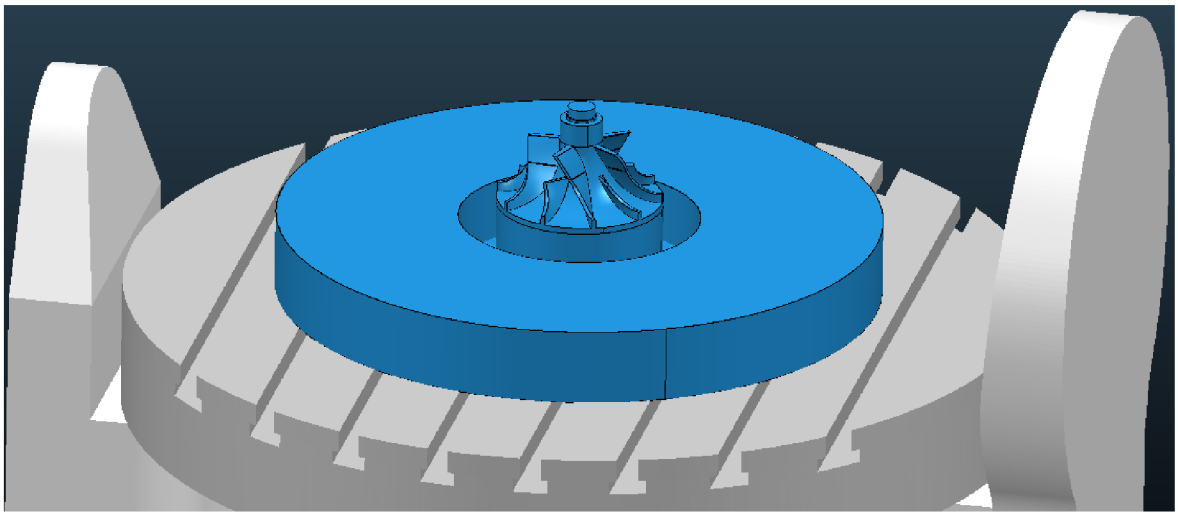
Obr. 6.7 Transformace modelu lopatkového kola.

Po vložení modelů kola a upínače následovalo vložení modelu stroje. Model stroje se vkládá přes panel vkládání stroje. Vloženým strojem bylo obráběcí centrum MCV 1210 (obr. 6.8).



Obr. 6.8 Model stroje MCV 1210.

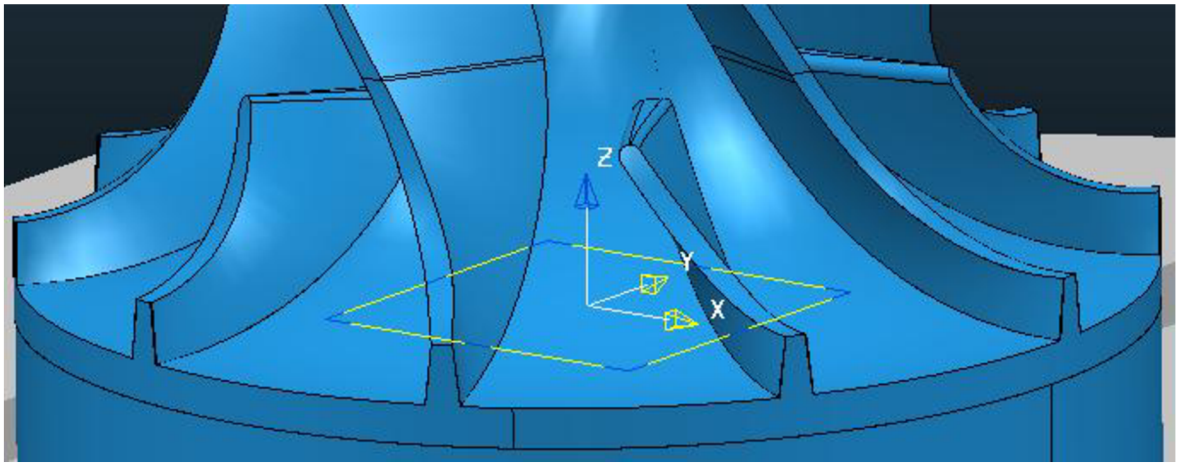
Pro zvýšení bezpečnosti v průběhu obrábění byla navržena ochranná plocha okolo upínače (obr. 6.9). Tato plocha chrání stroj proti kolizím pohyblivých částí a zároveň přidává možnost použití upínek namísto šroubů pro upnutí upínače ke stolu v případě potřeby.



Obr. 6.9 Ochranná plocha.

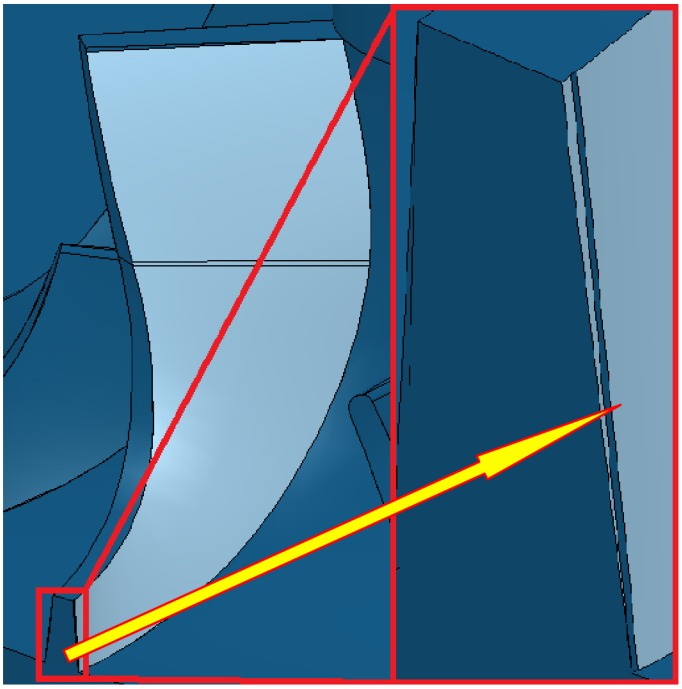
U vkládání modelů do PowerMILLu se může občas stát, že se plochy vloží obráceně. Tím se myslí to, že vložené plochy mají červenou barvu místo modré. Červená barva značí vnitřní stranu modelu a modrá zase vnější. Problém je v tom, že nástroj se pohybuje po modré straně plochy. Tento problém nastal při vložení ochranné plochy. Řešení je velmi jednoduché. Kliknutím myši se vyberou červeně zbarvené plochy, a poté se zmáčkne pravé tlačítko myši a vybere se políčko Otočit vybrané.

V následujícím kroku byl vytvořen nový souřadný systém, který je nulovým bodem pro výpočet drah řezného nástroje. Nový souřadný systém se vytvoří klepnutím pravého tlačítka myši na ikonu „Pracovní roviny“ ve stromu prohlížeče a zvolí se možnost Vytvořit rovinu. Pracovní rovina neboli nový souřadný systém byl vytvořen ve středu upínače na dosedací ploše pro lopatkové kolo (obr. 6.10).



Obr. 6.10 Pracovní rovina.

Pro vytvoření dráhy k obrobení kola je nutné vytvořit hladinu pro levou lopatku, pravou lopatku, mezilopatku, střed kola a obalovou plochu. Hladiny těchto komponent zahrnují jejich plochy. Hladina se vytvoří klepnutím pravého tlačítka myši na ikonu „Hladiny a sady“ ve stromu prohlížeče a klepne se na možnost Vytvořit hladinu. Vytvořená hladina byla přejmenována dle komponentu, který má obsahovat (např. levá lopatka). Pro vložení ploch komponenty do hladiny je nutné myší vybrat všechny plochy náležící dané komponentě na modelu kola. Vybírání ploch však nemusí být na první pohled tak jednoduché. Vytvořený model může obsahovat malé plošky, které jsou lehce přehlédnutelné, a jejich nevybrání vede ke špatnému výpočtu dráhy nástroje (obr. 6.11).



Obr. 6.11 Detail malé plošky levé lopatky, která nebyla vybrána.

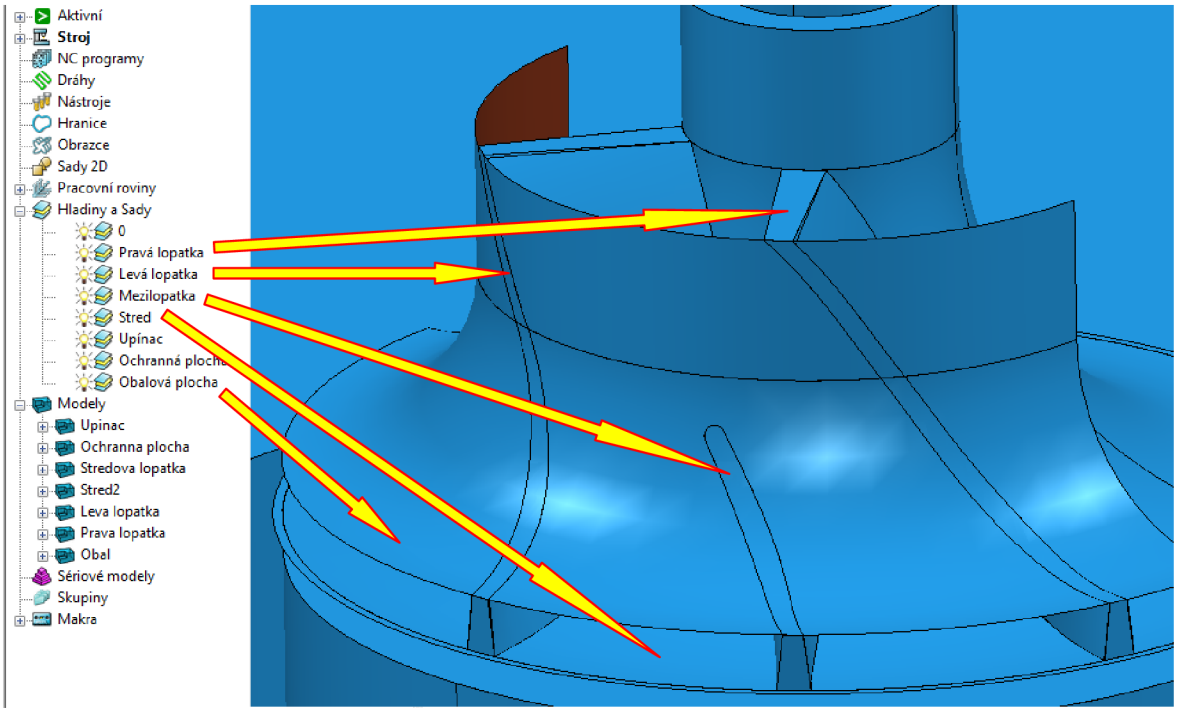
Aby se předešlo riziku přehlédnutí takovýchto malých plošek, byl model lopatkového kola rozdělen na jednotlivé části. Rozdělení bylo provedeno v programu Catia, kde byl model kola ořezán na jednotlivé komponenty (pravá lopatka, levá lopatka, mezilopatka, střed kola a obalová plocha). Soubory jednotlivých komponent zabírají na disku PC zhruba stejné množství dat jako celistvý model kola.

Ze softwaru byl tedy smazán celistvý model kola a byl nahrazen modely jednotlivých komponent vkládaných do daných hladin.

Vložení ploch komponenty do hladiny bylo provedeno klepnutím pravého tlačítka na ikonu požadovaného modelu ve stromu prohlížeče (např. levé lopatky) a poté byla zvolena možnost Vybrat vše. Takto byly vybrány všechny plochy modelu komponenty. Po vybrání ploch se kleplo pravým tlačítkem myši na vytvořenou hladinu pro danou komponentu a zvolila se možnost Vložit vybrané plochy do hladiny.

Celkově bylo vytvořeno pět hladin pro pět požadovaných komponent.

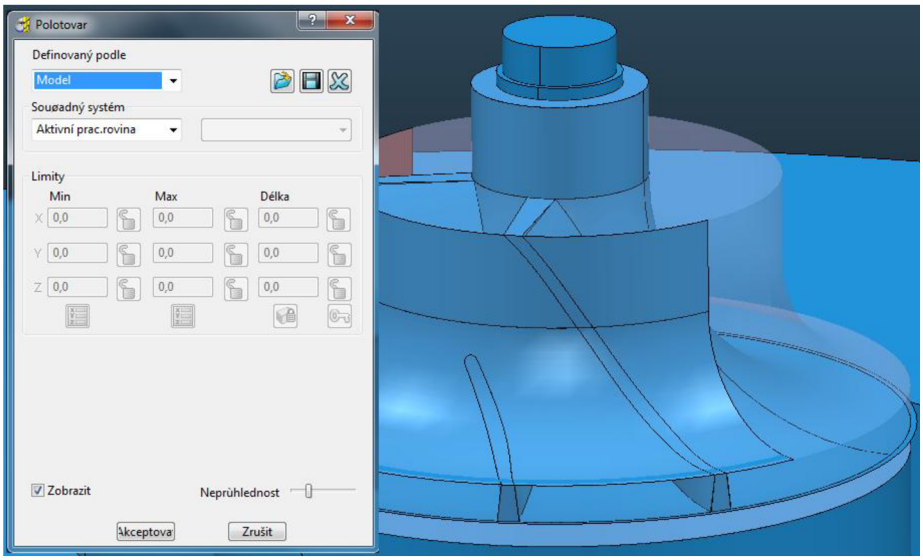
Hladiny byly vytvořeny i pro ostatní modely (upínač, ochranná plocha), jelikož u vytvořených hladin lze vypnout viditelnost zahrnutých ploch (žárovka u ikony hladiny), které mohou překážet při práci s pohledy (obr. 6.12).



Obr. 6.12 Hladiny jednotlivých komponentů.

Obalová plocha je pomocný grafický prvek pro tvorbu drah nástroje. Místo obalové plochy je možné vybrat hřbet lopatky.

Následovalo vložení polotovaru. Polotovar se vkládá příkazem Polotovar, v hlavním panelu nástrojů (obr. 6.13). Za typ polotovaru byl vybrán Model a za souřadný systém byla vybrána vytvořená rovina (viz. Obr. 6.10). Formát pro polotovar musí mít koncovku DMT.

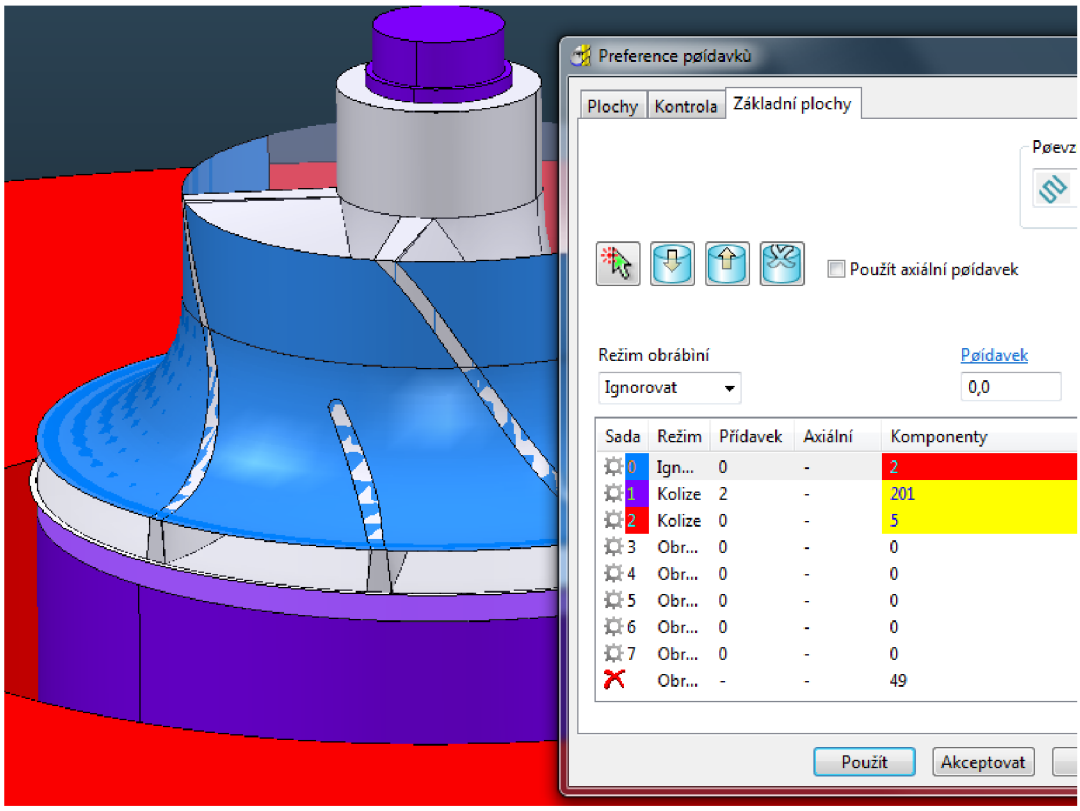


Obr. 6.13 Vkládání polotovaru.

Polotovar reprezentuje objem, který má být obráběním odebrán. Formát DMT pracuje s objemy.

V dalším kroku byla provedena předběžná opatření proti kolizím určitých ploch s nástrojem a upínačem nástroje.

Klepnutím na ikonu „Výchozí přídavky“ v hlavním panelu nástrojů se otevře okno, ve kterém je možné přiřadit vlastnost vybrané ploše. Možné vlastnosti jsou celkem tři. První možností je obrábění – plocha může být obráběna. Druhá možnost je kolize – software kontroluje kolizi této plochy s nástrojem a počítá dráhy tak, aby se nástroj této ploše vyhýbal. Tato možnost také dovoluje nastavit dané ploše přídavek, tedy minimální vzdálenost, na kterou se může nástroj k ploše přiblížit. Poslední možností je vlastnost ignorovat – software se chová tak, jako by daná plocha v pracovním prostředí nebyla. Pro vybrané plochy je možné vybrat barvu, podle které lze jednoduše poznat, která vlastnost jí byla přidělena (obr. 6.14).

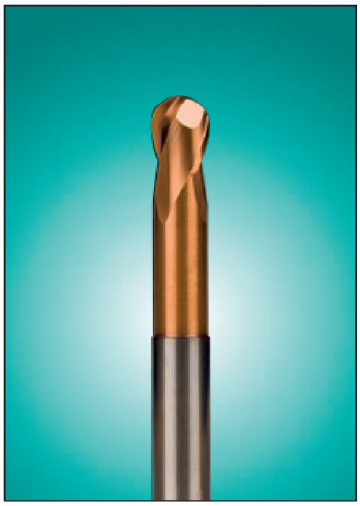


Obr. 6.14 Přiřazování přídavků daným plochám.

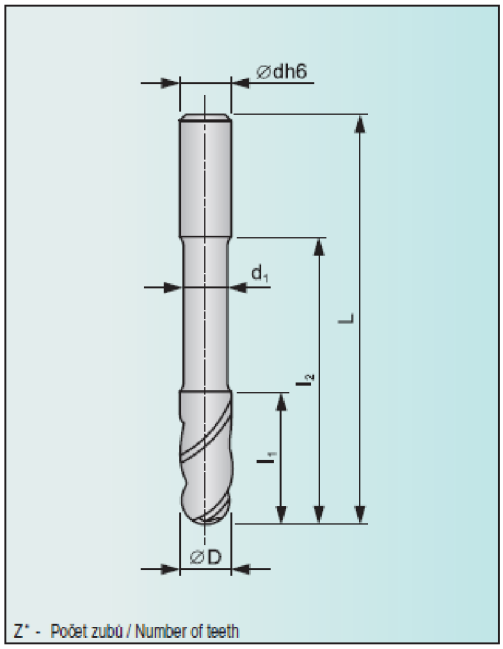
Obalové plože (modrá barva) byla přiřazena vlastnost Ignorovat. Tato plocha musí být ignorována, jelikož by byl nástroj touto plochou blokován a nemohl by tudíž obrábět prostor mezi lopatkami. Červená barva reprezentuje ochrannou plochu, které byla přiřazena vlastnost Kolize, což zabraňuje nástroji i jeho upínači přiblížení se k upínacímu stolu stroje. Kontrola na kolize byla přiřazena i pro plochy upínače (fialová barva). Těmto plochám byl navíc přidělen přídavek 2 mm.

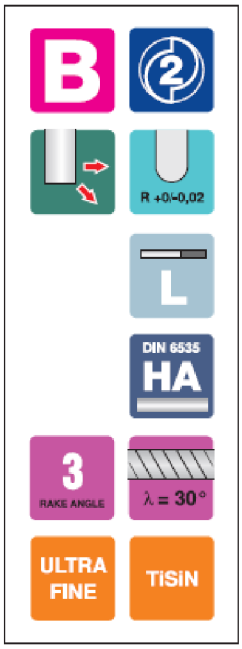
Po přidělení přídavků k daným plochám bylo možné začít vytvářet dráhy řezného nástroje.

Prvním krokem pro výpočet drah je určení nástrojů. Strategie softwaru PowerMILL pro obrábění lopatek umí pracovat pouze s nástroji s kulovým zakončením. Z tohoto důvodu byly vybrány pouze frézy s kulovým čelem. Dle vybavení dílen VUT FSI byly k dispozici dvě kulové frézy firmy PRAMET a to Ø5 a Ø8 mm (obr. 6.15).



Jiné rozměry dle požadavku zákazníka.
Other versions available on request.



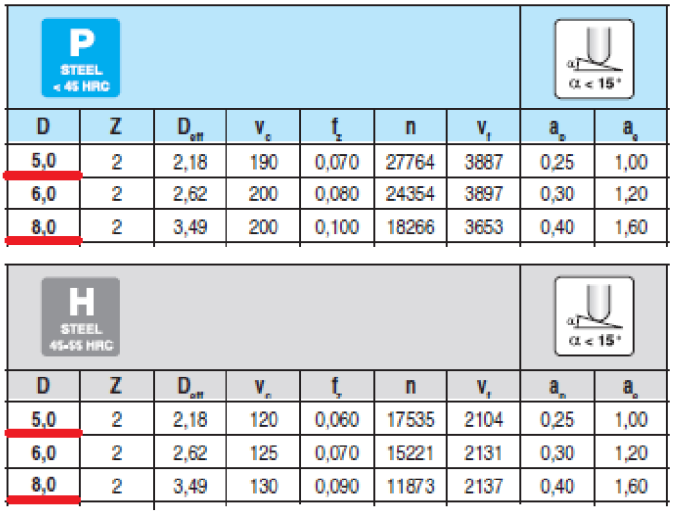


Značení Marking	Sortiment/Assortment	Rozměry / Dimensions							
		D	Z*	dh6	L	l_1	l_2	d_1	-
05B2R60-09A05 KERU	●	5,0	2	5	60	9,0	32	4,6	
06B2R75-10A06 KERU	●	6,0	2	6	75	10,0	40	5,5	
08B2R75-12A08 KERU	●	8,0	2	8	75	12,0	40	7,4	

Obr. 6.15 Frézy pro obrobení lopatek. [34]

Fréza Ø8 byla určena pro hrubování a Ø5 pro dokončení.

Tyto frézy jsou dle katalogu určeny pro obrábění materiálů třídy P a M (obr. 6.16).



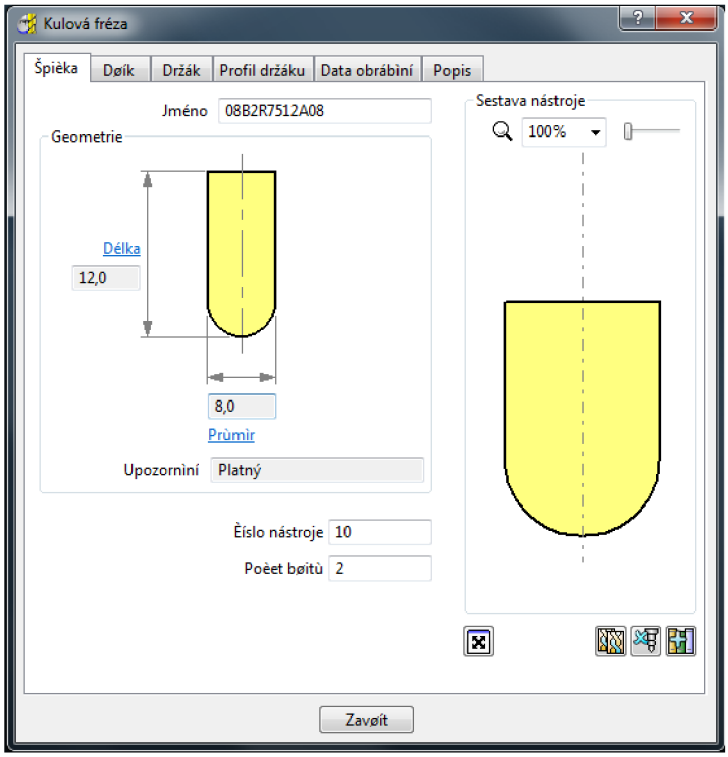
D	Z	D_{eff}	v_c	f_z	n	v_f	a_p	a_e
5,0	2	2,18	190	0,070	27764	3887	0,25	1,00
6,0	2	2,62	200	0,080	24354	3897	0,30	1,20
8,0	2	3,49	200	0,100	18266	3653	0,40	1,60

D	Z	D_{eff}	v_c	f_z	n	v_f	a_p	a_e
5,0	2	2,18	120	0,060	17535	2104	0,25	1,00
6,0	2	2,62	125	0,070	15221	2131	0,30	1,20
8,0	2	3,49	130	0,090	11873	2137	0,40	1,60

Obr. 6.16 Řezné podmínky fréz. [34]

Jelikož obrobitelnost duralu je značně lepší než u ocelí, byly řezné podmínky změněny (viz. tab. 6.1).

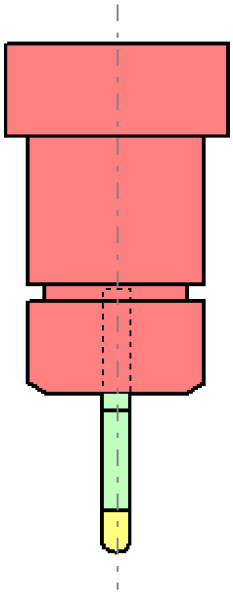
Po výběru nástrojů byly tyto nástroje aplikovány do softwaru. Pro vytvoření nástroje slouží panel pro tvorbu nástrojů. PowerMILL nabízí možnost vytvořit jakoukoli frézu. Pro náš případ to jsou kulové frézy (obr. 6.17).



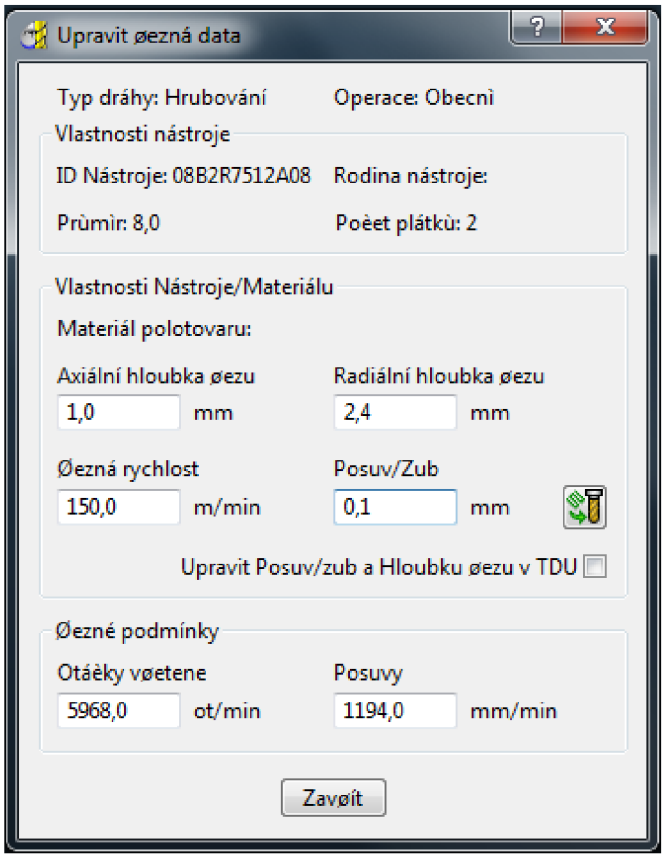
Obr. 6.17 Tvorba nástroje.

V tomto okně je možné vytvořit celý nástroj i s upínačem (obr. 6.18).

Tvorba nástrojů v PowerMILLu je velmi jednoduchá. Pro řeznou část byl zadán pouze průměr, délka a počet břitů. Dřík byl seskládán z jednotlivých komponentů skládaných na sebe (zadává se horní průměr, dolní průměr a výška komponentu). Pro tvorbu upínače se užívá stejný postup jako u tvorby dříku. Samotný upínač lze uložit do PC a sestavu upínače s nástrojem je možné vložit do nástrojové databáze a mít k nim rychlý přístup při používání v jiných projektech. Při tvorbě nástroje je také možné zadat informativní řezné podmínky pod záložkou dat obrábění (obr. 6.19). Tímto způsobem byly vytvořeny oba nástroje. Názvy nástrojů byly zvoleny dle značení výrobce. Upínač je kleštinový od firmy PRAMET.



Obr. 6.18 Sestava nástroje s upínačem.



Obr. 6.19 Zadávání řezných podmínek.

Řezné podmínky byly voleny dle možností obráběcího stroje. Obráběcí centrum MCV 1210 má určené maximální otáčky na 18 000 min^{-1}. Řezné podmínky pro zvolené nástroje na obrázku 6.16 jsou pro ocel a pro efektivní průměr frézy při dané hloubce axiálního řezu (efektivní průměr nástroje je největší průměr na kulovém konci frézy, který odebírá třísku). Řezné podmínky byly tedy voleny s ohledem na možnosti stroje a s faktem, že dural je lépe obrobitelný než ocel (tab. 6.1).

Tab. 6.1 Řezné podmínky pro nástroje.

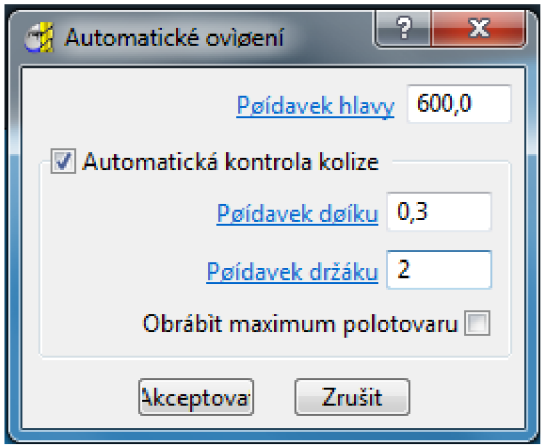
	Hrubování Ø8	Dokončování Ø5
v_c [m/min]	150	220
n [min^{-1}]	5968	14006
f_z [mm]	0,1	0,05
a_p [mm]	1	0,5
a_e [mm]	2,4	0,5

Řezné rychlosti byly určeny pro průměry fréz, tudíž řezné rychlosti pro maximální průměry odebírající třísku (efektivní průměry) budou menší. Řezná rychlost na špičce nástroje je nulová.

Otáčky stroje mohou být až 18 000 min^{-1}, ale není doporučené je využívat z důvodu životnosti stroje a výkonu, který je v takto vysokých otáčkách malý.

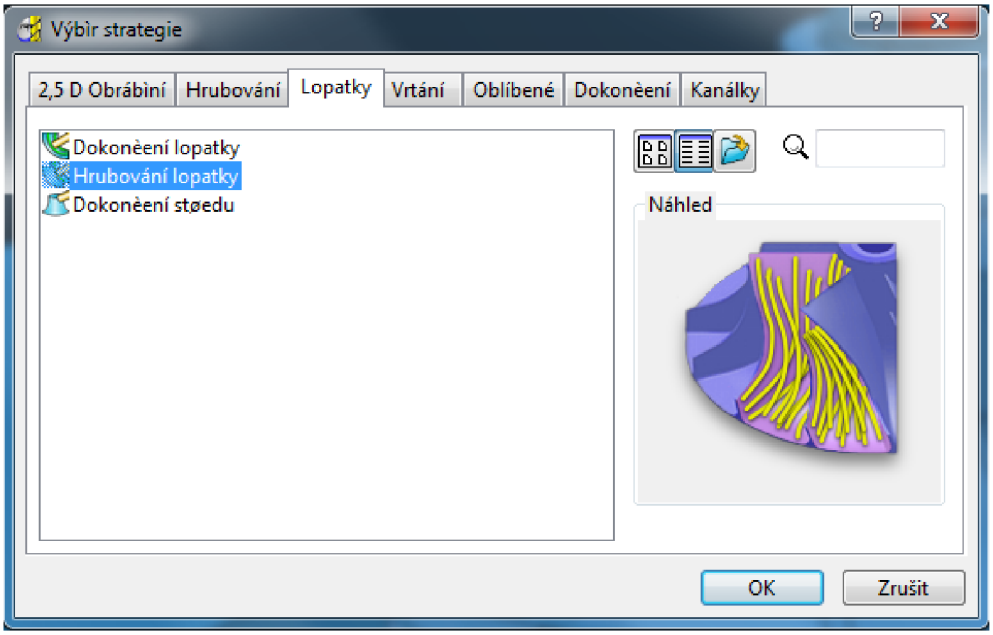
Při obrábění duralu je také nutné mazání chladicí kapalinou, jelikož je dural lepivý a vytváří na břitu nástroje nárůstek.

Pro nástroje bylo následně zapnuto automatické ověřování kolizí v hlavním panelu nástrojů. Pro obě frézy byly nastaveny podobné podmínky (obr. 6.20).



Obr. 6.21 Automatické ověřování kolizí.

Po zavedení nástrojového vybavení a zapnutí automatické kontroly kolizí bylo možné začít počítat řezné dráhy pro nástroje. PowerMILL disponuje strategiemi určenými výhradně pro obrábění lopatkových kol. V hlavním panelu nástrojů pod příkazem „Obráběcí strategie“ byly tedy vybrány strategie pro obrábění lopatek (obr. 6.21).

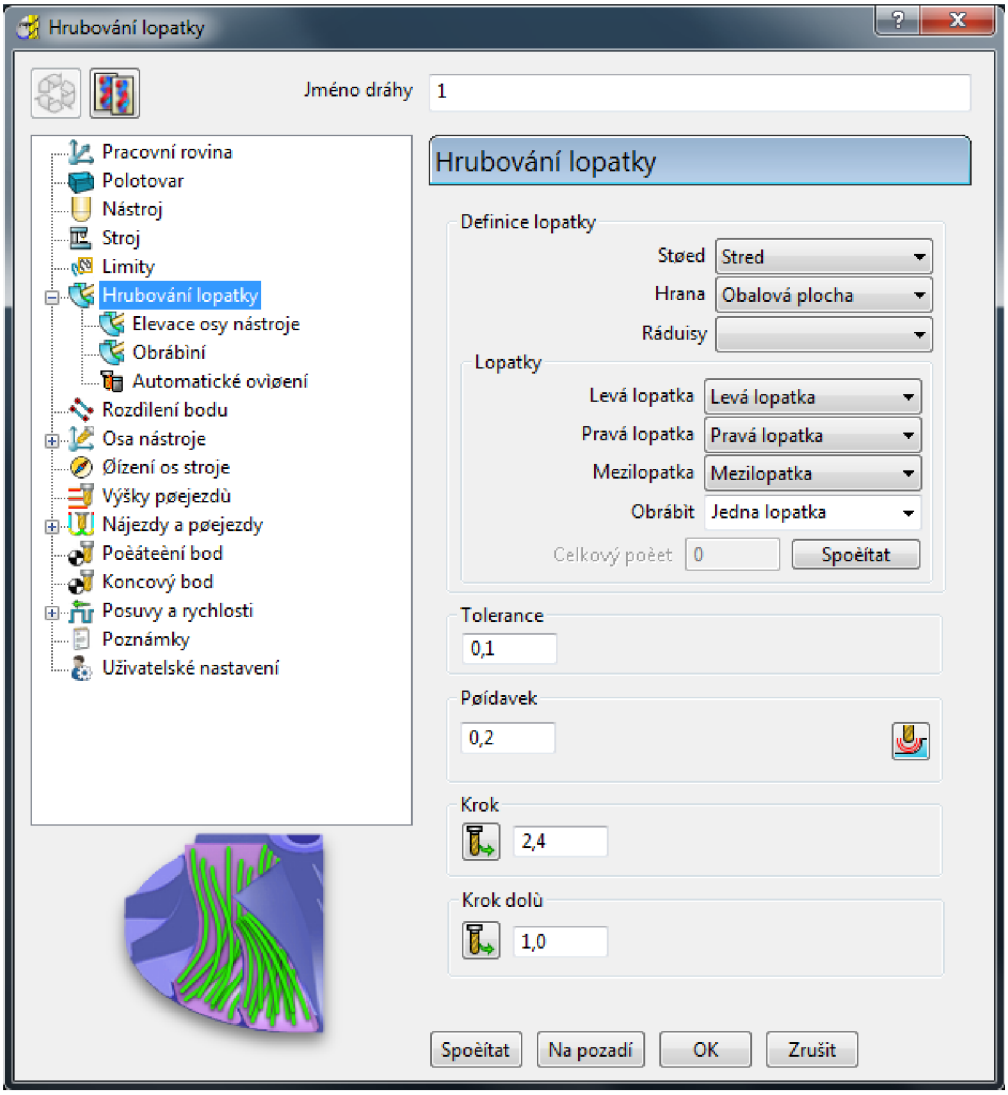


Obr. 6.21 Strategie pro obrábění lopatkových kol.

6.4.1 Hrubování

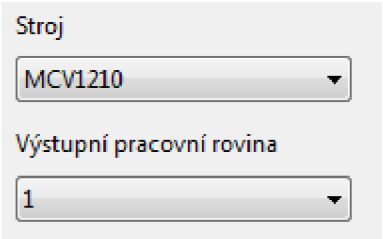
První použitou strategií bylo hrubování lopatky. Po zvolení hrubování se otevřelo okno pro nastavení parametrů frézování (obr. 6.22). Prvním krokem bylo určení komponent lopatkového kola v sekci Definice lopatky. Po otevření roletového menu pro určení středu

kola byly nabídnuty všechny vytvořené hladiny jednotlivých komponent (viz. obr. 6.12). Pro střed byla tedy zvolena hladina středu kola, pro hranu byla zvolena obalová plocha atd. Políčko pro rádiusy zůstalo nevyplněné, jelikož rádiusy zůstanou po nástroji. Dále byla nastavena radiální a axiální hloubka řezu (dle tab. 6.1) a přídavek 0,2 mm na dokončení.

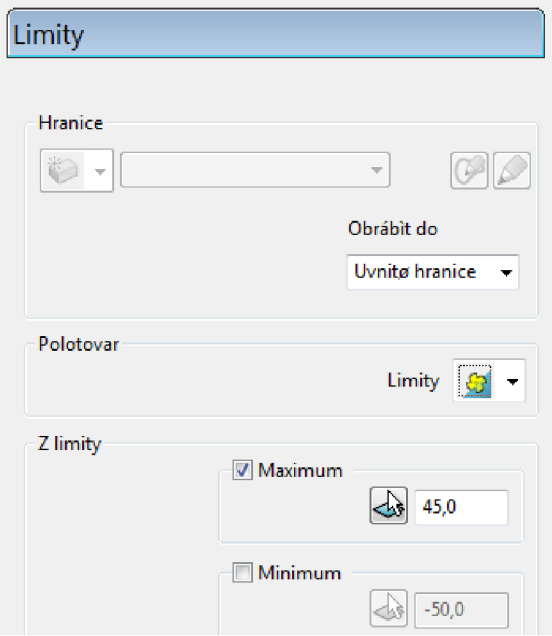


Obr. 6.22 Okno strategie hrubování lopatek.

V záložce „Polotovar“ nebylo nic měněno, polotovar zůstává pořád stejný (viz. obr. 6.13). V záložce „nástroj“ byla zvolena vytvořená fréza o průměru 8 mm. Dále bylo v záložce „Stroj“ zvoleno obráběcí centrum MCV 1210 a rovina nulového bodu (viz. obr. 6.10) (obr. 6.23). V záložce pro limity byla určena maximální hodnota Z. Tato limita odpovídá vzdálenosti horní vodorovné plochy lopatky od nulové roviny, což je 45 mm (obr. 6.24). Program tedy nevytvoří dráhy řezného nástroje nad rovinou kolmou s osou Z ve výšce 45 mm od nulové roviny.

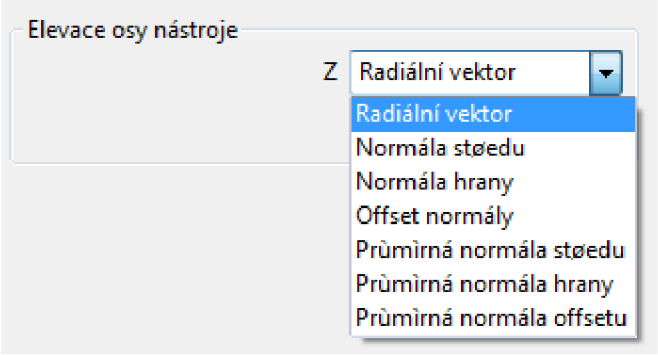


Obr. 6.23 Určení stroje.



Obr. 6.24 Limity pro tvorbu drah nástroje.

V záložce „Elevace osy nástroje“ lze zvolit, jakým způsobem se bude nástroj pohybovat vzhledem k ploše středu kola, nebo vzhledem k obalové ploše (obr. 6.25).

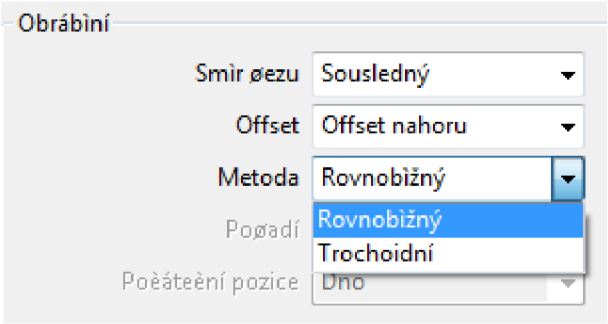


Obr. 6.25 Možnosti elevace osy nástroje.

U možnosti „Radiální vektor“ lze nastavit úhel, který bude osa nástroje při obrábění svírat s nulovou rovinou (nebo také rovinou upínacího stolu stroje). Normála středu značí to, že osa nástroje při obrábění bude vždy kolmo k ploše středu kola. Normála hrany znamená, že osa nástroje při obrábění bude vždy kolmo k obalové ploše kola. Offset normály řídí osu nástroje kolmo na plochu tak, jako by při každé vrstvě drah byla plocha offsetována o hodnotu a_p. Průměrná normála středu řídí osu nástroje tak, že když je elevace osy při obrábění normálou středu od 0° do 90°, tak je úhel mezi osou nástroje a nulovou rovinou průměrnou hodnotou těchto úhlu, což je tedy 45°. Stejný princip je i pro průměrnou normálu hrany a offsetu.

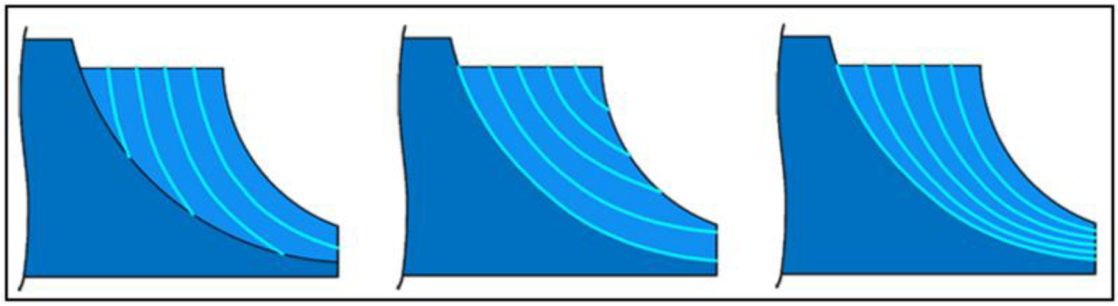
Pro hrubování byla zvolena možnost Offset normály.

V záložce „Obrábění“ je možné volit směr řezu, offset a metodu obrábění (obr. 6.26).



Obr. 6.26 Možnosti obrábění.

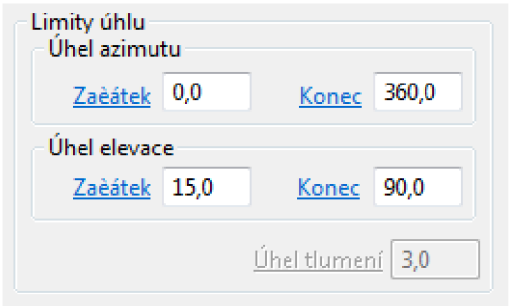
Směr řezu byl vybrán jako sousledný. Metoda obrábění mohla být zvolena pouze jako rovnoběžná, jelikož metoda trochoidní není podporována u obrábění kola s mezilopatkami. Offset byl zvolen nahoru. Nabízené možnosti offsetu jsou: vypnut, nahoru, dolů a protnutí (obr. 6.27). Metoda offsetu nahoru byla zvolena z důvodu toho, že je časově méně náročná nežli metoda protnutí (nástroj se také méně opotřebovává, jelikož je méně v záběru) a technologicky lepší než metoda offsetu dolů, jelikož nástroj projede poslední řez na středu kola jednou dráhou. Při vypnutém offsetu se vypočítá pouze jedna vrstva drah u středu kola.



Offset dolů Offset nahoru Protnutí

Obr. 6.27 Možné způsoby offsetu obrábění. [35]

V záložce pro osu nástroje byly nastaveny limity pro elevaci osy nástroje, neboli limity pro osu A stroje (obr. 6.28). To z důvodu, aby vřeteno stroje nekolidovalo s upínacím stolem.

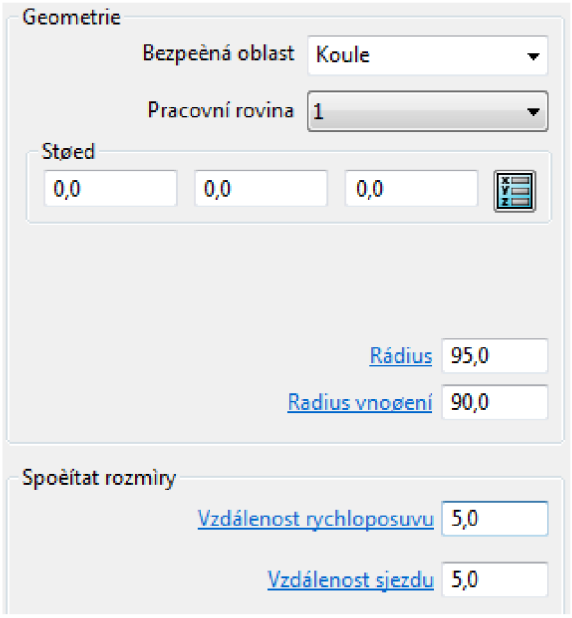


Obr. 6.28 Limity osy nástroje.

Nástroj se tedy smí pohybovat jen v rozmezí 15 - 90° od plochy upínacího stolu stroje.

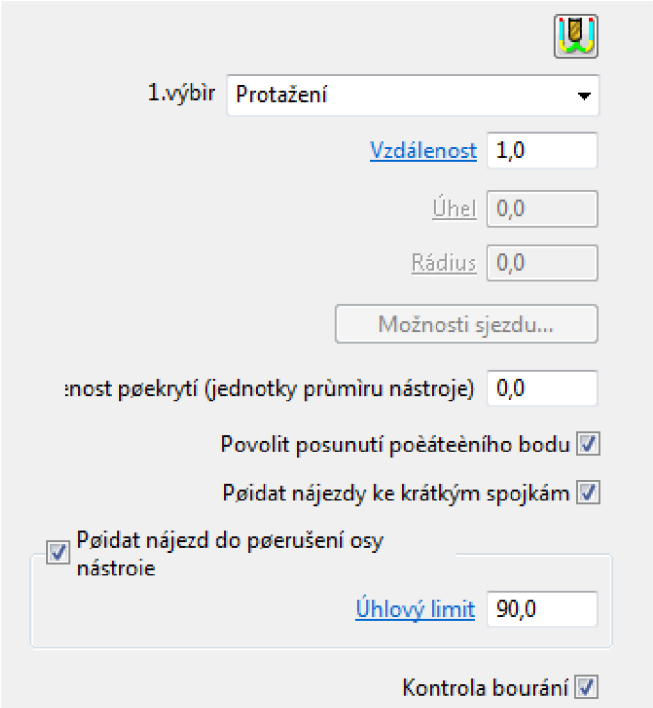
V záložce pro řízení os byla ponechána možnost uvolnit.

V záložce „Výšky přejezdů“ byla určena bezpečná rovina, po které může nástroj přejíždět přes obrobek. Bezpečnou rovinou byla zvolena koule. Tato koule má střed v nulovém bodu pro výpočet drah a zaujímá prostor okolo modelu lopatkového kola. Poloměr koule byl zvolen 95 mm (obr. 6.29).



Obr. 6.29 Volba přejezdů nástroje.

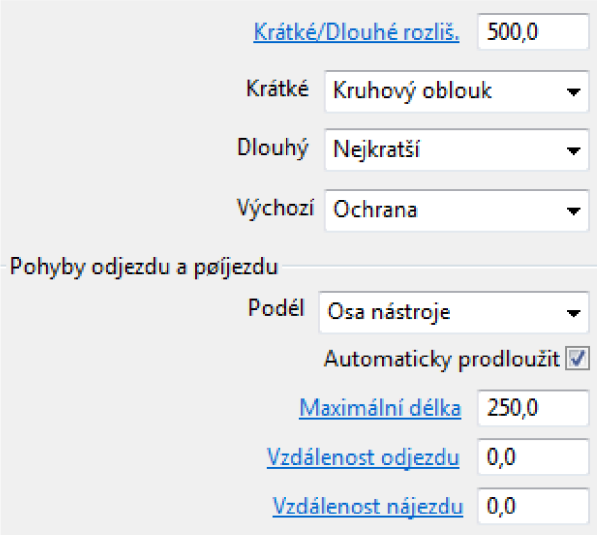
Dále byly nastaveny nájezdy a přejezdy v záložce nájezdů a přejezdů (obr. 6.30).



Obr. 6.30 Definování nájezdů.

U nájezdů bylo nastaveno protažení dráhy o 1 mm, aby nástroj najížděl do řezu plynuleji. Pro výjezdy nebylo nastaveno žádné kritérium (okno pro výjezdy vypadá stejně jako okno pro nájezdy).

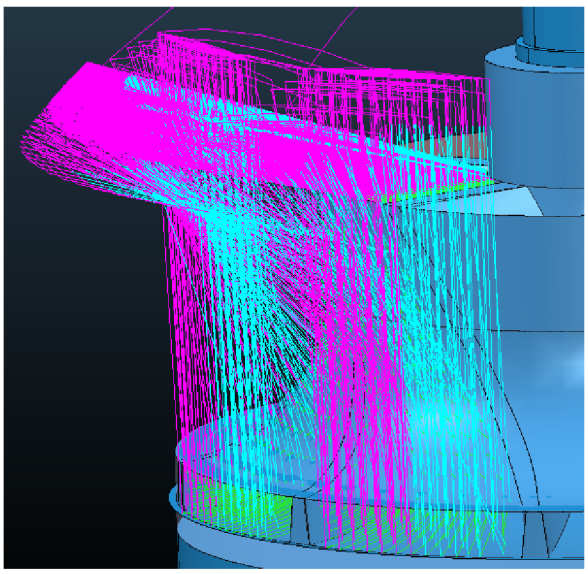
Pro přejezdy mezi jednotlivými drahami byly nastaveny kruhové oblouky (obr. 6.31).



Obr. 6.31 Okno definování přejezdů.

V políčku Krátké/Dlouhé se píše hodnota délky přejezdu, která rozděluje přejezdy na krátké a dlouhé. Krátké přejezdy tedy byly nastaveny na kruhové oblouky a dlouhé přejezdy jako nejkratší (nástroj nad obrobkem přejíždí v co nejmenší vzdálenosti s ohledem na tvar plochy přejezdů). Pohyb nástroje z místa a do místa řezu byl ponechán podél osy nástroje. Nebezpečí u přejezdů je, že nejsou kontrolovány na kolize. Proto je nutné dráhu nástroje pečlivě zkontrolovat před realizací na stroji.

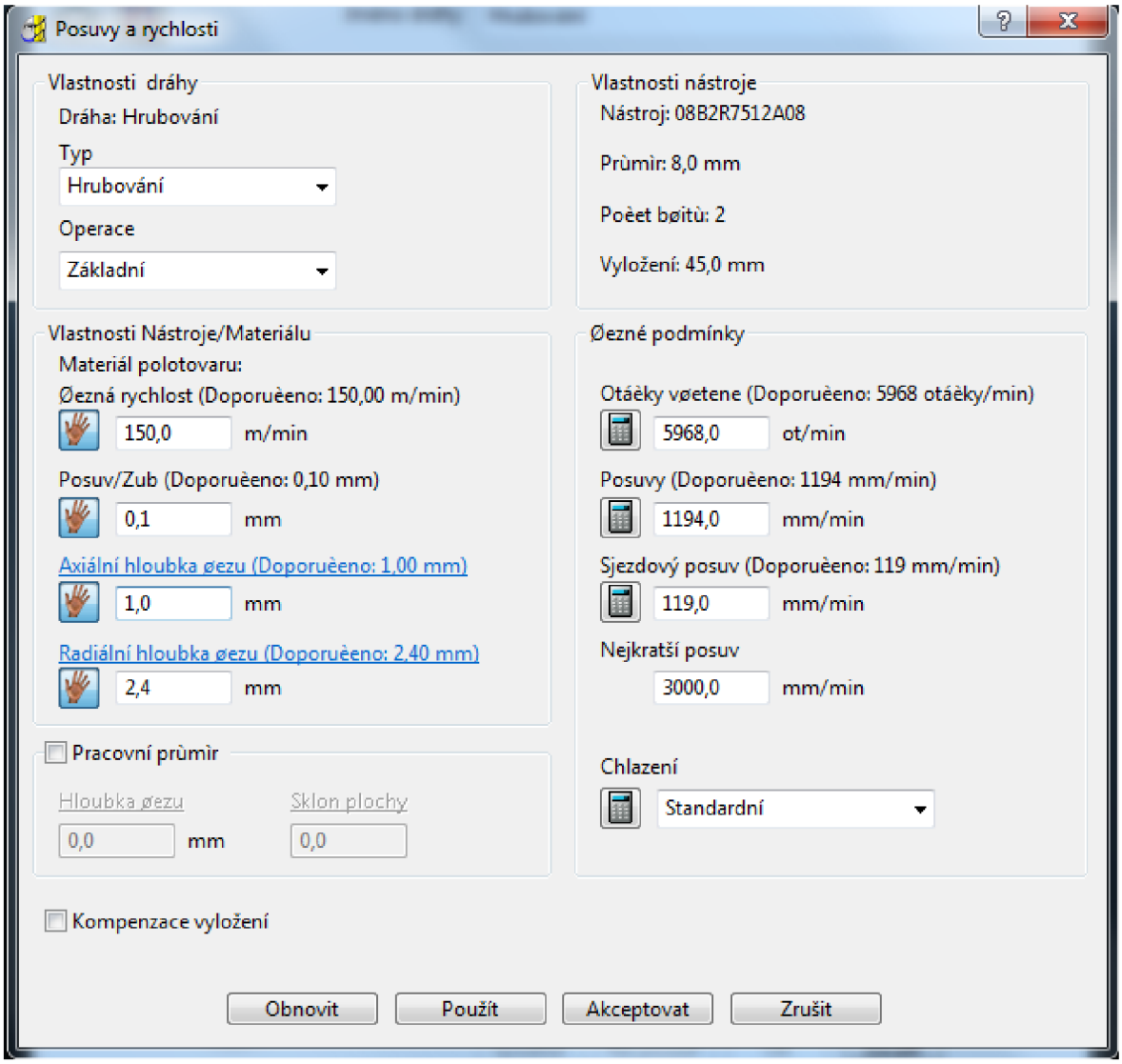
Definováním nájezdů a přejezdů byl zkrácen čas výroby o několik minut. Pro ukázku jak by vypadaly přejezdy bez editace je znázorněno na obrázku 6.32.



Obr. 6.32 Nájezdy a přejezdy bez editace.

Po určení nájezdů a přejezdů byl v záložce pro počáteční a koncový bod řezného nástroje zvolen bezpečný střed obrobku. To znamená, že před každým započetím obrábění i po něm se nástroj vrátí do pozice kolmo nad obrobkem (osa nástroje je rovnoběžná s osou Z) na rovině přejezdů.

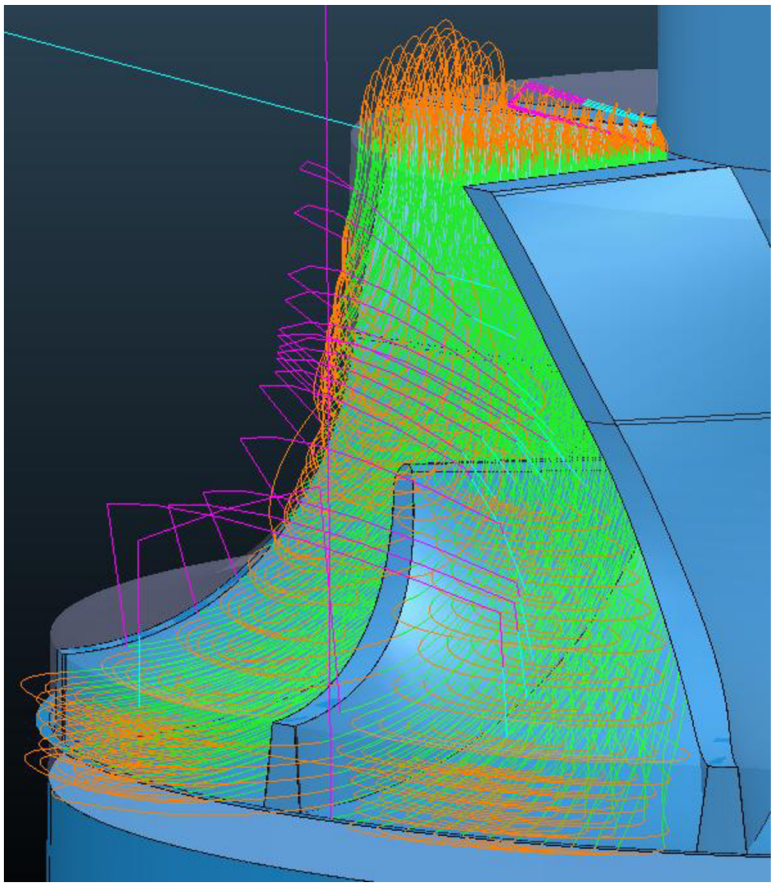
Posledním krokem ve vyplňování okna pro hrubování bylo vyplnění řezných podmínek v záložce Posuvy a rychlosti (obr. 6.33).



Obr. 6.33 Definování řezných podmínek.

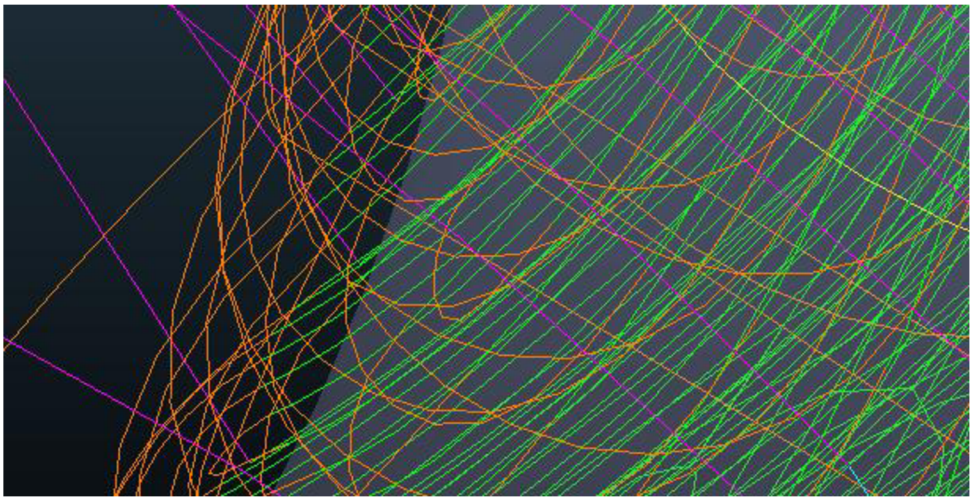
Jak je na obrázku 6.33 možné vidět, řezné podmínky zadané při tvorbě nástroje (viz. obr. 6.19) jsou v závorce napsány jako doporučené. Tyto podmínky byly přepsány do příslušných oken a byly akceptovány.

Po zadání řezných podmínek byla spočítána dráha řezného nástroje (obr. 6.34) kliknutím na tlačítko „Spočítat“ v okně pro definici hrubování lopatek (viz. obr. 6.22 dole).



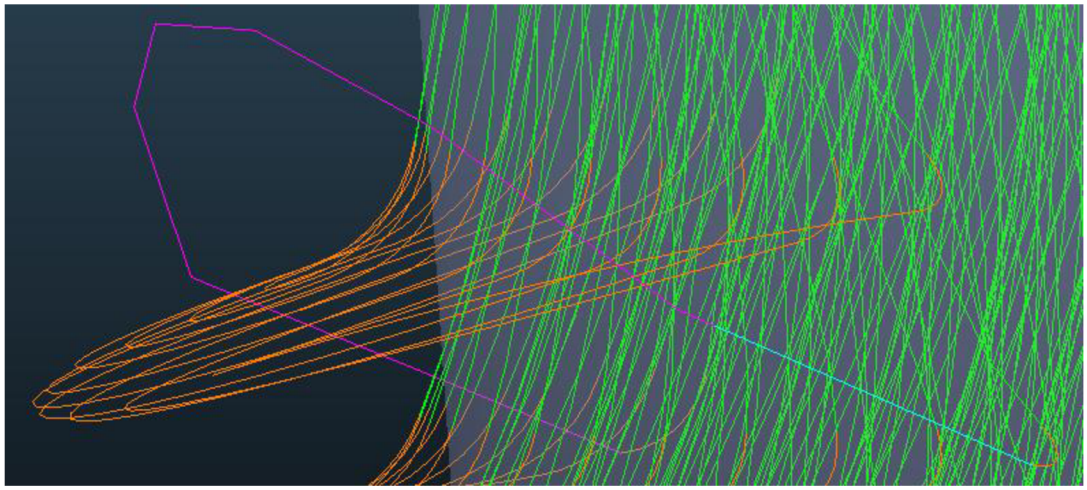
Obr. 6.34 Vytvořená dráha řezného nástroje pro hrubování mezilopatkových prostor.

Po spočítání bylo nutné provést pár změn u přejezdů mezi jednotlivými drahami (zeleně jsou dráhy nástroje v záběru, fialové jsou dráhy rychloposuvu a oranžové a světle modré jsou dráhy pracovního posuvu). Přejezdy u vstupu a výstupu média do lopatkového kola jsou v pořádku, přejezdy na obalové ploše však bylo nutné upravit, jelikož byly nebezpečné a některé přejezdy byly spočteny skrz neobrobený materiál (obr. 6.35).



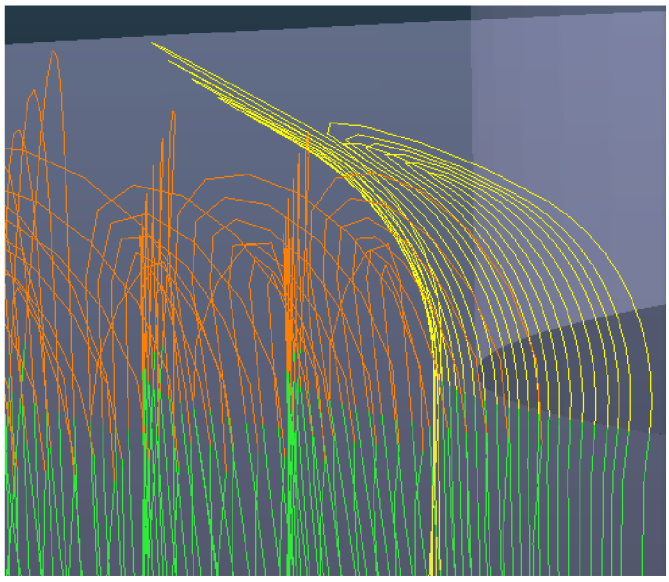
Obr. 6.35 Nebezpečné přejezdy.

Pro úpravu přejezdů byly myší vybrány požadované přejezdy, poté se v hlavním panelu nástrojů kleplo na ikonu nájezdů a přejezdů. Okno pro úpravu nájezdů a přejezdů obsahuje stejné prvky, jaké jsou ukázány na obrázku 6.30 a 6.31. Jako nájezd a výjezd z řezu byl vybrán oblouk normály plochy a jako přejezdy byly ponechány kruhové přejezdy. Některé dlouhé přejezdy byly poté upraveny na nejkratší přejezdy (fialově), jelikož dlouhé oblouky se vlnily a byly nebezpečně blízko neobrobenému materiálu (obr. 6.36). Pro provedení změn v přejezdech se kleplo na ikonu Použít a poté Akceptovat.



Obr. 6.36 Nahrazení přejezdu obloukem přejezdem nejkratším (fialový).

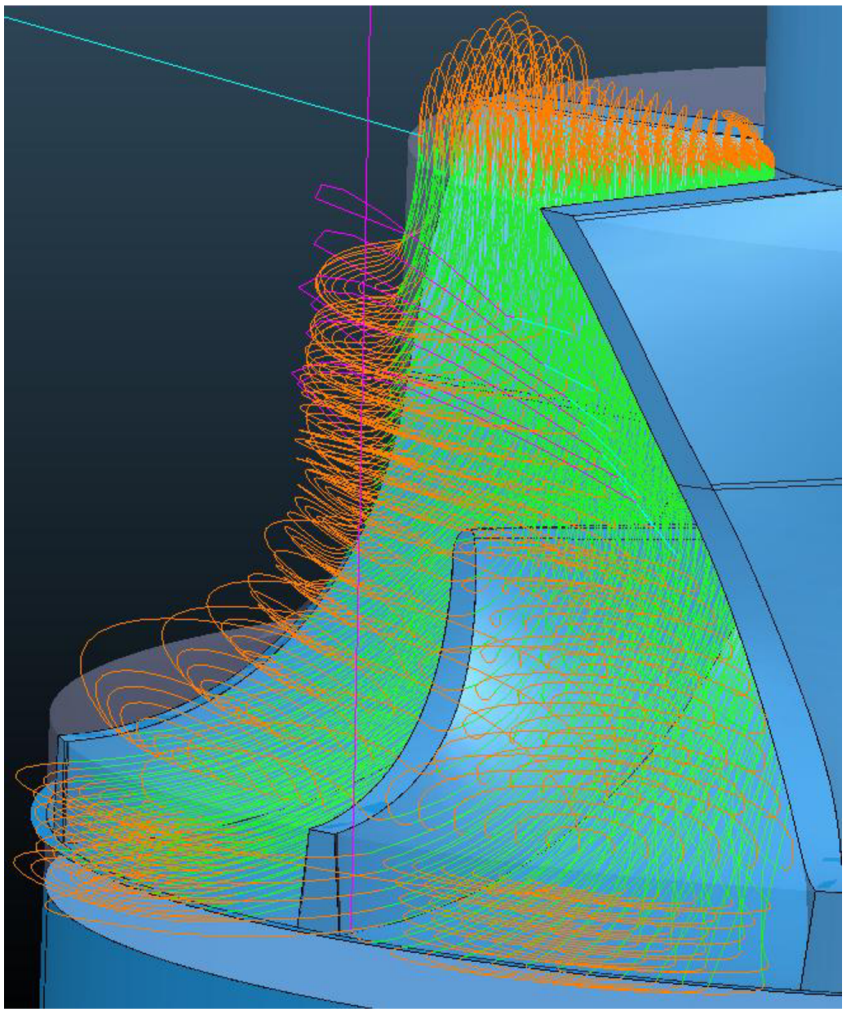
Přejezdy byly také upraveny u výjezdů nástroje u horní válcové části lopatkového kola. Důvodem je zamezení pohybu nástroje po již obrobené ploše polotovaru (obr. 6.37). Pro nájezdy a výjezdy byl určen oblouk normály plochy, tedy oblouk, který je kolmý na obráběnou plochu. Přejezdy zůstaly nastaveny na kruhový oblouk.



Obr. 6.37 Upravené přejezdy u středu kola.

Přejezdy kruhovými oblouky jsou výhodné tím, že spojují jednotlivé řezné dráhy plynule, tudíž i obráběcí stroj má plynulý chod, který je šetrný k pojezdovým mechanizmům.

Po upravení přejezdů byla hrubovací dráha kola hotova (obr. 6.38).



Obr. 6.38 Konečná dráha pro hrubování.

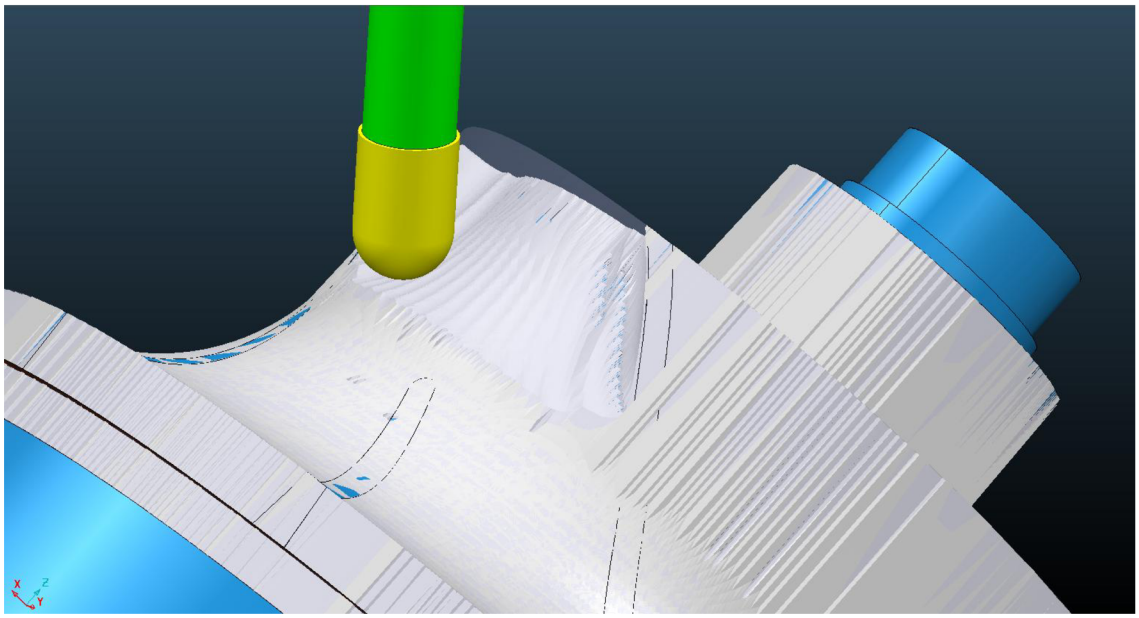
Hrubování probíhá ze středu mezilopatkových prostor směrem k lopatkám.

Úspěšné bezkolizní vytvoření dráhy značí fajfka v zeleném políčku u vytvořené dráhy ve stromu prohlížeče. Tento ukazatel však nemusí nutně znamenat úplné bezkolizní obrábění. Jak bylo dříve zmíněno a ukázáno, přejezdy nejsou kontrolovány na kolize. Na kolize také nejsou kontrolovány pohyblivé části stroje, tedy vřeteno a upínací stůl mohou kolidovat a software na to neupozorní.

Pro ověření bezkolizního chodu obrábění slouží také simulace. V simulaci jsou znázorněny pohyby stroje i s odebíráním materiálu obrobku a je tak možné sledovat průběh obrábění a kontrolovat kolize. Pro zobrazení odebírání třísky musí být zapnut ViewMILL. Pro simulování pohybů stroje slouží panel simulace.

V panelu simulací byla vybrána dráha pro hrubování. Rychlost simulace byla nastavena na minimum a bylo sledováno, zdali je dráha bezpečná (obr. 6.39).

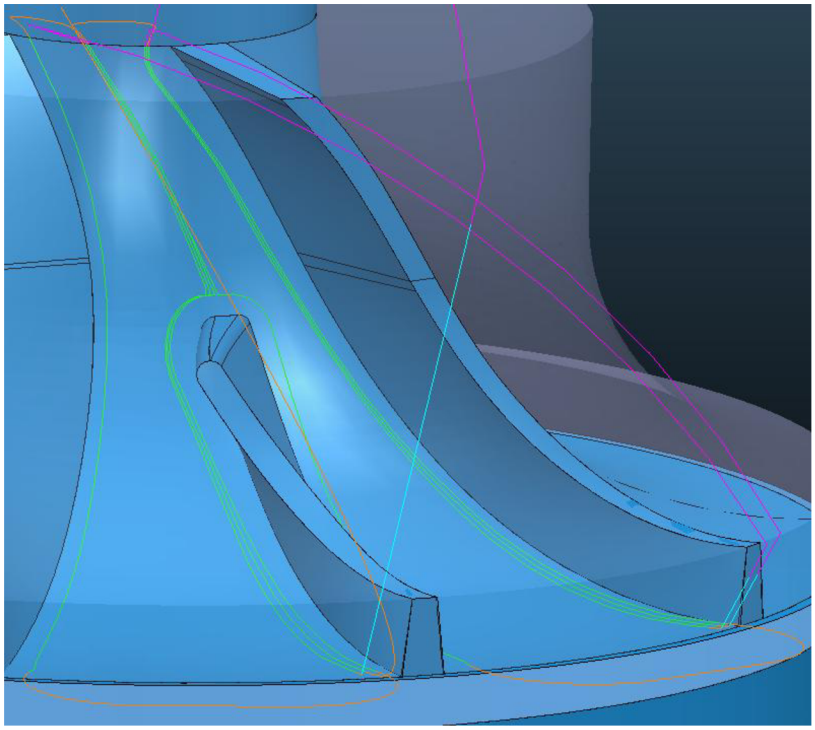
Po pečlivém sledování simulace bylo usouzeno, že dráha je bezpečná.



Obr. 6.39 Simulace obrábění.

Ještě před tím, než mohly být lopatky dokončeny, byly vyhrubovány rohy frézou Ø5 mm. To z toho důvodu, že po vyhrubování frézou Ø8 zůstalo v rozích větší množství materiálu.

Byla tedy opět vypočtena hrubovací dráha, tentokrát s frézou Ø5 mm. Po vypočtení dráhy byly vymazány přejezdy naprázdno a byly ponechány hrubovací dráhy pouze v rozích mezi lopatkami a středem kola (obr. 6.40).



Obr. 6.40 Hrubování rohů frézou Ø5.

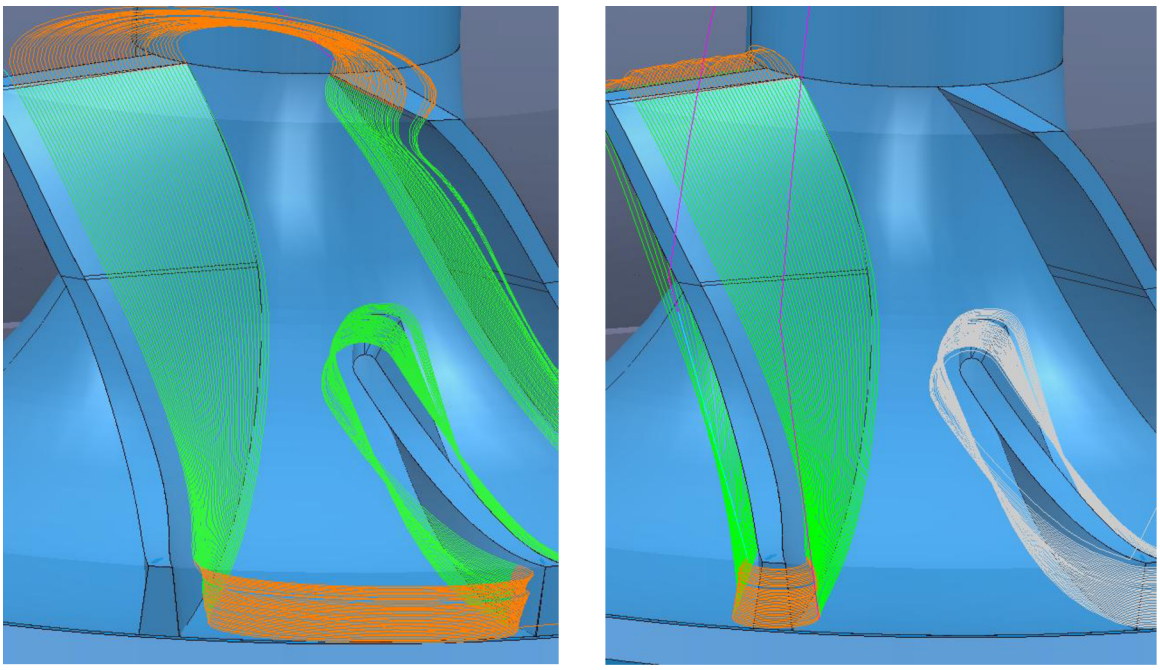
6.4.2 Dokončení lopatek

Okno pro dokončování lopatek vypadá naprosto stejně jako okno pro hrubování (viz. obr. 6.22) a obsahuje i stejné ovládací prvky. Po otevření okna pro dokončování bylo již vše automaticky vyplněno stejně jako v okně pro hrubování.

Nástrojem pro dokončování byla zvolena fréza Ø5. Byly změněny řezné podmínky dle tabulky 6.1. Pozměněny musely být také možnosti u elevace osy nástroje (viz. obr. 6.25). Elevace osy byla nastavena na radiální vektor pod úhlem 45°. Tato změna byla provedena proto, že je vyložení frézy Ø5 (35 mm) menší než u frézy Ø8 (45 mm) a upínač nástroje při tak malém vyložení kolidoval s lopatkami. Nastavením elevace osy na 45° byly tyto kolize vyřešeny. Osa nástroje tedy po celou dobu obrábění svírá s plochou stolu úhel 45°. Offset dráhy nástroje byl zvolen jako Protnutí (obr. 6.27). Výsledné dráhy po nástroji tedy opisují dráhu možného průtoku média lopatkovým kolem.

Jiné změny v okně pro dokončení lopatek provedeny nebyly a vše zůstalo nastaveno jako ve strategii pro hrubování.

Program nabízí dvě možnosti pro dokončení lopatek. První možností je dokončení jednoho mezilopatkového prostoru (obr. 6.41 a) a druhá možnost je dokončování samostatných lopatek - levá lopatka a potom mezilopatka (obr. 6.41 b). Byly spočteny obě metody a porovnány jejich časy.



a) b)

Obr. 6.41 a) Dokončení lopatek. b) Dokončení levé lopatky a mezilopatky.

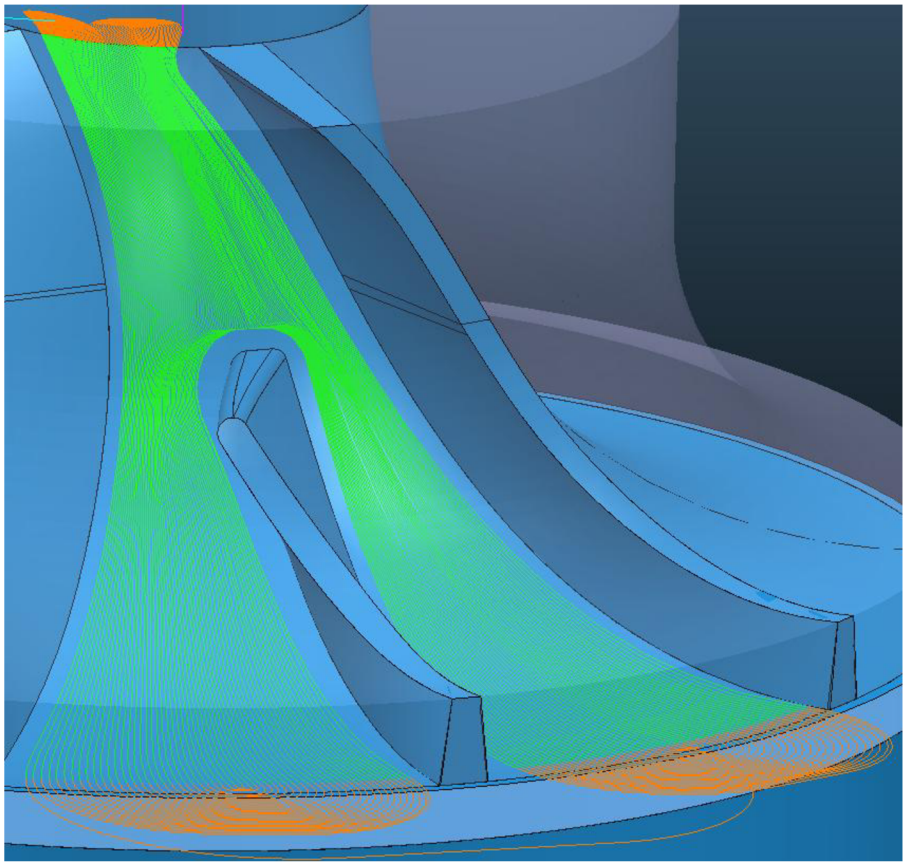
Dráha posledního přejezdu nástrojem (tedy dráha v rohu mezi lopatkou a středem kola) byla vymazána. To z toho důvodu, protože se nástroj při posledním přejezdu dotýká stěny lopatky i středu kola, kde je stále přídavek na obrábění a hrozí tak přetížení nástroje. Tento poslední přejezd nástrojem bude proveden při dokončení středu kola, kdy nástroj v posledním řezu pojede stejnou dráhu jako u posledního přejezdu při dokončení lopatky, který byl smazán. Nehrozí tedy, že by plochy v rozích nebyly dokončeny.

Přejezdy nástroje u středu kola byly odkloněny stejně jako u hrubování, aby nástroj nepřejížděl po již obrobené ploše (viz. obr. 6.37).

Po porovnání časů obrábění vychází lépe samostatné obrobení lopatek (viz. obr. 6.41 b), kde jsou krátké přejezdy mezi jednotlivými obráběcími drahami.

6.4.3 Dokončení středu

Okno pro dokončení středu je opět stejné jako okno pro hrubování kola nebo pro dokončení lopatek. Specifikace obrábění byly ponechány z dokončování lopatek. Jediná změna byla provedena u elevace osy nástroje. Elevace byla nastavena jako Normála středu. Z důvodů kolizí bylo nutné nastavit limity pro úhel elevace. Limity byly nastaveny od 15° do 50°. Dráha pro dokončení středu je v podstatě stejnou záležitostí jako hrubování jen s tím rozdílem, že byla dráha vypočtena pouze u středu kola (obr. 6.42).

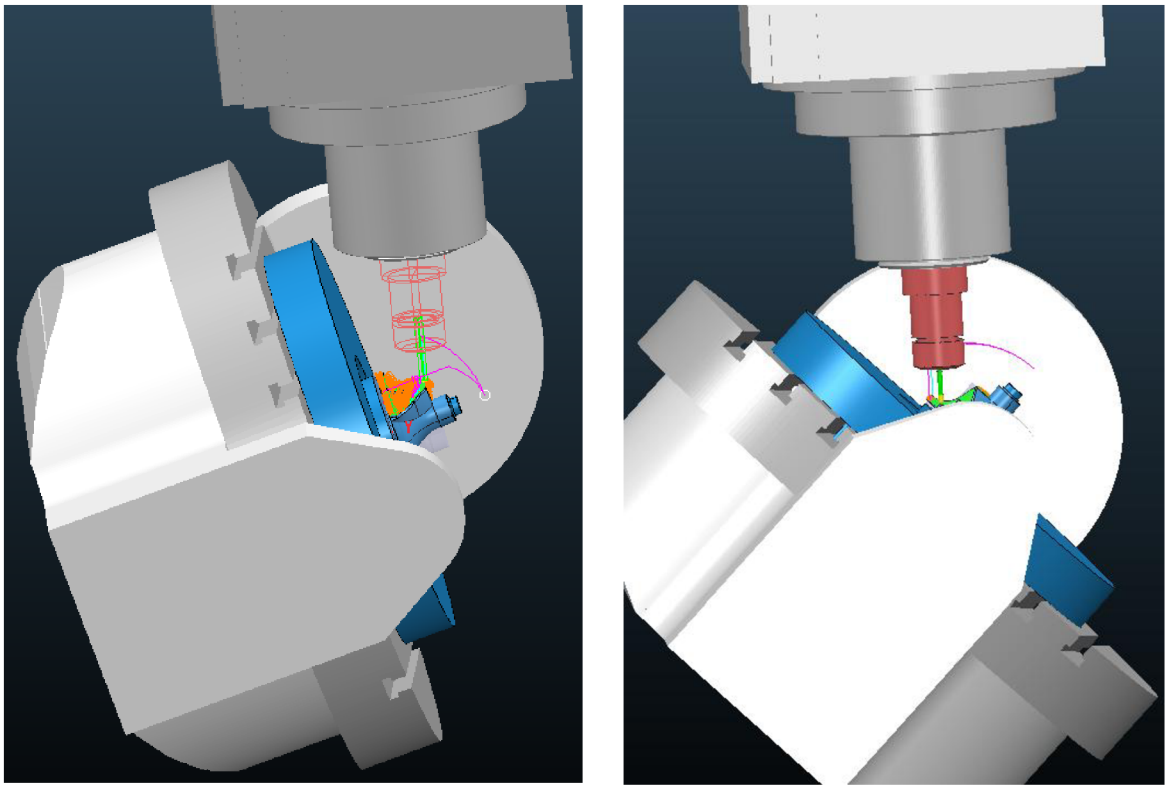


Obr. 6.42 Dráha pro dokončení středu.

Více obrázků vytvořených drah jsou v příloze.

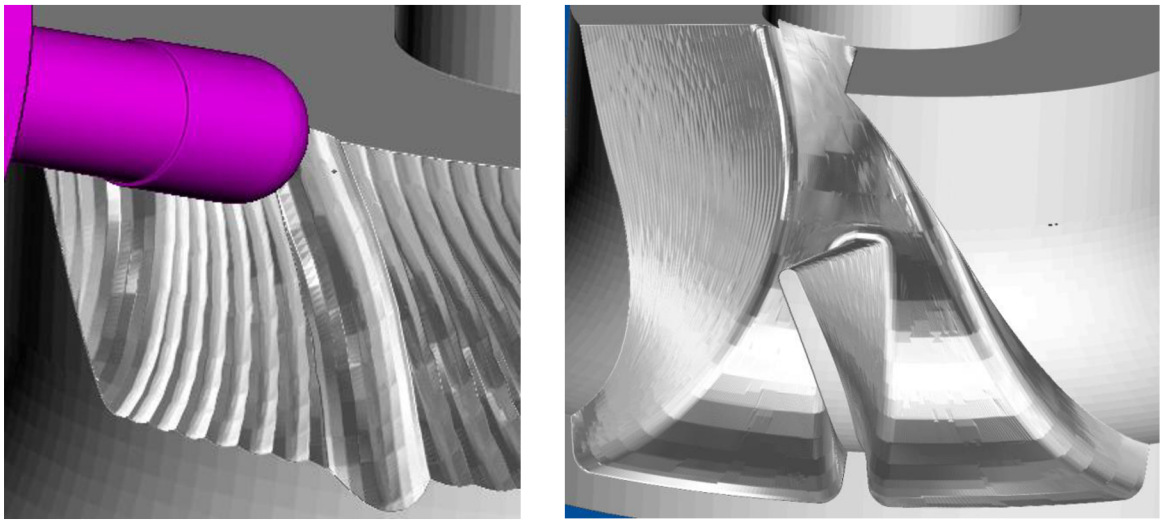
6.5 Simulace obrábění

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.4.1, pohyby stroje byly kontrolovány pomocí simulace. Simulace slouží pro ověření funkčnosti vytvořené dráhy a bezkolizního průběhu obrábění. Simulace byly použity pro každou vypočtenou dráhu (obr. 6.43 – 6.44).



a) b)

Obr. 6.43 a) Simulace hrubování (hodnota elevace osy nástroje 15°). b) Simulace dokončování lopatky (hodnota elevace osy nástroje 45°).

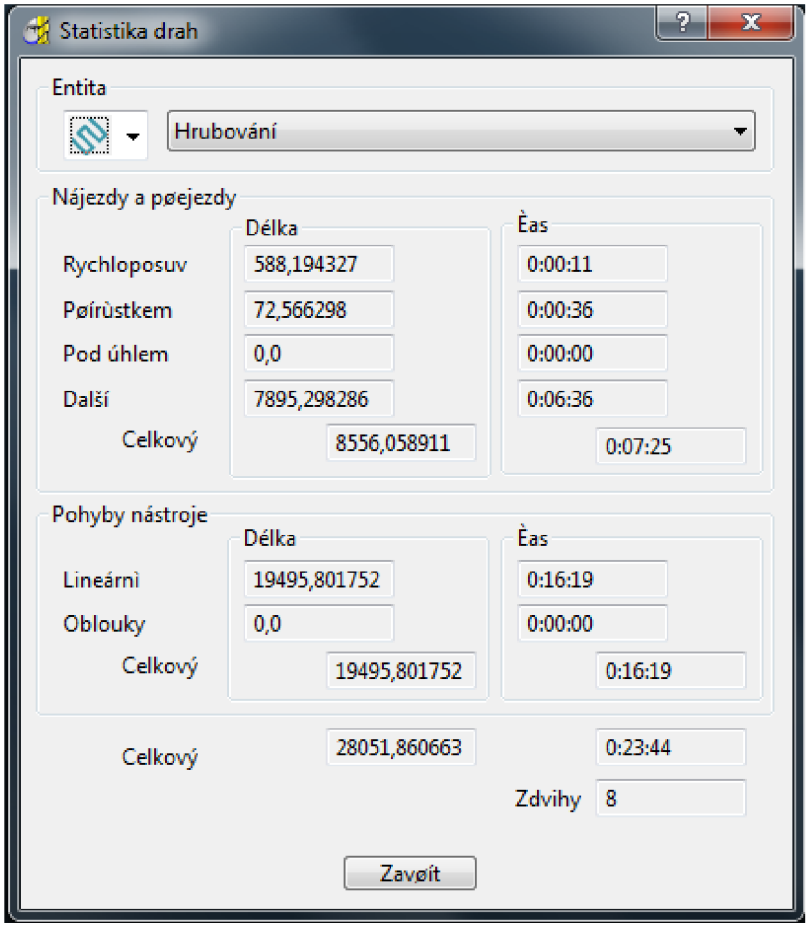


a) b)

Obr. 6.44 a) Simulace odebírání materiálu (viditelnost nástroje může být vypnuta). b) Výsledek simulace drah – od hrubování až po dokončování.

6.6 Strojní časy

V programu PowerMILL se strojní časy určují velice snadno. Klepnutím pravého tlačítka myši na vytvořenou dráhu ve stromu prohlížeče vyjede roletové menu, kde se zvolí možnost Statistika (obr. 6.45).



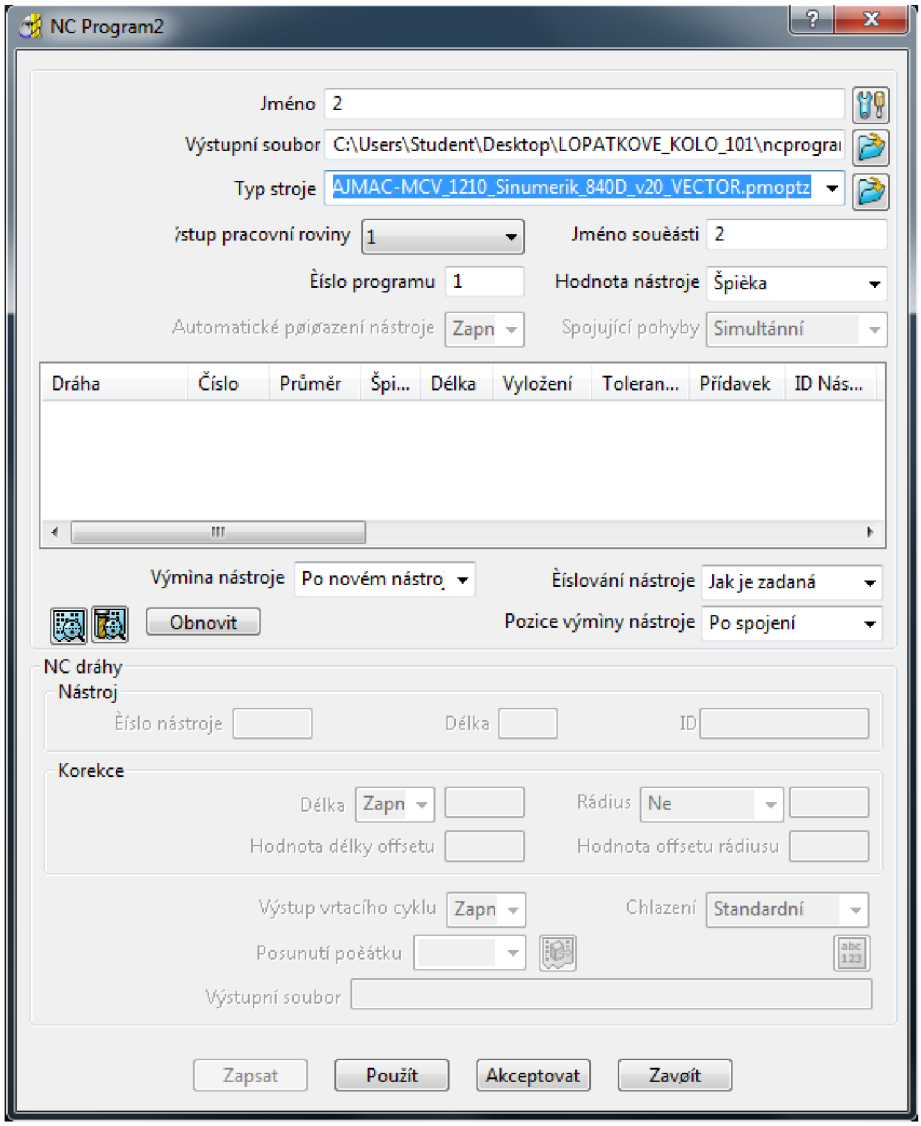
Obr. 6.45 Statistika vybrané dráhy.

Pomocí statistiky byly vytvářené dráhy upravovány tak, aby byl výsledný čas co nejkratší (velký podíl mají přejezdy mezi drahami nástroje v záběru).

Doba hrubování je tedy dle statistiky na obrázku 23 min 44 s.

6.7 Tvorba NC programů

Pro vytvoření NC programů se ve stromu prohlížeče klepne pravým tlačítkem na ikonu „NC programy“ a v roletovém menu se vybere možnost Vytvořit NC program. V okně pro nový NC program (obr. 6.46) byl vyplněn název programu, výstupní cesta pro zapsání programu (složka uloženého projektu), byl vybrán požadovaný postprocesor (Typ stroje) a jako poslední pracovní rovina, od které se tento program bude odvíjet (obr. 6.10). Po vyplnění těchto informací se kleplo na „Použít“ a poté na „Akceptovat“. Pro začlenění vytvořené dráhy (např. hrubování) do programu byla pomocí myši přetažena ikona dráhy ve stromu prohlížeče na ikonu vytvořeného NC programu. Poté se v roletovém menu vyvolaném kliknutím pravého tlačítka myši na ikonu vytvořeného NC programu vybrala možnost Zapsat. Po zapsání je vytvořený program možné nalézt v zadaném úložišti.



Obr. 6.46 Tvorba NC programu.

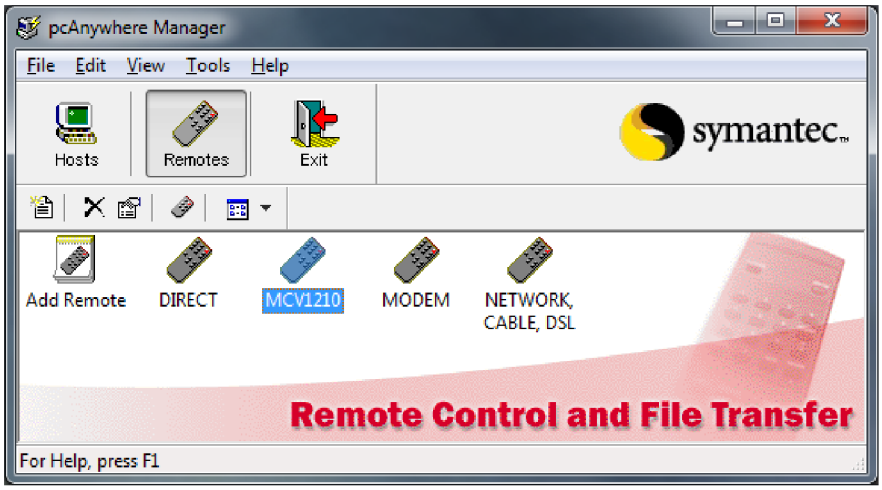
Ukázka vytvořeného NC programu pro hrubování je v příloze.

Do jednoho NC programu je možné zahrnout více vypočtených drah a lze určit jeho statistiku (viz. obr. 6.45). Pro zjištění doby trvání výroby jednoho mezilopatkového prostoru byly do jednoho NC programu vloženy tyto dráhy: hrubování, hrubování rohů, dokončení lopatek a dokončení středu. Po kontrole statistiky bylo zjištěno, že doba výroby je 41 min 32 s.

7 PŘENOS DAT DO OBRÁBĚCÍHO STROJE

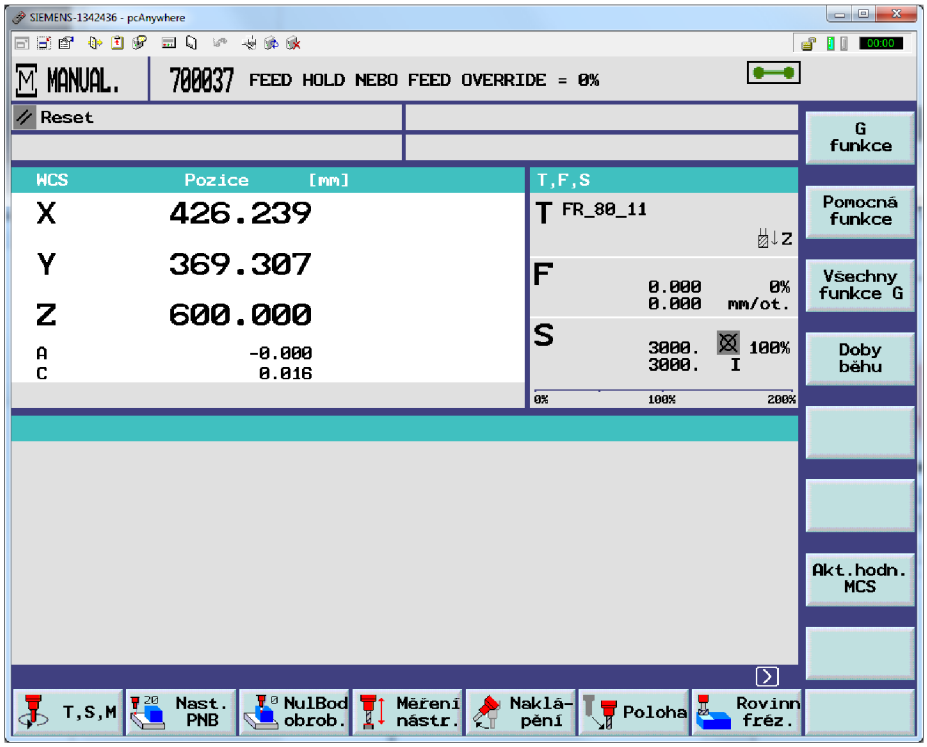
Stroj MCV 1210 pracuje s řídicím systémem SINUMERIK 840d.

Vytvořené soubory s NC programy mohou být do paměti stroje vloženy přímo na dílně pomocí flash disku, nebo pomocí dálkové diagnostiky po síti. Vkládání proběhlo přes dálkovou diagnostiku (obr. 7.1).



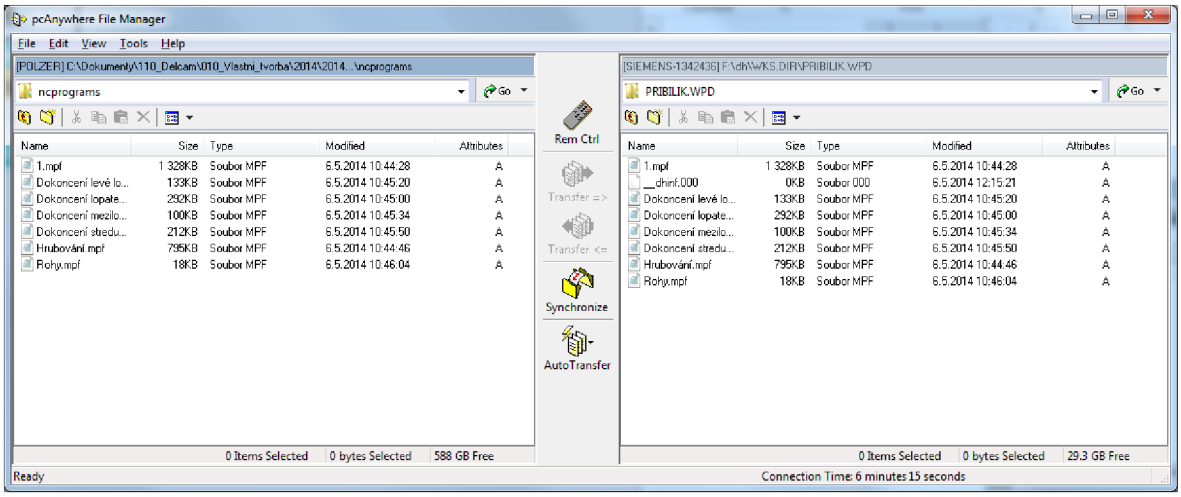
Obr. 7.1 Okno dálkové diagnostiky.

Po zpuštění diagnostiky bylo otevřeno pracovní prostředí systému SINUMERIK (obr. 7.2).



Obr. 7.2 Ovládací prostředí systému SINUMERIK.

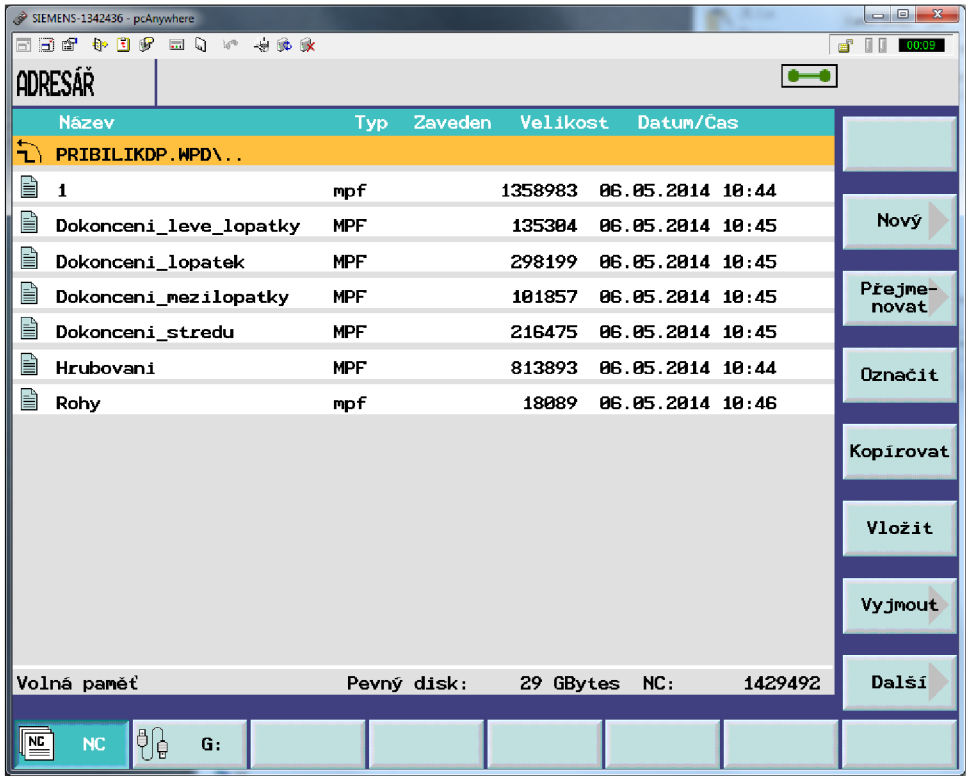
Pro vložení souborů s programy byla v adresáři Sinumeriku vytvořena nová složka. Do této složky byly následně zkopírovány soubory programů (obr. 7.3).



Obr. 7.3 Kopírování programových souborů do databáze stroje.

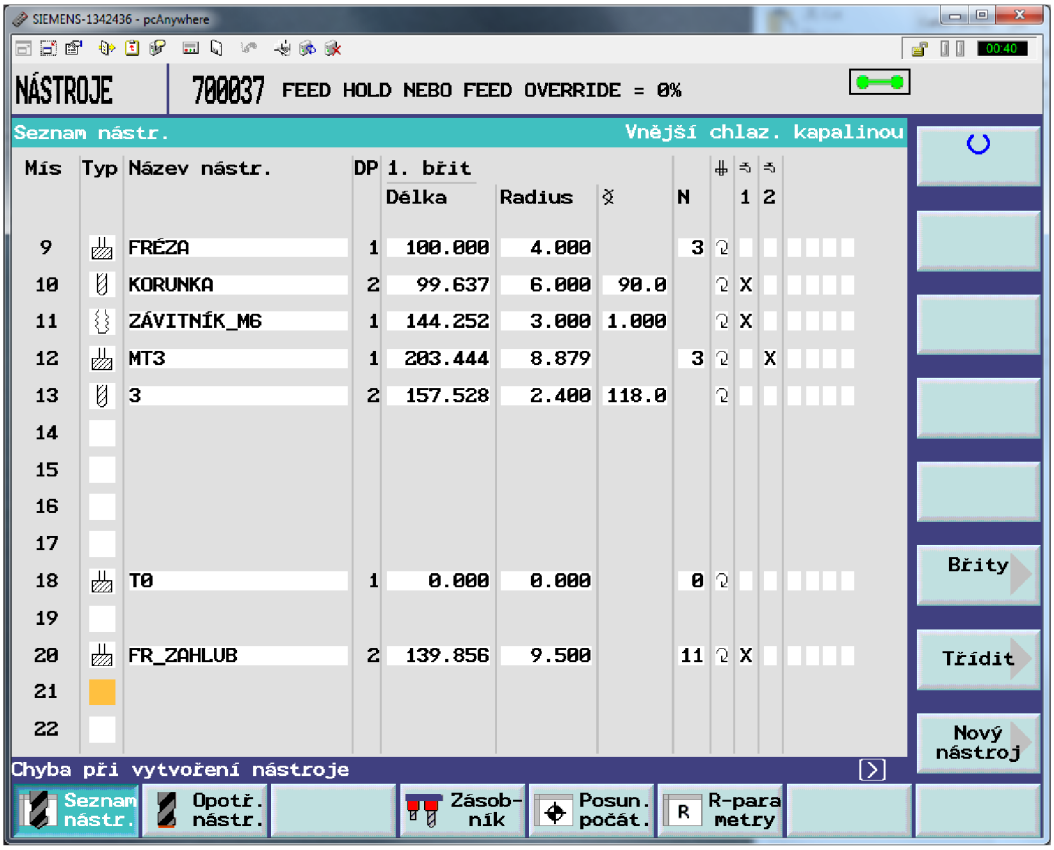
Levé okno na obrázku 7.3 je soubor s vytvořenými NC programy v PC a pravé okno je složka vytvořená v adresáři stroje. Všechny soubory v levém okně byly vybrány a pomocí tlačítka Transfer byly přesunuty do adresáře stroje.

Pro úspěšné vložení souborů s programy do adresáře Sinumeriku nesmí jejich název obsahovat háčky a čárky, jelikož je systém Sinumerik neumí přečíst. Dobré je také psát místo mezer mezi slovy podtržítko. Názvy programů byly tedy napsány bez háčků, čárek a mezer (např. Dokonceni_Leve_Lopatky). Po otevření adresáře programů v Sinumeriku byla nalezena složka se všemi vloženými programy (obr. 7.4).



Obr. 7.4 Složka s programy v adresáři.

Pro fungování programů je nutné do systémové databáze nástrojů zadat nástroje používané při obrábění (obr. 7.5).



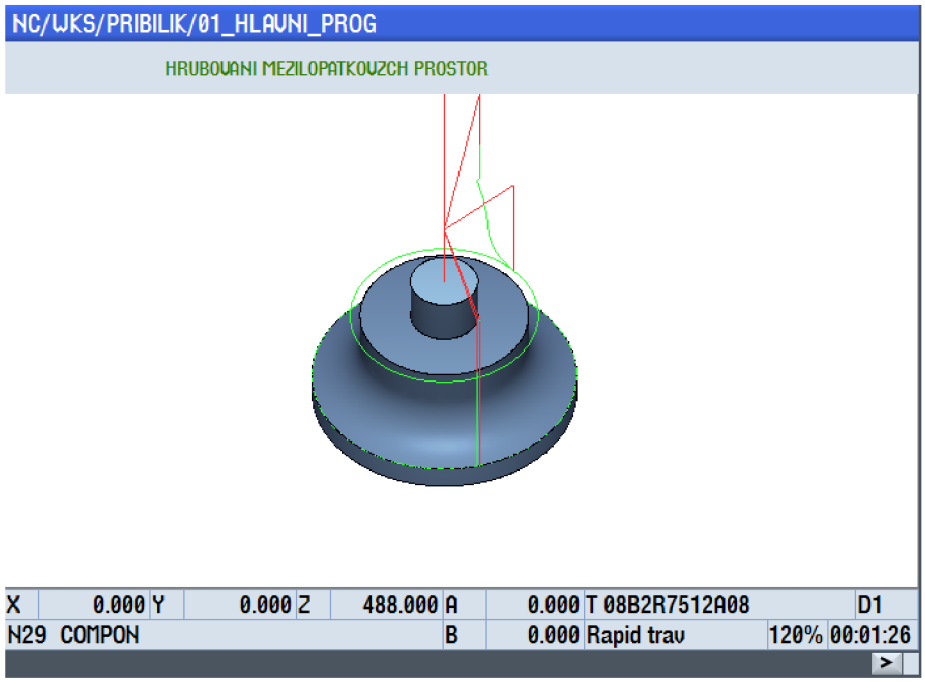
Obr. 7.5 Databáze nástrojů.

Do databáze byly tedy vloženy používané nástroje (08B2R7512A08 a 05B2R6009A05). Názvy nástrojů musí odpovídat názvům nástrojů zapsaných v NC programu a jsou omezeny počtem znaků tak, aby se vlezly do políčka pro název nástroje v databázi.

Po vložení nástrojů do databáze byla zkontrolována funkčnost programů. Pro kontrolu funkčnosti slouží simulace. Pro zahájení simulace byla otevřena libovolná složka s programem (např. Hrubovani) a poté se v pravém dolním rohu kleplo na ikonu Simulace. Simulátor programu Sinumerik však není schopen simulovat 5-osé obrábění, pouze tříosé. Simulátor tedy ukazoval, že program běží, ale odebírání materiálu nebylo znázorněno.

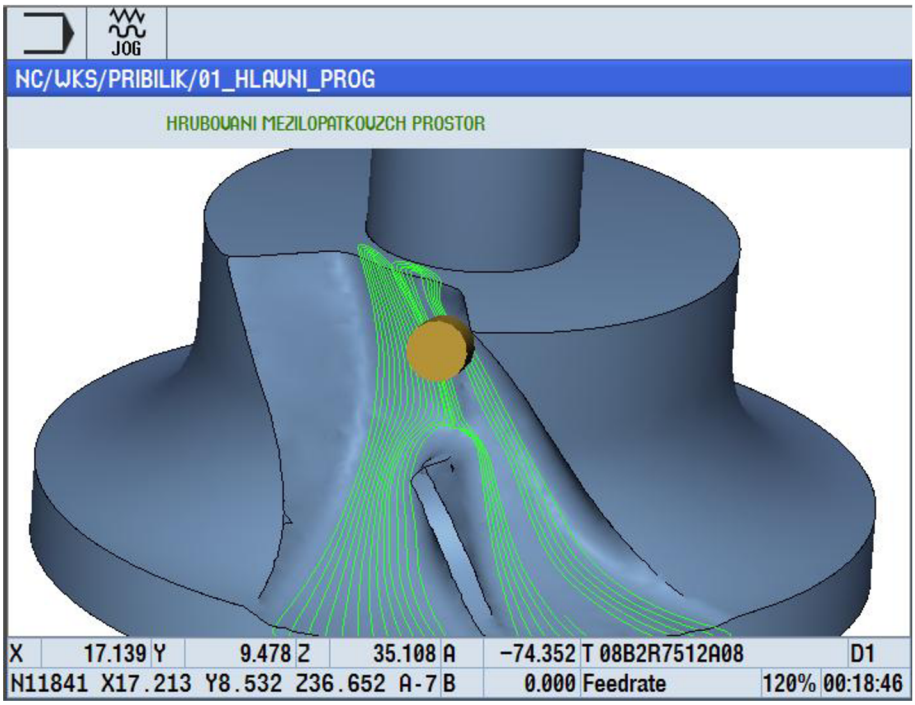
Pro znázornění odběru materiálu při simulaci NC programu byl použit software SinuTrain, což je výukový software pro SINUMERIK, který lze nainstalovat na PC. Jednu verzi tohoto programu lze zdarma stáhnout z internetu. Tento program obsahuje lepší vizualizační prvky v simulacích, než samotný Sinumerik – zvládá i 5-osé obrábění s odběrem materiálu.

Do programu SinuTrain byly tedy vloženy soubory NC programů a nástroje do nástrojových databází, stejně jako u systému Sinumerik. Následně byla spuštěna simulace. V SinuTrainu lze nastavit tvar obrobku. Obrobek může být nastaven jako válec nebo kvádr. Pro úplnou věrohodnost polotovaru pro lopatkové kolo byl vytvořen jednoduchý program v PowerMILLu pro vytvoření polotovaru kola z válce zadaného pro simulaci (obr. 7.6).



Obr. 7.6 Simulace programu pro vytvoření polotovaru lopatkového kola z válce.

Takto vytvořený polotovar není možné uložit a použít v simulaci jiného NC programu. Proto byl program pro tvorbu polotovaru sloučen s programem pro hrubování (viz. kapitola 7.1). Simulace hrubování tedy pokračovala na vytvořeném polotovaru (obr. 7.7).



Obr. 7.7 Simulace Hrubování v programu SinuTrain.

Po odsimulování NC programů vytvořených softwarem PowerMILL bylo usouzeno, že jsou programy funkční.

7.1 Zajištění obrobení celého kola

Jak je možné si všimnout v kapitole 6, dráhy nástroje a poté i NC programy byly vytvořeny pouze pro obrobení jedné lopatky (neboli jednoho mezilopatkového prostoru). Obrobení celého kola je možné zajistit přímo ve strategii pro tvorbu drah v PowerMILLu vybráním možnosti obrobení všech lopatek v roletovém menu položky „Obrábět“ (viz. obr. 6.22 pod definicemi lopatek). Následně vytvořený NC program by ale zabíral na disku 5x více místa, než program pro jednu lopatku (5x více proto, že lopatkové kolo má 5 lopatek). Takto velký soubor může například přesahovat paměťovou kapacitu stroje. Obrobení celého kola bylo tedy řešeno až po vytvoření NC programů pouze pro jednu lopatku.

Řešením pro obrobení celého kola je natáčení souřadného systému okolo osy Z, neboli otáčením osy C obráběcího stroje. Funkce pro natáčení souřadného systému je ROT, nebo AROT (aditivní rotace k předešlé rotaci).

Natáčení osy může být zajištěno několika způsoby. Funkce ROT může být zapsána přímo do NC programu před zahájením obrábění. Tento program by musel být ručně 5x spuštěn a hodnota rotace by musela být pokaždé přepisována (0, 72, 144…). Další možností je otáčení stolu přímo na stroji, kde by opět musel být po každém ukončení programu stůl ručně natočen. Třetí možností je vytvořit jednoduchý hlavní NC program, který bude volat jednotlivé NC programy jako podprogramy a natáčení bude zajištěno automaticky. Byl zvolen způsob vytvoření programu s automatickým natáčením souřadného systému.

Hlavní NC program může vypadat následovně:

```
MSG("POLOTOVAR PRO SIMULACI SINUTRAIN")
WORKPIECE(,,,"CYLINDER",0,0,65,-80,110)

POLOTOVAR

R1=0
LABEL1:
ROT X0 Y0 Z=R1
MSG("HRUBOVANI MEZILOPATKOVYCH PROSTOR")
HRUBOVANI
R1=R1+72
REPEAT LABEL1 P=4

R1=0
LABEL2:
ROT X0 Y0 Z=R1
MSG("HRUBOVANI ROHU")
ROHY
R1=R1+72
REPEAT LABEL2 P=4

R1=0
LABEL3:
ROT X0 Y0 Z=R1
MSG("DOKONCENI VELKE LOPATKY")
DOKONCENI_LEVE_LOPATKY
```

```
R1=R1+72
REPEAT LABEL3 P=4

R1=0
LABEL4:
ROT X0 Y0 Z=R1
MSG("DOKONCENI MEZILOPATKY")
DOKONCENI_MEZILOPATKY
R1=R1+72
REPEAT LABEL4 P=4

R1=0
LABEL5:
ROT X0 Y0 Z=R1
MSG("DOKONCENI STREDU")
DOKONCENI_STREDU
R1=R1+72
REPEAT LABEL5 P=4
M30
```

První řádek programu začínající MSG je pouze informativní poznámka, která je ukázána v průběhu obrábění na displeji stroje. Druhý řádek začínající slovem WORKPIECE určuje tvar polotovaru pro simulaci v softwaru SinuTrain. Následuje zavolání programu POLOTOVAR, který ze zadaného válce jako polotovaru v softwaru SinuTrain vytvoří polotovar pro lopatkové kolo (viz. obr. 7.6). Program POLOTOVAR by byl vynechán při skutečné výrobě kola – slouží jen pro simulaci. Řádek R1=0 značí proměnnou pro natáčení souřadného systému. LABEL1 označuje start jednoho bloku programu. Funkce ROT udává natáčení souřadného systému, kde natočení kolem osy X a Y je 0 a pro osu Z je to proměnná R1. Po funkci ROT následuje zavolání NC programu HRUBOVANI. Po dokončení hrubování se k R1 přičte hodnota 72 (tedy 72 stupňů k rotaci kolem osy Z). Řádek REPEAT udává, kolikrát má být blok programu LABEL1 zopakován (4x pokaždé s proměnnou R1 zvětšenou o hodnotu 72). Po zopakování bloku LABEL1 dle zadaného počtu opakování pokračuje program na LABEL2 zahrnující hrubování rohů. Blok LABEL2 je opět 5x zopakován pokaždé s otočením osy C o 72°. Program pokračuje ve stejném duchu až po dokončení středu. Tímto způsobem je tedy zajištěno celkové obrobení kola.

Pro správnost natáčení souřadného systému byly pro jistotu v každém NC programu zahrnutém v hlavním programu odstraněny cykly 800 (transformace souřadného systému). Cykly 800 v programech neobsahovaly žádné informace a jejich vyřazení nijak neovlivnilo funkčnost programu. Cykly lze odstranit smazáním, nebo napsáním středníku na začátek řádku s cyklem a tento řádek bude brán pouze jako poznámka.

Simulátor SinuTrainu nebyl bohužel schopen tento program odsimulovat kvůli technickým problémům. Ověření funkčnosti by se tedy provedlo přímo na obráběcím stroji při spuštění naprázdno. V případě nefunkčnosti tohoto programu by byl aplikován jiný způsob natáčení osy.

8 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ VÝROBY

Cena výroby lopatkového kola byla vypočítána z dostupných informací.

Hodinová sazba stroje (hss):	1200	Kč/hod.
Celková cena nástrojů (cn):	1000	Kč
Pracovník (p):	300	Kč/hod.
Polotovar kola (mk):	180	Kč

Cena polotovaru kola je přibližná průměrná cena od různých výrobců polotovarů z hliníkových slitin. Polotovarem je myšlen přířez z tyče Ø110 s délkou 60 mm.

Čas (t) pro obrobení jednoho mezilopatkového prostoru byl určen v kapitole 6.7 a je přibližně 43,5 minuty.

Náklady pro frézování lopatek se tedy spočítají vztahem:

$$N = 5 \cdot t \cdot \left(\frac{hss}{60} + \frac{p}{60}\right) + cn + mk\ [Kč] \tag{8.1}$$

$$N = 5 \cdot 43{,}5 \cdot \left(\frac{1200}{60} + \frac{300}{60}\right) + 1000 + 180 = 6617{,}5\ Kč$$

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvoření modelů lopatkových kol a následné vytvoření obráběcích drah pro vybrané kolo. Pro modelování byl zvolen CAD software CATIA V5R20 a pro tvorbu drah nástroje byl zvolen CAM software PowerMILL 2014, disponující strategiemi určenými výhradně pro obrábění lopatkových kol.

Bylo vytvořeno celkem 5 modelů lopatkových kol – tři odstředivá kola, jedno radiální kolo a jedno axiální kolo. Pro tvorbu obráběcích drah bylo zvoleno odstředivé lopatkové kolo s mezilopatkami, jako typická součást vyžadující obrábění v pěti osách. Rozměry tohoto lopatkového kola byly limitovány dle materiálového vybavení dílen VUT FSI. Polotovarem byl určen přířez z duralové tyče o průměru 110 mm. Zbylá čtyři lopatková kola byla vytvořena za účelem možného využití ve výuce softwaru PowerMILL.

Pro práci v softwaru PowerMILL byl vytvořen model upínače pro lopatkové kolo. Byly také vybrány dvě kulové frézy – Ø8 pro hrubování a Ø5 pro dokončování. Strojem pro výrobu kola bylo zvoleno obráběcí centrum MCV 1210 od firmy TAJMAC. Vše bylo určeno dle vybavení dílen VUT FSI za účelem možného vyrobení lopatkového kola pro reklamní účely.

Do softwaru PowerMILL byly vloženy všechny potřebné modely (lopatkové kolo, upínač, stroj, nástroje a upínač nástrojů) pro napodobení skutečné výrobní sestavy. PowerMILL umožňuje kontrolu kolizí mezi nástrojem a jednotlivými modely. Byly tedy nastaveny různé vlastnosti určitým modelům pro zajištění bezkolizního průběhu obrábění (ignorovat, kontrolovat na kolize, obrábět). Následně byly vypočteny dráhy pro hrubování, dokončení lopatek a dokončení středu kola. Po vypočtení drah byly upraveny přejezdy mezi drahami nástroje v záběru tak, aby strojní časy byly co nejkratší a aby byly pohyby stroje co nejplynulejší. Pro kontrolu bezkolizního průběhu obrábění bylo využito simulací obrábění.

Vytvořené dráhy byly pomocí postprocesoru převedeny na NC programy. Tyto NC programy byly přeneseny a otestovány v řídicím systému stroje Sinumerik 840d. Pro lepší vizualizační simulaci byly NC programy také otestovány v softwaru SinuTrain – výukovém softwaru pro Sinumerik.

Z dostupných informací o cenách byla spočítána cena za výrobu lopatkového kola ve výši 6 617 Kč.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. LOGAN, Earl Jr. a Ramendra ROY. *Handbook of Turbomachinery.* Second edition revised and expanded. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. ISBN: 0-8247-0995-0
2. DIXON, L. S. B.Eng. Ph.D. a C. A. HALL Ph.D. *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery.* Seventh Edition. Elsevier, Inc., 2014. ISBN 978-0-12-415954-9
3. INGRAM, Grant. *Basic Concepts in Turbomachinery.* Ventus Publishing, ApS, 2009. ISBN 978-87-7681-435-9
4. KADRNOŽKA, Jaroslav. *Lopatkové stroje.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. ISBN 80-7204-297-1
5. GORLA, Rama S. R. a Aijaz A. KHAN. *Turbomachinery: Design and Theory.* New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. ISBN 0-8247-0980-2
6. KORPELA, Seppo A. *Principles of Turbomachinery.* New Jersey: John Willey & Sons, Inc., 2011. ISBN 978-0-470-53672-8
7. PUBLIC RESEARCH INSTITUTE. *Hydro Turbines* [online]. [vid. 2014-03-11]. Dostupné z: www.publicresearchinstitute.org/Pages/hydroturbines/hydroturbines.html
8. GIAMPAOLO, Tony. *Gas Turbine Handbook: Principles and Practice.* 4th Edition. Lilburn: The Fairmont Press, Inc., 2009. ISBN 0-88173-614-7
9. NASA. *Types of Gas Turbines* [online]. 2008 [vid. 2014-03-12]. Dostupné z: www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/trbtyp.html
10. KULTZ, Myer. *Mechanical Engineers' Handbook.* Third edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. Energy and Power. ISBN 978-0-471-44880-4
11. Concepts NREC. *Pumps* [online]. [vid. 2014-03-18]. Dostupné z: www.conceptsnrec.com/Resources/Photo-Gallery/Pumps.aspx
12. PTÁČEK, L. a kolektiv. *Nauka o materiálu II.* 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. ISBN 80-7204-248-3
13. STROJÍRENSKÉ MATERIÁLY A TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ. *Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli.* Podklady do cvičení předmětu HMT VUT Brno.
14. KHATAK, H. S. a Baldev RAJ. *Corrosion of Austenitic Stainless Steels: Mechanism, Mitigation and Monitoring.* Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2002. ISBN 1-85573-613-6
15. HOSFORD, William F. *Iron and Steel.* New York: Cambridge University Press, 2012. ISBN 978-1-107-01798-6
16. MÜLLER, Ulrich. *Introduction to Structural Aluminium Design.* Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. ISBN 978-184995-007-7
17. MICHNA, Štefan a spol. *Encyklopedie hliníku.* Prešov: Adin, s.r.o., 2005. ISBN 80-89041-88-4
18. PRVKY. *Hliník* [online]. 2009-13 [vid. 2014-03-20]. Dostupné z: www.prvky.com/13.html

19. LÜTJERING, G. a J. C. Williams. *Titanium.* Second Edition. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-71397-5
20. LOSERTOVÁ, Monika. *Titan a jeho slitiny* [online]. 2009-10 [vid. 2014-04-02]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/637/soubory/TialloyAuto_W.pdf
21. LOSERTOVÁ, Monika. *Kovy II* [online]. 2007-13 [vid. 2014-04-02]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/637/soubory/KOVYII_Ni_VT_IMC.pdf
22. ATEAM. *Nikl a Titan* [online]. [vid. 2014-04-02]. Dostupné z: www.ateam.zcu.cz/Nikl_titan.pdf
23. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Základní metody obrábění – 1. část* [online]. 2004 [vid. 2014-04-03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/zakl_met_obr/zakl_met_obr_1.pdf
24. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění – 1. část* [online]. 2003 [vid. 2014-04-03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
25. YOUSSEF, A. Helmi a Hassan EL-HOFY. *Machining Technology: Machine Tools and Operations.* Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2008. ISBN 978-1-4200-4339-6
26. DAVIN, J. Paulo. *Modern Machining Technology: A practical guide.* Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011. ISBN 978-0-85709-099-7
27. HUMÁR, Anton. *Výrobní technologie II* [online]. [vid. 2014-04-03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/VyrobniTechnologie_II.pdf
28. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9
29. DASSAULT SYSTÉMES. *O společnosti 3DS* [online]. [vid. 2014-04-10]. Dostupné z: www.3ds.com/cz-cz/o-spolecnosti-3ds/
30. TAJMAC-ZPS. *Obráběcí centrum MCV 1210* [online]. 2012 [vid. 2014-04-15]. Dostupné z: www.zps.cz/cs/MCV-1210
31. CAD/CAM. *MCV 1210 – technická data* [online]. [vid. 2014-04-15]. Dostupné z: http://cadcam.fme.vutbr.cz/powermill/databaze/stroje/MCV1210_tech_data.doc.pdf
32. DELCAM. *Fakta o Delcamu* [online]. [vid. 2014-04-15]. Dostupné z: www.delcam.cz/Doc/Delcam_factsheet_cz.pdf
33. WIKIPEDIA. *Logo firmy Delcam* [online]. [vid. 2014-04-15]. Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/f/f5/%22Delcam_Logo%22.png
34. PRAMET. *Monolitní frézy* [online]. [vid. 2014-04-2]. Dostupné z: www.pramet.com/cz/produkty/frezovani/monolitni-frezy.html
35. SolidCAM. *Simultanious 5-Axis Milling* [online]. 2014 [vid. 2014-04-18]. Dostupné z: www.solidcam.com/us/cam-solutions/simultaneous-5-axis-milling/

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
Al	[-]	Hliník
Be	[-]	Berilium
Co	[-]	Kobalt
Cr	[-]	Chrom
Cu	[-]	Měď
Fe	[-]	Železo
Mn	[-]	Hořčík
Mo	[-]	Molybden
N	[-]	Dusík
Nb	[-]	Niob
Ni	[-]	Nikl
O	[-]	Kyslík
Ta	[-]	Tantal
Ti	[-]	Titan
Zr	[-]	Zirkonium

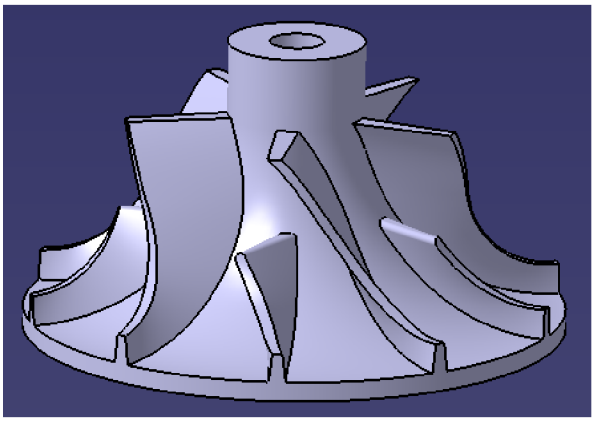
Symbol	Jednotka	Popis
$\mathbf{C_{Fc}}$	[-]	Konstanta pro výpočet řezné síly
D	[mm]	Průměr
$\mathbf{F_{ci}}$	[N]	Řezná síla
N	[Kč]	Náklady
$\mathbf{a_e}$	[mm]	Radiální hloubka řezu
$\mathbf{a_p}$	[mm]	Axiální hloubka řezu
cn	[Kč]	Cena nástrojů
$\mathbf{f_z}$	[mm]	Posuv na zub
$\mathbf{h_i}$	[mm]	Tloušťka třísky
hss	[Kč/hod.]	Hodinová sazba stroje
$\mathbf{k_{ci}}$	[MPa]	Měrná řezná síla
mk	[Kč]	Cena polotovaru kola

n	[min^{-1}]	Otáčky
p	[Kč/hod.]	Plat pracovníka
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
x	[-]	Exponent vlivu tloušťky třísky
φ_i	[°]	Úhel ostří v záběru

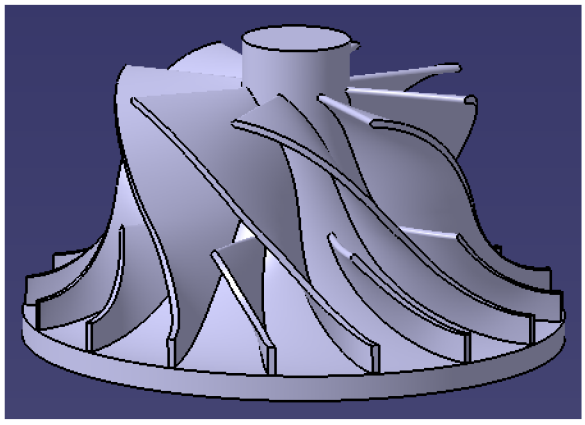
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Obrázky modelů lopatkových kol.
Příloha 2	Obrázky strategií pro obrobení lopatkového kola.
Příloha 3	Ukázka NC programu pro hrubování.
Příloha 4	Výkres polotovaru lopatkového kola.
Příloha 5	Výkres upínače pro obrobení lopatkového kola.
Příloha 6	Sestava upínače s lopatkovým kolem.
Příloha 7	Modely lopatkových kol – na CD.
Příloha 8	Projekt obrábění lopatkového kola programu PowerMILL s vytvořenými NC programy – na CD.

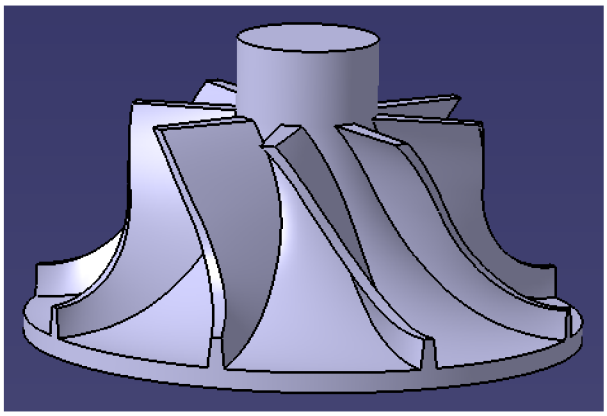
PŘÍLOHA 1 – OBRÁZKY MODELŮ LOPATKOVÝCH KOL



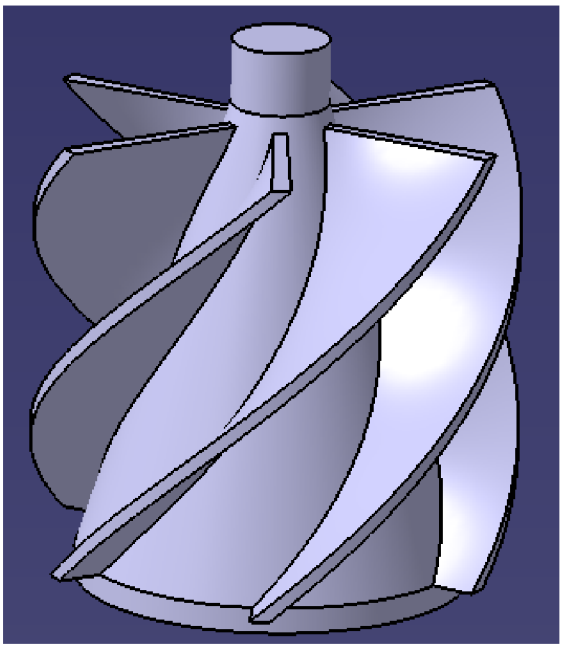
Obr. 1 Odstředivé lopatkové kolo s mezilopatkami.



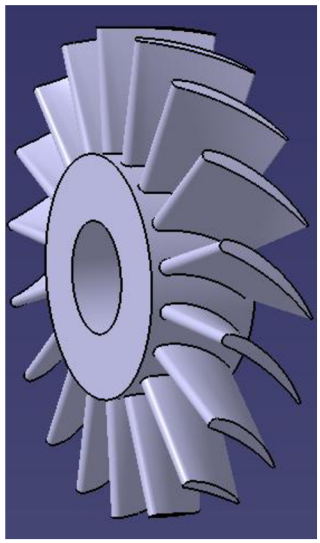
Obr. 2 Odstředivé lopatkové kolo s mezilopatkami.



Obr. 3 Odstředivé lopatkové kolo bez mezilopatek.

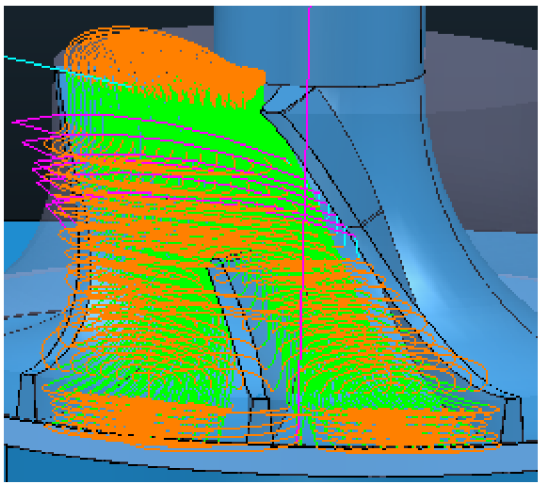


Obr. 4 Radiální lopatkové kolo.

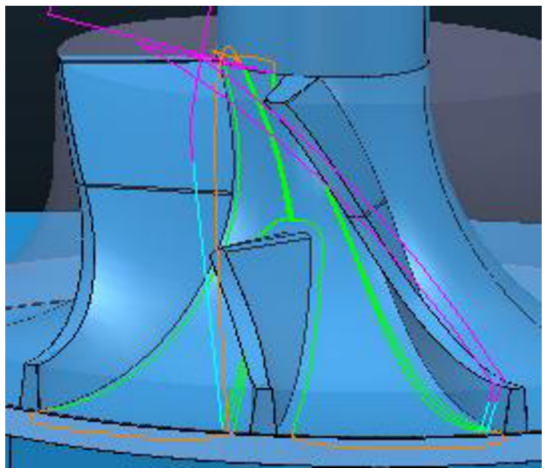


Obr. 5 Axiální lopatkové kolo.

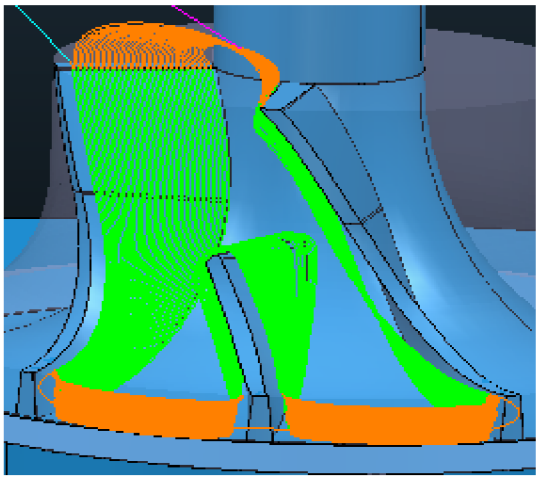
PŘÍLOHA 2 – OBRÁZKY STRATEGIÍ PRO OBROBENÍ LOPATKOVÉHO KOLA



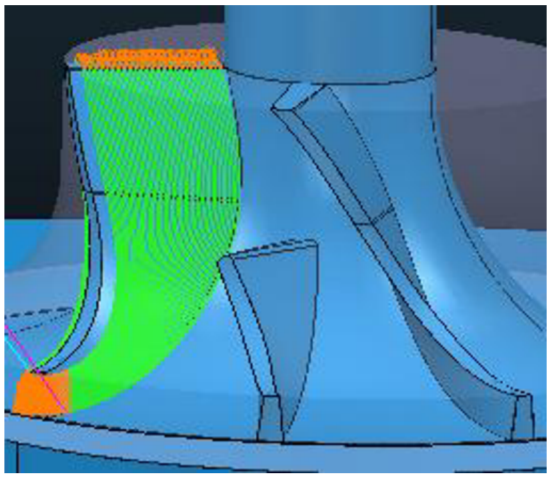
Obr. 1 Hrubování.



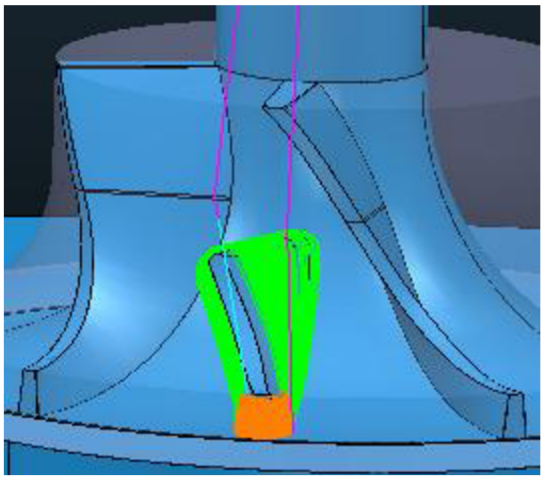
Obr. 2 Hrubování rohů.



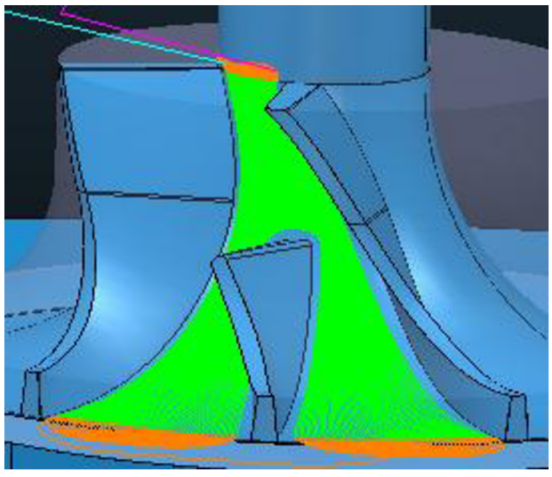
Obr. 3 Dokončení lopatek.



Obr. 4 Dokončení velké lopatky.



Obr. 5 Dokončení mezilopatky.



Obr. 6 Dokončení středu.

PŘÍLOHA 3 – UKÁZKA NC PROGRAMU PRO HRUBOVÁNÍ

```
;%_N_HRUBOVANI_MPF
N1 ; ================================
N2 ; TAJMAC-ZPS MCV 1210 Siemens 840D
N3 ; PROJEKT            : LOPATKOVE_KOLO_101
N4 ; DATUM              : 16.04.2014
N5 ; CAS              : 10:04:34
N6 ; VYCHOZI PRAC.ROVINA : 1
N7 ; ================================
N8 G71 G90 G64 G17
N9 G642
N10 FFWON
N11 TRAFOOF
N12 ; CYCLE800()
N13 G0 A0.0 C0.0
N14 ; ================================
N15 ; MSG ("Hrubování")
N16 ; ================================
N17 ; NAZEV NASTROJE  : 08B2R7512A08
N18 ; PRUMER NASTROJE    : 8
N19 odjezd_Z ; MAKRO
N20 T="08B2R7512A08"
M6
N21 G54
N22 R1=119 ;   ZANOROVACI POSUV
N23 R2=1194 ;   PRACOVNI POSUV
N24 R3=3000 ;   NEJKRATSI PREJEZDY
N25 S5968 M3
N26 ; ================================
N27 ; CYCLE800(1,"STUL",0,57,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1)
N28 ; CYCLE800()
N29 COMPON
N30 $MA_COMPRESS_POS_TOL[X]=0.1
N31 $MA_COMPRESS_POS_TOL[Y]=0.1
N32 $MA_COMPRESS_POS_TOL[Z]=0.1
N33 odjezd_Z ; MAKRO
N34 M8
N35 ORIWKS
N36 TRAORI
N37 G0 A0.0 C0.0
N38 G0 X0.0 Y0.0 Z95.0 A0.0 C0.0 F=R3
N39 G0 X10.958 Y0.161 Z94.366 A-9.372 C-89.029
N40 G0 X21.77 Y0.319 Z92.472 A-18.743
N41 G0 X32.291 Y0.473 Z89.343 A-28.115
N42 G0 X42.38 Y0.621 Z85.021 A-37.486
N43 G0 X51.904 Y0.761 Z79.564 A-46.858
N44 G0 X60.735 Y0.89 Z73.044 A-56.23
N45 G0 X68.755 Y1.008 Z65.549 A-65.601
```