

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2024

**ZBYNĚK
MALEC**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

**ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A
METROLOGIE**

Návrh a výroba upínání lopatkového kola

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Zbyněk Malec

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Jiří Sommer

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Malec** Jméno: **Zbyněk** Osobní číslo: **501295**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a výroba upínání lopatkového kola

Název bakalářské práce anglicky:

Design and manufacturing of impeller clamping

Pokyny pro vypracování:

Úvod do problematiky výroby lopatkových kol.
Požadavky na upnutí lopatkového kola.
Konstrukční návrh upínacího přípravku.
Výroba přípravku s využitím CAM softwaru.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **12.10.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **02.01.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jiří Sommer
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Sommera, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Sommerovi za pomoc a cenné rady v průběhu vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za neustálou podporu při studiu.

Anotace

Tato bakalářská práce se v teoretické části věnuje principu a funkci turbodmychadel ve spalovacích motorech a také pracovním podmínkám kompresorového a turbínového kola turbodmychadla, ze kterých vyplývají požadavky na jejich výrobu. Dále se teoretická část zabývá materiály a výrobními technologiemi těchto kompresorových a turbínových kol turbodmychadel. Následující kapitola práce se podrobně věnuje způsobům programování CNC strojů a tvorbě NC kódů.

Experimentální část této bakalářské práce se věnuje konstrukčnímu návrhu a výrobě upínacího přípravku kinematické obálky kompresorového kola turbodmychadla. Dále je v této části práce vypracován výrobní postup dané kinematické obálky lopatkového kola a dílu potřebného ke kontrole přesnosti upnutí polotovaru v daném upínacím přípravku.

Název bakalářské práce:	Návrh a výroba upínání lopatkového kola
Autor práce:	Zbyněk Malec
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Sommer
Akademický rok:	2023/2024
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí ústavu:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Rozsah práce:	98 stránek, 37 tabulek, 65 obrázků
Klíčová slova:	upínání lopatkového kola, kinematická obálka, turbodmychadlo, programování CNC strojů, konstrukce a výrobní postup

Annotation

In the theoretical part, this bachelor thesis is devoted to the principle and function of turbochargers in internal combustion engines, as well as the working conditions of the compressor impeller and turbine impeller of turbochargers, which determine the requirements for their production. Furthermore, the theoretical part deals with the materials and production technologies of these compressor and turbine impellers of turbochargers. The following chapter of the thesis is devoted in detail to the methods of programming of CNC machines and the creation of NC codes.

The experimental part of this bachelor thesis is devoted to the constructional design and the production of the clamping part of the kinematic envelope of the compressor impeller of a turbocharger. Furthermore, this part of the thesis elaborates the production procedure of the given kinematic envelope of the impeller and the production procedure of the part necessary for the checking of the accuracy of the clamping of the workpiece in the given clamping part.

Title of the bachelor thesis: Design and manufacturing of impeller clamping
Author: Zbyněk Malec
Supervisor: Ing. Jiří Sommer
Academic year: 2023/2024
University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department: 12134 – Department of Machining, Process Planning and Metrology
Head of department: Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Extent: 98 pages, 37 tables, 65 pictures
Keywords: impeller clamping, kinematic envelope, turbocharger, programming of CNC machines, design and manufacture

Obsah

1. Úvod a cíl práce	11
2. Lopatková kola a jejich využití.....	11
2.1 Turbodmychadla spalovacích motorů	11
2.1.1 Pracovní podmínky turbodmychadla	13
2.1.2 Popis radiálního kompresorového kola.....	14
3. Výroba lopatkových kol.....	15
3.1 Materiály používané na výrobu lopatkových kol.....	15
3.2 Výrobní technologie lopatkových kol	16
3.2.1 3D tisk lopatkových kol.....	16
3.2.2 Odlévání lopatkových kol	18
3.2.3 Obrábění lopatkových kol.....	20
4. Programování CNC strojů.....	22
4.1 Ruční programování.....	23
4.2 Dílenské programování.....	24
4.3 Strojní programování CAD/CAM.....	25
5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	27
5.1 Cíle experimentální části.....	27
5.2 Volba výrobní technologie	27
5.3 Požadavky na konstrukci upínacího přípravku	28
5.4 Volba materiálu upínacího přípravku	28
5.5 Slitina hliníku 7075 - T6.....	29
5.6 Návrhy konstrukce upínacího přípravku.....	30
5.6.1 Varianta 1	30

5.6.2	Varianta 2	31
5.6.3	Varianta 3	32
5.6.4	Varianta 4	33
5.6.5	Varianta 5	34
5.7	Vícekritériální porovnání a zhodnocení navržených konstrukčních variant upínacích přípravků.....	35
5.8	Výrobní postup všech dílů varianty 4	35
5.8.1	Výrobní postup hřídele	36
5.8.2	Seznam nástrojů použitých na výrobu těla upínacího přípravku, dílu na měření radiálního házení a kinematické obálky lopatkového kola	38
5.8.3	Výrobní postup těla upínacího přípravku	40
5.8.4	Výrobní postup dílu na měření radiálního házení	57
5.8.5	Výrobní postup kinematické obálky lopatkového kola	71
6.	Závěr	85
7.	Bibliografie	86
8.	Seznam tabulek	88
9.	Seznam obrázků	90
10.	Seznam příloh.....	93

Seznam použité symboliky a zkratek

NC		Numeric Control
CNC		Computer Numeric Control
obr.		obrázek
č.		číslo
3D		třídimenzionální
SLA		Stereolitografie
PBF		Powder Bed Fusion
SLM		Selective Laser Melting
EBM		Electron Beam Melting
PPC		Parabolic Performance Cutting
CAM		Computer Aided Manufacturing
CAD		Computer Aided Design
CL data		Cutter Location data
CBN		kubický nitrid boru
VBD		vyměnitelná břitová destička
HSS		High Speed Steel (rychlořezná ocel)
v_c	$[m \cdot \text{min}^{-1}]$	řezná rychlost
$f_{ot.}$	$[mm \cdot \text{ot.}^{-1}]$	posuv na otáčku
ot.		otáčka
a_p	$[mm]$	hloubka řezu

1. Úvod a cíl práce

Cílem teoretické části této práce je shromáždit relevantní informace o využití a zejména výrobě lopatkových kol. Součástí teoretické části práce je základní popis funkce a provozních podmínek turbodmychadel ve spalovacích motorech a také popis konstrukce radiálního kompresorového kola. V kapitole o výrobě lopatkových kol je věnována pozornost materiálům, ze kterých se lopatková kola vyrábí, a výrobním technologiím používaným na jejich výrobu. Podrobně je v této části popsána výroba lopatkových kol třískovým obráběním. Navazující kapitola se zabývá NC programy, které řídí chod CNC strojů a způsoby, kterými lze tyto NC programy vytvářet.

Experimentální část této práce se zabývá návrhem upínání a výrobního postupu kinematické obálky lopatkového kompresorového kola turbodmychadla spalovacího motoru. Jednotlivé návrhy upínání jsou porovnány pomocí vícekritériálního hodnocení. Následně je vypracován detailní výrobní postup dílů tohoto upínacího přípravku, kinematické obálky lopatkového kola a dílu potřebného na měření kvality upnutí polotovaru v upínacím přípravku.

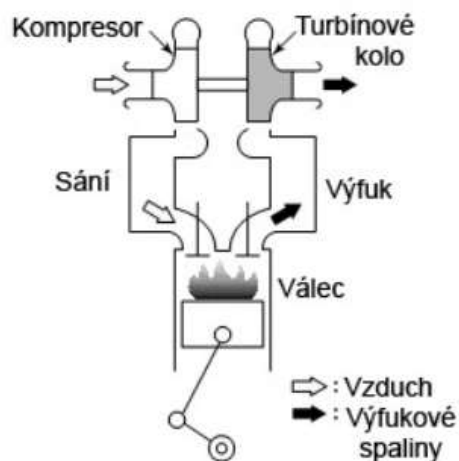
Přílohy této bakalářské práce obsahují výrobní výkresy všech vyráběných dílů a výkres celé sestavy.

2. Lopatková kola a jejich využití

Různé druhy lopatkových kol se používají v kompresorech, odstředivých čerpadlech, leteckých motorech, jako turbíny elektráren a v turbodmychadlech spalovacích motorů. Lopatková kola slouží zejména k přeměně energie proudící tekutiny na rotační pohyb či naopak. K této změně energie dochází pomocí rotoru s lopatkami. Tento rotor nazýváme lopatkovým kolem. [1]

2.1 Turbodmychadla spalovacích motorů

Základní funkcí turbodmychadel ve spalovacích motorech je přívod většího množství vzduchu do válců motoru, kde vlivem vyššího množství kyslíku dochází k dokonalejšímu spalování, které má za následek zvýšený výkon motoru, sníženou spotřebu paliva a s tím spojenou sníženou produkci emisí. [2]

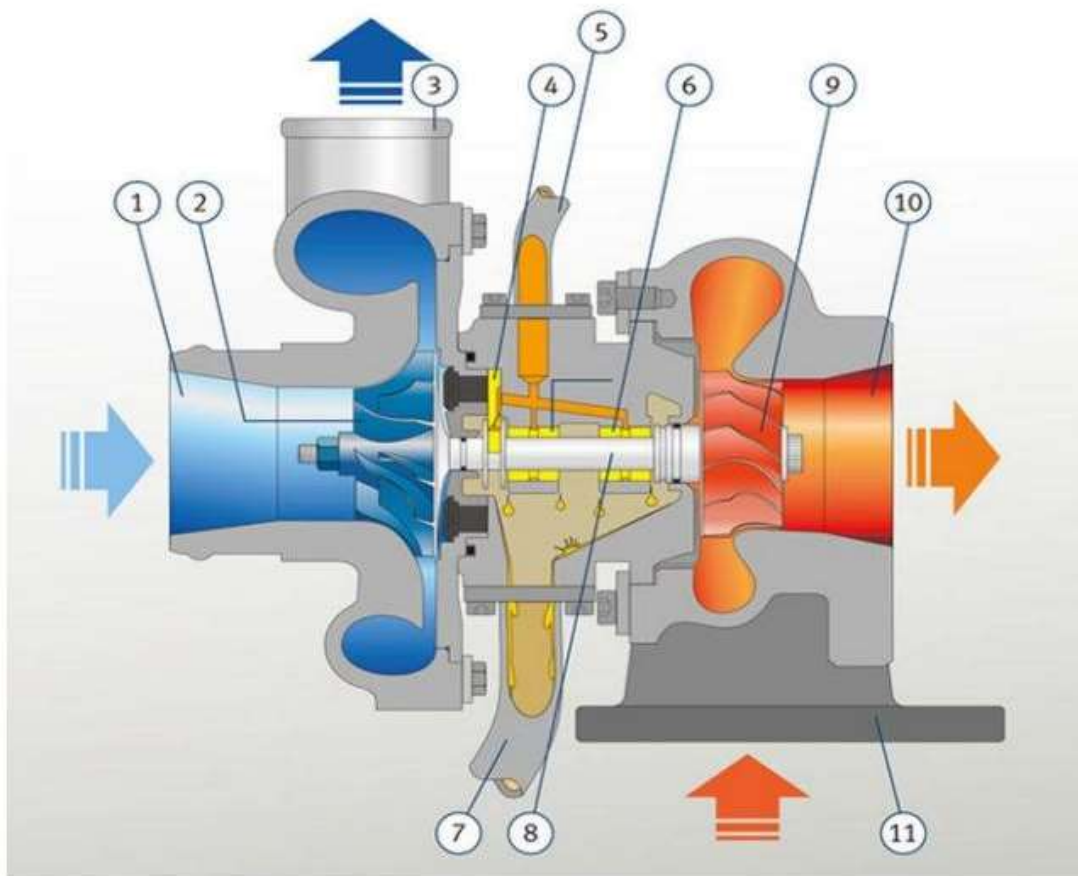


Obrázek 1: Schéma turbodmychadla automobilu [12]

Turbodmychadlo se skládá ze dvou hlavních částí, z kompresorové a turbínové. Kompresorová část je na obr. 2 zobrazena modře a turbínová část oranžově. Jiné členění rozděljuje turbodmychadlo na statorovou a rotorovou část. Do statorové části patří ložisková, kompresorová a turbínová skříň. Rotorová část turbodmychadla zahrnuje kompresorové kolo, turbínové kolo a hřídel, se kterou jsou obě kola pevně spojena. Hřídel je obvykle uložena v kuličkových či hydrodynamických kluzných ložiskách. Tato ložiska jsou mazána motorovým olejem, který snižuje tření a zároveň zastává funkci chladící kapaliny. Aby motorový olej nevnikl do kompresorové či turbínové části, tak jsou obě tyto části turbokompresoru utěsněny pomocí pístních kroužků nebo labyrintového těsnění.

V turbínové části kinetická energie spalin roztáčí turbínové kolo turbodmychadla. Tento rotační pohyb se hřídelí přenáší na kompresorové kolo, které tak zvyšuje tlak a teplotu přiváděného vzduchu do válců motoru.

[2] [3]



Obrázek 2: Řez turbodmychadlem [3]

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

2.1.1 Pracovní podmínky turbodmychadla

Rotorová část turbodmychadla, tedy kompresorové kolo, turbínové kolo a hřídel, pracují za velmi vysokých otáček. Otáčky těchto komponent dosahují 50 až 240 tisíc otáček za minutu. Kvůli takto vysokým otáčkám je kladen velký důraz na rozměrovou přesnost a co nejnižší hodnoty radiálního házení těchto lopatkových kol. Takto vysoké otáčky způsobují také komplikace v oblasti mazání hřídele spojující obě tato lopatková kola. Největší riziko zadření tohoto mechanismu nastávalo po vypnutí motoru, kdy se lopatková kola vlivem setrvačnosti ještě dlouho otáčela, ale přívod mazání byl již zastaven. Proto jsou tyto součásti turbodmychadla v současnosti mazány ještě určitou dobu po vypnutí motoru. [2] [4]

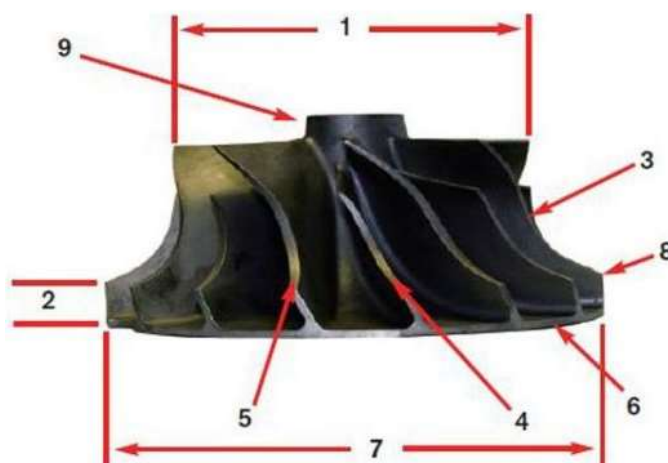
Pracovní teploty turbínového a kompresorového kola se výrazně liší. Turbínové kolo pracuje za teplot okolo 800 °C. Což má vliv i na materiály, ze kterých se turbínová kola turbodmychadel vyrábějí. Naopak kompresorové kolo turbodmychadla pracuje za teplot výrazně nižších a okolní vzduch, který toto kolo vhání do motoru má výrazný chladicí efekt. Problém ale může nastat při přerušovaném provozu, kdy nedochází k dostatečnému chlazení kompresorového kola a teplo z turbínové části turbodmychadla může ohřát kompresorovou část. Při aplikaci turbodmychadla v přerušovaném provozu je tedy vhodné použít kompresorové kolo z materiálu s menší tepelnou roztažností, aby rozměry kompresorového kola zůstaly konstantní.

[2] [4]

2.1.2 Popis radiálního kompresorového kola

Na obrázku č. 3 je zobrazeno radiální kompresorové kolo. Jedná se o polootevřené kolo s dozadu zakřivenými lopatkami. Tento druh lopatkových kol pracuje dobře i při vysokých průtocích tekutiny a ve větším rozptylu otáček. Efektivnější práci při vysokých otáčkách umožňují tomuto typu lopatkových kol dělicí lopatky. Tyto lopatky lze vidět na obr. č. 3.

[2]



Obrázek 3: Popis radiálního kompresorového kola [2]

Legenda:

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

3. Výroba lopatkových kol

3.1 Materiály používané na výrobu lopatkových kol

Materiál lopatkových kol se volí primárně dle pracovního prostředí a podmínek. Například na lopatková kola v leteckých motorech a na turbíny elektráren se používají niklové slitiny, protože vydrží působení extrémně vysokých teplot. Příkladem takového materiálu je Inconel 718.

Dále se tato kapitola bude věnovat materiálům používaným na lopatková kola turbodmychadel. Jak je již v kapitole 2.1.1 o pracovních podmínkách turbodmychadla zmíněno, tak turbínové a kompresorové kolo pracuje za rozdílných teplot. Teploty na turbínovém kole se pohybují okolo 800 °C, z tohoto důvodu se volí za materiál turbínových kol žárupevné legované oceli. Důvodem, proč se na turbínová kola automobilů používají žárupevné oceli namísto niklových slitin je jejich výrazně nižší cena.

Kompresorová kola turbodmychadel se nejčastěji vyrábí ze dvou materiálů, z hliníkových slitin nebo ze slitin titanu. Obecně je teplota na kompresorovém kole výrazně nižší než na kole turbínovém. Ačkoli kompresí vzduchu stlačovaného kompresorovým kolem roste i teplota stlačovaného vzduchu až na teplotu okolo 180 °C, tak teplota spalin roztáčejících turbínové kolo je výrazně vyšší. Kompresorová kola ze slitin hliníku jsou na většinu aplikací vhodná, pouze pokud se předpokládá, že turbodmychadlo bude pracovat ve velmi přerušovaném provozu, tak je vhodnější použít kompresorové kolo ze slitiny titanu. Slitiny titanu jsou teplotně odolnější. Výjimkou je slitina γ -TiAl, která je tak teplotně odolná, že se používá na turbínová kola turbodmychadel. [5] [6]

Kromě pracovního prostředí a podmínek ovlivňují výběr vhodného materiálu i technologické vlastnosti materiálů, například zda je daný materiál dobře obrobitelný, nebo zda tvoří kvalitní odlitky. V neposlední řadě hraje zásadní roli ve výběru materiálů jejich cena. [7] [8] [9]

3.2 Výrobní technologie lopatkových kol

Lopatková kola lze vyrábět třemi výrobními technologiemi:

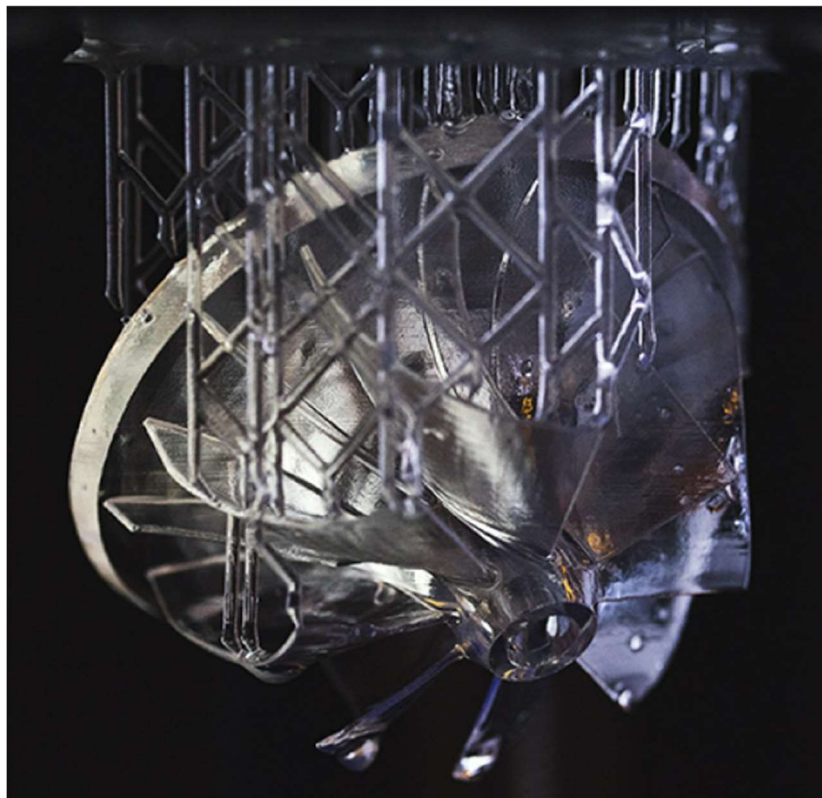
- Třískovým obráběním
- Sléváním
- 3D tiskem

Výroba lopatkových kol 3D tiskem v současné době vyjma prototypů není běžná, ale výroba lopatkových kol touto technologií je možná a do budoucna nabízí potenciál většího využití i v této oblasti.

3.2.1 3D tisk lopatkových kol

Některé zkušební prototypy je možné vyrábět pomocí 3D tisku plastů. Pro 3D tisk plastových lopatkových kol je především vhodná výrobní metoda stereolitografie (SLA). Touto metodou je možné vyrábět plastové díly s nejvyšší tvarovou přesností a nejlepší úrovní detailů.

[10] [11]



Obrázek 4: Lopatkové kolo vyrobené z čiré pryskyřice metodou SLA [11]

Výroba kovových lopatkových kol 3D tiskem je realizována primárně výrobními metodami spadajícími pod název Powder Bed Fusion (PBF). Tento pojem zahrnuje více výrobních technologií 3D tisku, které spékají drobný kovový prášek v pracovním prostoru tiskárny zejména laserem, nebo jedním, či více elektronovými paprsky. Pojem Powder Bed Fusion zahrnuje například metody SLM (Selective Laser Melting) či EBM (Electron Beam Melting) a další technologie 3D tisku.

I kovový 3D tisk se používá primárně na výrobu prototypů lopatkových kol. V současné době ale vzniká mnoho odborných studií zabývajících se zkoumáním a zlepšováním mechanických vlastností 3D tištěných výrobků.

Mezi problémy, se kterými se 3D tištěné výrobky potýkají, patří například výrazné zbytkové napětí, které je do celého objemu materiálu vneseno při samotném 3D tisku součásti. Metodou, jak tato zbytková napětí snížit je aplikace následného tepelného zpracování. Snížení zbytkových napětí způsobuje prodloužení únavové životnosti výrobku. Další problémy, které 3D tisk obnáší je porozita, vysoká drsnost povrchu a rozměrová nepřesnost tištěných výrobků. Části tištěných kovových výrobků se často následně obrábí, aby bylo dosaženo potřebné jakosti povrchu.

Technologie 3D tisku nabízí ale i řadu výhod. Umožňuje výrazné optimalizace tvaru dílů, které jsou jinými technologiemi nevyrobitelné. Jedná se především u různé druhy odlehčených struktur, které dokáží v ideálním případě výrazně snížit hmotnost daných součástí při zachování požadujících mechanických vlastností, nebo lze jedním 3D tištěným dílem nahradit více součástí vyráběných konvenčními technologiemi.

Lopatková kola, která by byla vyráběna 3D tiskem by mohla obsahovat malé vnitřní dutiny a odlehčenou strukturou v méně namáhaných oblastech. Tyto změny v konstrukci by vedly k nižší hmotnosti lopatkových kol a nižší hmotnost by způsobila žádoucí snížení momentu setrvačnosti lopatkových kol.

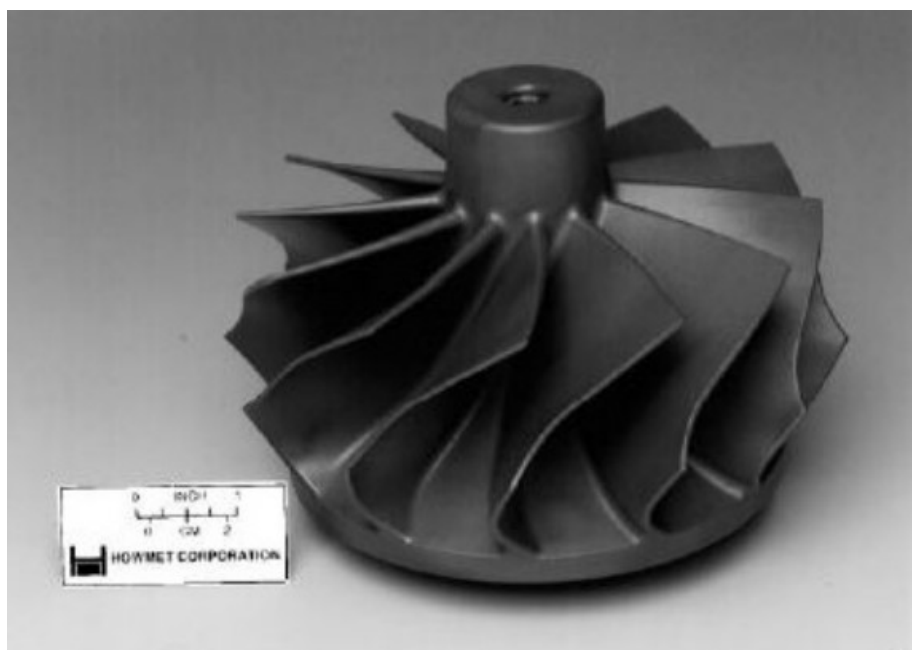
[10] [11]

3.2.2 Odlévání lopatkových kol

Další technologií, kterou lze vyrábět lopatková kola je technologie slévání. Tato kapitola je rozdělena na dvě části. Nejprve je zde krátce zmíněné odlévání slitiny γ -TiAl, která se díky své odolnosti vůči vysokým teplotám používá na odlévání turbínových kol turbodmychadel automobilů. A druhá část této kapitoly je věnována metodě semi-solid casting, pomocí které jsou odlévána kompresorová kola turbodmychadel ze slitin hliníku. Další metodou, kterou lze úspěšně odlévat lopatková kola je technologie vytavitelných modelů.

Odlévání lopatkových kol ze slitin γ -TiAl

Turbínová kola turbodmychadel automobilů lze odlévat ze slitin γ -TiAl, díky těmto lehkým slitinám má turbínové kolo výrazně nižší hmotnost než turbínová kola vyrobená z běžnějších materiálů, např. žárupevných legovaných ocelí, což výrazně zlepšuje rychlost odezvy a vede k rychlejší akceleraci vozidla a obecně lepším jízdním vlastnostem. Tyto slitiny se odlévají ve vakuových indukčních pecích a jejich odolnost vůči vysokým teplotám umožňuje jejich použití pro výrobu turbínových kol turbodmychadel. [5] [6] [12]



Obrázek 5: Turbínové kolo automobilového turbodmychadla odlité ze slitiny γ –TiAl [5]

Odlévání lopatkových kol metodou semi-solid casting

Další metodou odlévání lopatkových kol je odlévání v polotuhém stavu (semi-solid casting). Odlévání v polotuhém stavu je moderní technologií odlévání slitin hliníku a hořčíku, jedná se o modifikaci vysokotlakého lití. Při této metodě se kov, který je z 25 až 50 % tuhý a z 50 až 75 % kapalný, vstříkne pod vysokým tlakem do kalené kovové formy. Plnění formy probíhá neturbulentně. Hlavní výhody této metody slévání jsou: schopnost odlévat přesné rozměry, vysoká produktivita výroby, vynikající rozměrová opakovatelnost a schopnost odlévat tenké stěny. Na rozdíl od klasického vysokotlakého lití odlitky vykazují lepší strukturální a mechanickou integritu, výrazně nižší zbytkovou pórovitost, která vede ke zlepšení mechanických vlastností odlitků. Touto metodou je možné vyrábět vysoce kvalitní lopatková kola turbodmychadel, která obsahují výrazně menší množství vad a téměř nulovou pórovitost oproti lopatkovým kolům vyrobeným metodou plaster casting. Po odlití podstupují lopatková kola tepelné zpracování, které zvyšuje jejich pevnost, životnost a odolnost proti únavovým vadám. Lopatková kola odlévaná metodou semi-solid casting vykazují srovnatelnou únavovou životnost s lopatkovými koly tvářenými a následně obráběnými a výrobní náklady na takto odlévaná kola jsou nižší. [13]



Obrázek 6: Kompresorové lopatkové kolo turbodmychadla o průměru 85 mm vyrobené ze slitiny hliníku metodou semi – solid casting [13]

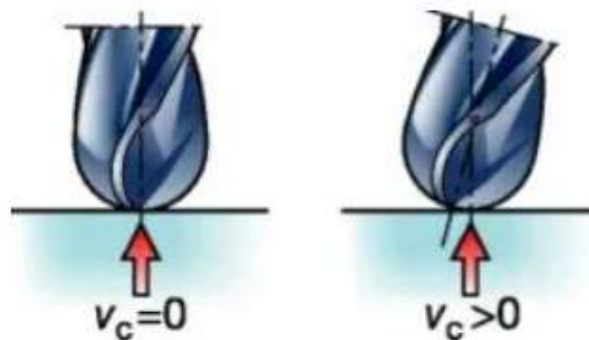
3.2.3 Obrábění lopatkových kol

Lopatková kola automobilových turbodmychadel se často vyrábějí z polotovarů ve formě kruhových tyčí. Nejprve je z původního tyčového polotovaru vyroben meziprodukt – kinematická obálka lopatkového kola. Kinematická obálka lopatkového kola je rotační díl, který má tvar lopatkového kola, ale neobsahuje vyfrézované lopatky. Kinematická obálka je obráběna metodou soustružení, aby bylo dosaženo co nejvyšší přesnosti rotačního dílu a radiální házení bylo co nejnižší. Výroba kinematické obálky ve vysoce sériové výrobě je rozdělena na dvě fáze oddělené přeupnutím dílu do protivřeten, aby nástroje měly přístup k celému tvaru kinematické obálky. Při kusové a malosériové výrobě lze postupovat obdobně jako v experimentální části této bakalářské práce, buď vytvořením přípravku na upnutí polotovaru, aby bylo upnutí polotovaru i z druhé strany pevné, stabilní a přesné, nebo vyrobít kinematickou obálku na jedno upnutí s výrazně vyšší spotřebou materiálu a výrazně delším časem obrábění.

Druhá fáze výroby lopatkového kola spočívá ve vyfrézování lopatek do kinematické obálky lopatkového kola. Lopatky se vyrábí technologií víceosého frézování, do které patří čtyřosé a pětiosé frézování. Přidaná jedna nebo dvě rotační osy na víceosé frézce umožňují natočení obrobku vůči ose nástroje. Obecné výhody, které víceosé obrábění nabízí jsou následující: zkrácení času obrábění, redukce přeupínání dílu a tím dosažení lepší přesnosti, zlepšení kvality povrchu a zejména obrobení tvarově složitých dílů, které by byly na tříosém frézovacím stroji nevyrobitelné. [14]

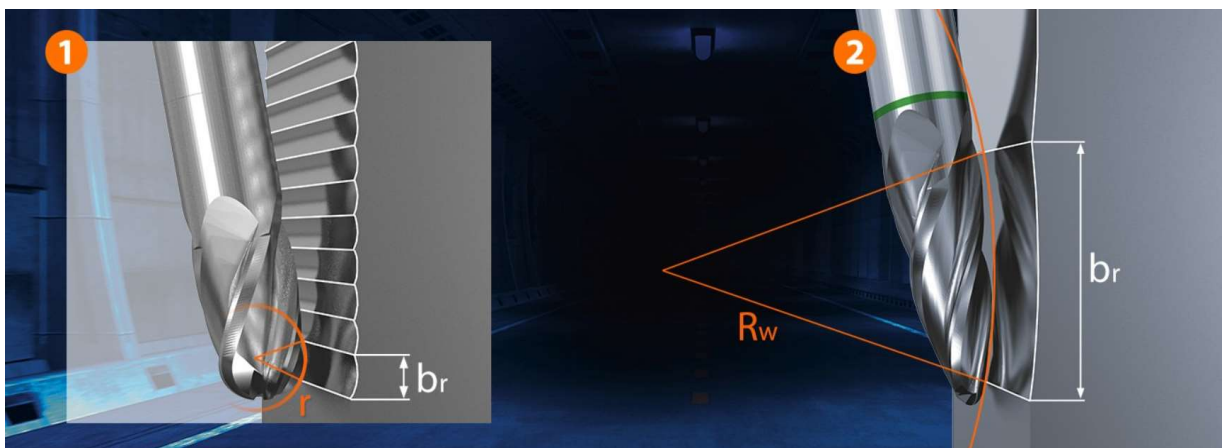
Existuje trend, kdy je snaha zjednodušit geometrii lopatkového kola tak, aby na výrobu daného kola stačilo čtyřosé frézování namísto pětiosého, protože čtyřosý frézovací stroj je výrazně levnější, než stroj pětiosý.

Víceosé frézování umožňuje aktivní řízení náklonu frézy ku obráběné ploše a docílit tak v ideální situaci konstantní tloušťky odřezávaných třísek a konstantní řezné síly. Vykloněním frézy se také odstraní nejproblematictější místo, které se nachází v ose frézy, kde bez jejího vyklonění je nulový poloměr rotace, a tedy i nulová řezná rychlost, což má nepříznivý vliv na kvalitu obrobeného povrchu a životnost nástroje. Díky vyosení frézy se zvýší minimální řezná rychlost, prodlouží se životnost nástroje, budou se lépe utvářet třísky a zlepší se jakost obrobeného povrchu. Zdroj [15] doporučuje při frézování kulovými frézami vyosení o 10 až 15 stupňů. [15]



Obrázek 7: Porovnání vykloněné a nevykloněné kulové frézy [15]

Výše zmíněné řízení náklonu frézy umožňuje u víceosého frézování použít i speciální soudečkové frézy viz obrázek 8.



Obrázek 8: Porovnání kulové a soudečkové frézy [16]

Pro frézování soudečkovými frézami se používá také název PPC frézování neboli Parabolic Performance Cutting. Frézování soudečkovými frézami se používá zejména na dokončovací operace tvarových ploch. Pomocí soudečkových fréz lze dosáhnout velmi jakostního povrchu a v některých aplikacích lze tak částečně až plně nahradit následné broušení. [16]

Mezi hlavní výhody víceosého frézování soudečkovými frézami je uváděn kratší strojní čas obrábění zapříčiněný velkým řádkováním, vysoká odolnost proti opotřebení, snížení nákladů a v neposlední řadě vyšší kvalita povrchu i při kratší době obrábění a s tím spojená vyšší produktivita. Tyto výhody vychází z výrazně většího pracovního poloměru soudečkových fréz. Díky tomuto velkému poloměru lze použít výrazně větší řádkování (takzvaný step over) při stejné výsledné drsnosti povrchu, a to vede ke kratšímu času obrábění a zvýšení produktivity. [16]

4. Programování CNC strojů

CNC stroje se vyvinuly z NC strojů. První NC stroje, neboli stroje s číslicovým řízením (Numeric Control), vznikly v 50. letech 20. století ve Spojených státech na popud leteckého průmyslu. Oproti konvenčním obráběcím strojům, které jsou ovládané ručně pomocí klíčků a páček, jsou NC stroje ovládány číslicovým řízením. Na počátku byly NC stroje řízeny pomocí děrných a magnetických pásků, ale s rozvojem elektroniky a počítačů se řízení obráběcích strojů rychle vyvíjelo až NC řízení nahradilo řízení CNC (Computer Numeric Control). Při CNC řízení je obráběcí stroj ovládán řídicím systémem, který vykonává příkazy zadané pomocí NC programu. Tento program ovládá celý proces obrábění a obsluha pouze kontroluje a ovládá činnosti řídicího systému. NC program ovládá pohyby částí stroje, nástrojů i obrobku. Pohyby jsou udávány v souřadnicích a vykonávají je motory pomocí interpolace. Dále NC program ovládá otáčky vřetene, výměny nástrojů (které jsou měněny automaticky ze zásobníku nástrojů nebo ručně), zapíná a vypíná přívod procesní kapaliny do místa řezu a další. NC program tedy obsahuje geometrická i technologická data daného procesu obrábění. Můžeme se setkat také s pojmem ISO G kód, to je pouze jiný název pro NC program, který je odvozen od nejčastěji se vyskytujícího písmena v NC programech. Existují hlavní tři způsoby, jak tento kód vytvořit:

- Ruční programování
- Dílenské programování
- Strojní programování

Programování CNC strojů je proces přípravy NC kódu, který je základním prostředkem řízení práce CNC strojů. Výsledkem přípravy NC kódu je vytvořený NC kód, seznam nástrojů a jejich požadované seřízení a informace o polotovaru a jeho umístění do stroje.

NC kód není pouze jeden, ale výrobci řídicích systémů si hlavní a nejrozšířenější jazyk ISO G kód nepatrně upravují. Vznikají tak modifikace ISO G kódu, takzvané dialekty, např. Heidenhein dialog, Mazatrol a další.

[17] [18] [19]

4.1 Ruční programování

Při ručním programování technolog – programátor napíše celý NC kód osobně v některém editoru NC kódu, což je v podstatě k tomuto účelu navržený textový editor, který do jisté míry technologovi – programátorovi psaní NC kódu usnadňuje. Umožňuje například základní simulaci kódu, je vizuálně přehledný, obsahuje knihovnu nástrojů, nápovědy k jednotlivým funkcím a upozorňuje na základní hrubé chyby. Přesto se ovšem jednoznačně jedná o nejnáročnější způsob vytváření NC kódu. [18] [19]

NC kód se skládá z takzvaných úvodních vět, těla programu a závěrečných vět.

Úvodní věty:

Úvodní věty obsahují nastavení souřadného systému, způsob odměřování (absolutní nebo přírůstkový), nastavení výchozího nástroje a řezných podmínek, spuštění vřetena a dalších agregátů stroje.

Tělo programu:

Tělo programu obsahuje řezné i neřezné pohyby nástroje a výměny nástrojů.

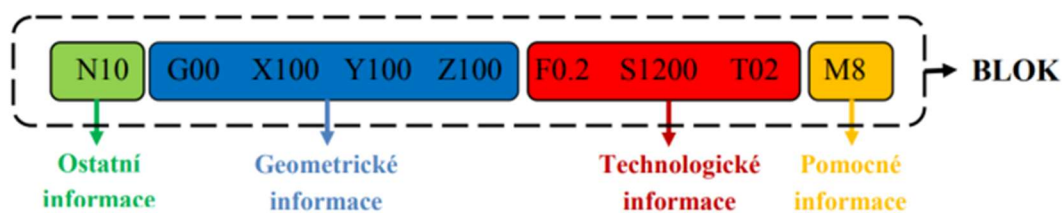
Závěrečné věty:

Závěrečné věty obsahují odjetí do koncové polohy, vypnutí vřetena a dalších agregátů stroje (např. přívodu procesní kapaliny) a ukončení programu.

[18] [19]

ISO G kód obsahuje hlavní dva druhy funkcí, G funkce a M funkce. G funkce jsou pohybové funkce, při kterých dochází k pohybu nástroje, nebo částí stroje pro obrábění. M funkce jsou funkce pomocné, při kterých dochází k nějaké činnosti, ale nedochází k pohybu nástroje pro obrábění.

[18] [19]



Obrázek 9: Příklad jednoho řádku NC kódu [21]

Popis struktury bloku		Druh informace
N	Číslo bloku	Ostatní
G	Přídavné funkce	Geometrické
X, Y, Z	Souřadnice	
F	Rychlost posuvu	Technologické
S	Otáčky vřetena	
T	Volba nástroje	
M	Pomocné funkce	Pomocné

Tabulka 1: Význam písmen v NC kódu [21]

Výhody a nevýhody ručního programování:

Při ručním programování je neomezená složitost programu a maximální volnost jeho tvorby, je možné docílit efektivnějších výstupů než u většiny CAM softwarů. NC editory jsou také výrazně levnější než CAM softwary. Ruční programování je ale velmi náročné a zdouhavé. Je zde velké riziko vzniku chyb jak v zápisu, tak výpočtech souřadnic. Na tvorbu složitějších NC programů ručním programováním jsou potřeba vysoce kvalifikovaní zaměstnanci.

[18] [19]

4.2 Dílenské programování

Dílenské nebo jiným názvem také dialogové programování je součástí řídicího systému obráběcího stroje. Nástavba k němu je spustitelná jak na obráběcím stroji, tak i na počítači programátora. Dílenské programování je přechod mezi ručním programováním a programováním strojním. Při dílenském programování se využívá grafické rozhraní, ve kterém se z omezeného výběru možností/činností vybere ta potřebná a následně se upravují její parametry. Výsledkem dílenského programování je partprogram zapsaný v softwaru daného stroje. Tento partprogram lze spustit rovnou na daném stroji, nebo ho můžeme převést na ISO G kód a ten použít na jiném stroji, popřípadě ho dále ručně upravovat v některém z NC editorů.

Hlavní předností dílenského programování je rychlé a velmi přesné vytvoření precizního NC kódu pro díly základních tvarů. Je zde poměrně nízké riziko výskytu chyb, protože jednotlivé možnosti/cykly, které má technolog – programátor na výběr jsou předem ověřeny. Tento druh programování je vhodný pro díly základních tvarů a není vhodný pro 3D obráběcí operace (obrábění tvarových ploch).

Dalšími výhodami dílenského programování je jednoduché uživatelské prostředí, které je poměrně snadné na naučení a používání. Také čas programování je kratší a pravděpodobnost výskytu chyb nižší.

Mezi nevýhody patří skutečnost, že nelze tvořit programy pro tvarově složité díly, popřípadě je to velmi komplikované. Dílenské programování je uzpůsobené ke snadnému programování dílů základních tvarů. Obecně platí, že pro tvarově složité díly je nevhodnější použít metodu strojního programování s využitím CAD/CAM softwarů a 3D modelu součásti. [18] [19]

4.3 Strojní programování CAD/CAM

K tvorbě NC kódu strojním programováním potřebujeme mít 3D model součásti, kterou chceme vyrábět. Tento 3D model můžeme vytvořit v některém z CAD softwarů a následně tento model do CAM softwaru nahrát, nebo lze 3D model součásti vytvořit přímo ve většině CAM softwarů v rozhraní design. Následně v CAM softwaru tvoříme takzvaný partprogram.

Partprogram obsahuje jak geometrická, tak i technologická data. Geometrická data zahrnují tvar 3D modelu výrobku, tvar výchozího polotovaru, souřadný systém a další. Technologická data zahrnují dráhy nástroje, které se generují automaticky dle zvolené strategie v softwaru, velikost otáček vřetena, použité korekce a další technologické podmínky. Tato data vstupující do partprogramu volí a upravuje technolog – programátor v průběhu práce v CAM softwaru. Následně procesor automaticky tato data z partprogramu převádí na takzvaná CL data (Cutter Location data), což jsou dráhy virtuálního nástroje ve virtuálním stroji. Většina simulací simuluje právě tato CL data. Procesor, který převádí partprogram na CL data je různý pro různé technologie, jiný procesor pro soustružení a jiný pro frézování. Po dokončení programování nechá technolog – programátor CL data převést pomocí postprocesoru na výsledný NC kód. Existuje více postprocesorů, každý postprocesor převádí CL data na tvar NC kódu vhodný pro konkrétní řídicí systém stroje.

[18] [19]



Obrázek 10: Schéma postupu tvorby NC kódu

Tento postup tvorby NC kódu je označován jako takzvaný postupný způsob vytváření NC kódu. Chyby v průběhu tvorby programu, například kolize mezi nástrojem a obrobkem, jsou kontrolovatelné pomocí simulace.

[18] [19]

Výhody a nevýhody strojního programování:

Hlavní výhodou strojního programování je, že se jedná prakticky o jediný způsob, jak vytvořit NC kód pro tvarově velmi složité díly a víceosé obrábění. Další výhodou je možnost hledání a zkoušení řešení v propracované simulaci bez rizika kolizí a ztráty materiálu. Mezi nevýhody patří skutečnost, že většinu jednoduchých dílů jsme schopni naprogramovat rychleji dílenským programováním než v CAM softwaru. Další nevýhodou je to, že vygenerovaný NC kód je zpravidla složitější než kód psaný ručně. Také náklady na školení, licenci a aktualizaci softwaru jsou zde nejvyšší. Nejzávažnější nevýhodou je samotný postprocessing, riziko zanesení chyby právě při automatickém postprocessingu CL dat na NC kód.

[18] [19]

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Cíle experimentální části

Prvním cílem experimentální části této bakalářské práce je návrh konstrukce a výrobního postupu upínacího přípravku potřebného při výrobě kinematické obálky lopatkového kompresorového kola turbodmychadla.

Druhým cílem je návrh výrobního postupu dané kinematické obálky lopatkového kompresorového kola.

Třetím cílem je návrh výrobního postupu dílu, na kterém by následně mohlo být měřeno radiální házení daného polotovaru v daném upínacím přípravku úchytkoměrem.

Zadaný materiál na výrobu lopatkového kompresorového kola turbodmychadla je slitina hliníku 7075 - T6. Tento materiál je uvažován i na výrobu dílu na měření radiálního házení.

Při volbě výrobní technologie kinematické obálky lopatkového kompresorového kola turbodmychadla a při konstrukci upínacího přípravku bylo hlavním kritériem dosažení co nejlepších tolerancí kruhovitosti, válcovitosti a radiálního házení.

5.2 Volba výrobní technologie

Při volbě výrobní technologie kinematické obálky lopatkového kompresorového kola turbodmychadla byly uvažovány pouze výrobní technologie obrábění. Jádro rozhodování spočívalo v tom, zda danou součást vyrábět technologií frézování, nebo soustružením.

Soustružení umožňuje vyrábět rotační díly s velmi přesnou tolerancí kruhovitosti, válcovitosti a tím pádem i s minimálním radiálním házením. Tato skutečnost vychází ze základního principu soustružení, kdy obrobek je roztáčen kolem osy rotace a nástroje jsou přisouvány do záběru, a tímto způsobem odstraňují přebytečný materiál polotovaru.

Frézováním nelze vyrobit tak geometricky přesné rotační díly s tak přesnou tolerancí kruhovitosti, válcovitosti a s tak malým radiálním házením, jako je to možné technologií soustružení. Soustružení je ve výrobě rotačních dílů také mnohem produktivnější.

Horší dosažitelná přesnost rotačních dílů vyráběných technologií frézování je způsobena základním principem frézování, kdy obrobek je upevněn na stůl a k odebrání materiálu polotovaru dochází primárně pohybem nástroje. Tento pohyb nástroje vzniká pomocí interpolace lineárních pohybů v základních osách X, Y a Z. Interpolace způsobuje,

že kruhový pohyb nástroje při frézování není tak přesný a vnáší do rotačních dílů větší nepřesnosti než technologie soustružení.

Jelikož byla výrobní technologie volena s cílem dosažení co nejvyšší přesnosti a nejnižšího radiálního házení dílu, tak byla zvolena na výrobu kinematické obálky lopatkového kompresorového kola turbodmychadla technologie soustružení.

5.3 Požadavky na konstrukci upínacího přípravku

Upínací přípravek je potřeba navrhnout se zaměřením na co nejpřesnější upnutí polotovaru. Upnutí musí být také dostatečně pevné a oblasti polotovaru, které je potřeba obrobit, dobře přístupné.

Dále je vhodné, aby potřebná manipulace s upínacím přípravkem byla co nejjednodušší, a tak se zamezilo vzniku chyb v důsledku špatného upevnění polotovaru v upínacím přípravku a neodborné manipulace s upínacím přípravkem.

Další aspekt kromě funkčnosti, který je při návrhu jakéhokoli dílu potřeba zohlednit, je vyrobiteľnost daného dílu. Proto je cílem navrhnout při stejné funkčnosti dílu součást co nejjednodušší na výrobu tak, aby náklady spojené s výrobou součásti byly co nejnižší. Proto je potřeba navrhnout upínací přípravek s ohledem na co nejjednodušší vyrobiteľnost.

5.4 Volba materiálu upínacího přípravku

Materiál upínacího přípravku je obecně volen s ohledem na sériovost výroby daného produktu. V této bakalářské práci je uvažovaným produktem kinematická obálka lopatkového kompresorového kola turbodmychadla, která je vyráběna z hliníkové slitiny 7075 - T6. Základní materiály, které připadají v úvahu na výrobu upínacího přípravku jsou následující:

- Hliníková slitina
- Nekalená konstrukční ocel
- Kalená konstrukční ocel.

Co se sériovosti týče, tak pro vysoce sériovou výrobu jsou nejvhodnější upínací přípravky z kalené konstrukční oceli, která je po zakalení broušena či obráběná v zakaleném stavu nástroji z CBN (kubického nitridu boru). Tyto upínací přípravky mají nejdelší životnost a opotřebením u nich tedy probíhá nejpomaleji. Náklady na výrobu takovýchto upínacích přípravků jsou ale nejvyšší.

Pro malosériovou až středně sériovou výrobu jsou vhodné upínací přípravky z nezakalené konstrukční oceli. Tyto upínací přípravky budou výrazně méně nákladné na výrobu, ale zároveň jejich trvanlivost bude nižší a opotřebení vyšší než u upínacích přípravků zakalených.

Upínací přípravky ze slitiny hliníku jsou vhodné pouze pro výrobu prototypů či výrobu několika jednotek kusů výrobku. Jejich opotřebení je nejvyšší a trvanlivost nejnižší.

V našem případě je zamýšlena pouze prototypová výroba, a tak nám nízká životnost upínacího přípravku nevádí. Z tohoto důvodu byla zvolena v tomto případě za materiál těla upínacího přípravku slitina hliníku. Konkrétně slitina hliníku 7075 - T6, jedná se o totožný materiál, který je použit na výrobu kinematické obálky. Tato skutečnost nám poskytne jednu výhodu. Jelikož materiál upínacího přípravku bude totožný s materiálem upínaného polotovaru, tak bude totožná i jejich tepelná roztažnost, a tak nenastanou žádné případné problémy způsobené rozdílným zvětšením objemu materiálu upínacího přípravku a materiálu upínaného polotovaru při vysokých teplotách způsobených obráběním.

5.5 Slitina hliníku 7075 - T6

Tento materiál je zadaný na výrobu kinematické obálky. Dále je uvažovaný na výrobu dílu na měření radiálního házení i na výrobu upínacího přípravku.

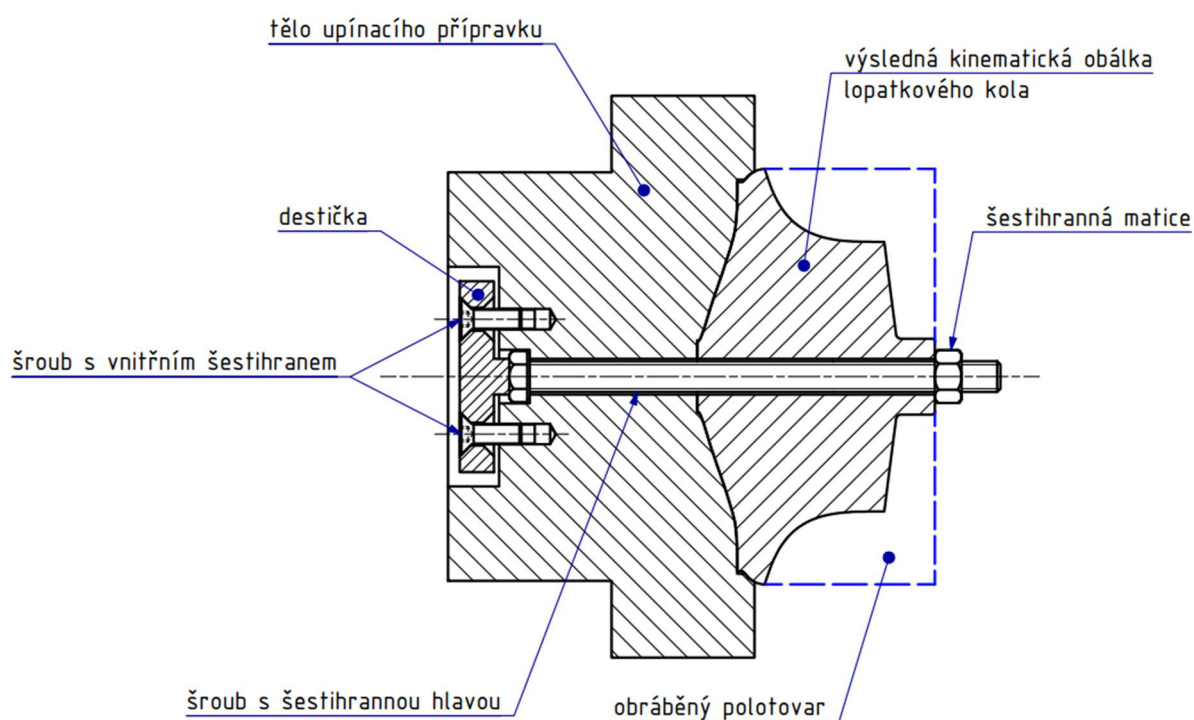
Slitina hliníku 7075 je jedna z nejpevnějších slitin hliníku s vynikajícím poměrem pevnosti k hmotnosti. Tvrdost této slitiny je 150 HB a youngův modul pružnosti v tahu této slitiny je 70 GPa. Má dobrou odolnost proti únavě, dobrou tažnost, dobrou tepelnou vodivost a nízký elektrický odpor. Tato slitina není vhodná ke svařování, protože je velmi náchylná k praskání po svařování. Využívá se na vysoce namáhané aplikace a na konstrukční díly v leteckém průmyslu. T6 v označení slitiny 7075 - T6 značí, že se jedná o slitinu stárnoucí uměle. [20]

Prvek	Hliník	Zinek	Hořčík	Měď	Chrom	Železo
Obsah [%]	86,9 – 91,4	5,6 – 6,1	2,1 – 2,5	1,2 – 1,6	0,07 – 0,23	0 – 0,5
Prvek	Křemík	Mangan	Zirkon	Titan	Ostatní	
Obsah [%]	0 – 0,4	0 – 0,3	0 – 0,25	0 – 0,2	0 – 0,15	

Tabulka 2: Chemické složení slitiny hliníku 7075 - T6 [20]

5.6 Návrhy konstrukce upínacího přípravku

5.6.1 Varianta 1



Obrázek 11: Skica varianty 1

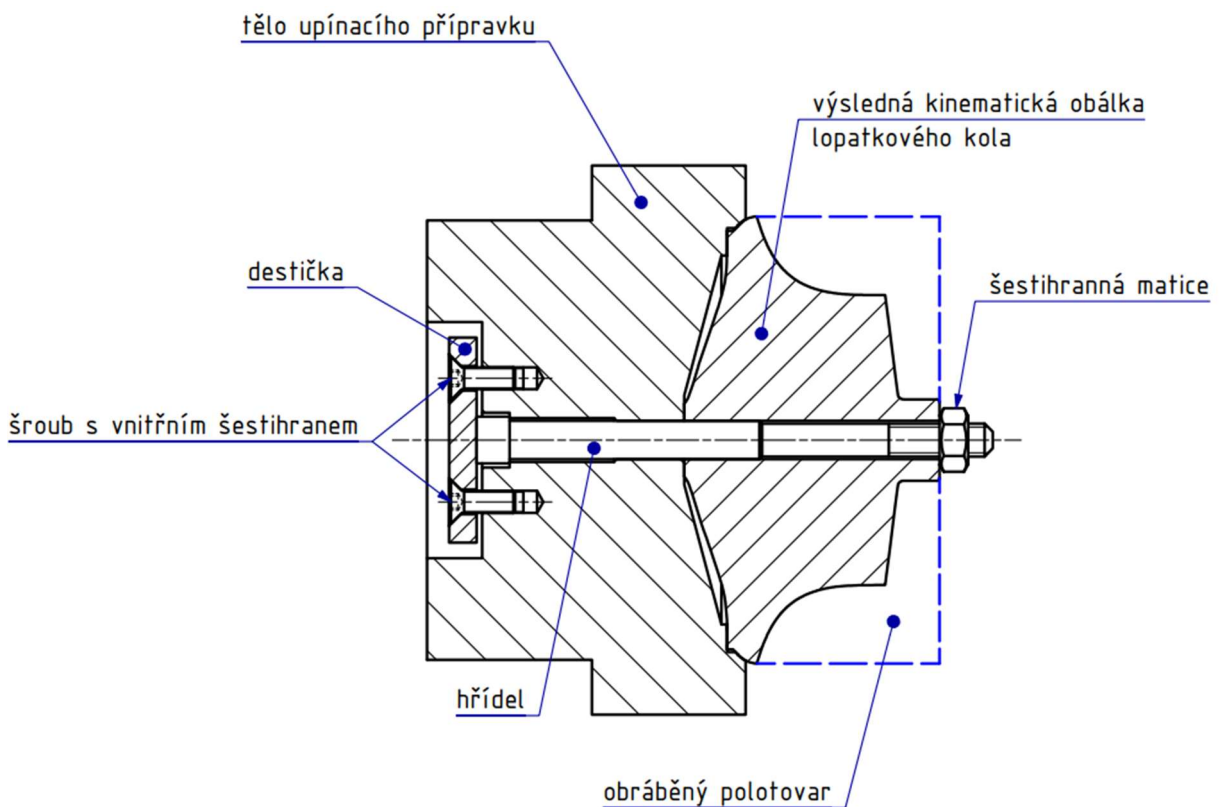
Varianta 1, která je zobrazena na obrázku 11, je jedním z prvotních návrhů upnutí. Tato varianta je realizovatelná, ale obsahuje jeden závažný nedostatek. Tímto nedostatkem je šroub s šestihrannou hlavou. Na závit tohoto šroubu nelze přesně středit obráběný polotovar, a proto nebude upevnění polotovaru v upínacím přípravku dostatečně přesné. Z tohoto důvodu následující varianty 2, 3 a 4 obsahují namísto normalizovaného šroubu hřídel se závitem. Myšlenka byla taková, že namísto vyráběné hřídele bude použit normalizovaný šroub a tím bude výroba zjednodušena, ale tato úvaha se ukázala jako chybná.

Dalším negativem této varianty je velká pracnost a dlouhý strojní čas výroby tohoto upínacího přípravku.

U této varianty také nejsou provedena odlehčení na povrchu těla upínacího přípravku na styčné ploše mezi obrobkem a upínacím přípravkem. Tyto úpravy dosedací plochy jsou k vidění na obrázcích 2., 3. a 4. varianty. Tyto úpravy slouží k lepšímu dosednutí obrobku na vertikálně rovné plochy a tím k lepšímu středění obrobku v upínacím přípravku.

V průběhu vymýšlení této varianty bylo uvažováno nad možností vyrobit upínací přípravek s hřídelí/šroubem axiálně pevným v jedné aplikaci viz obrázek 11 a axiálně volnou hřídelí/šroubem v aplikaci druhé. A následně, by bylo zajímavé porovnat přesnost upnutí (radiální házení upnutého polotovaru) axiálně volné a axiálně pevné varianty. Z tohoto důvodu je tento upínací přípravek navržen tak, že pokud otočíme destičku o 180° kolem vertikální osy, tak z axiálně pevné varianty, která je na obrázku 11 získáme variantu upnutí axiálně volnou.

5.6.2 Varianta 2



Obrázek 12: Skica varianty 2

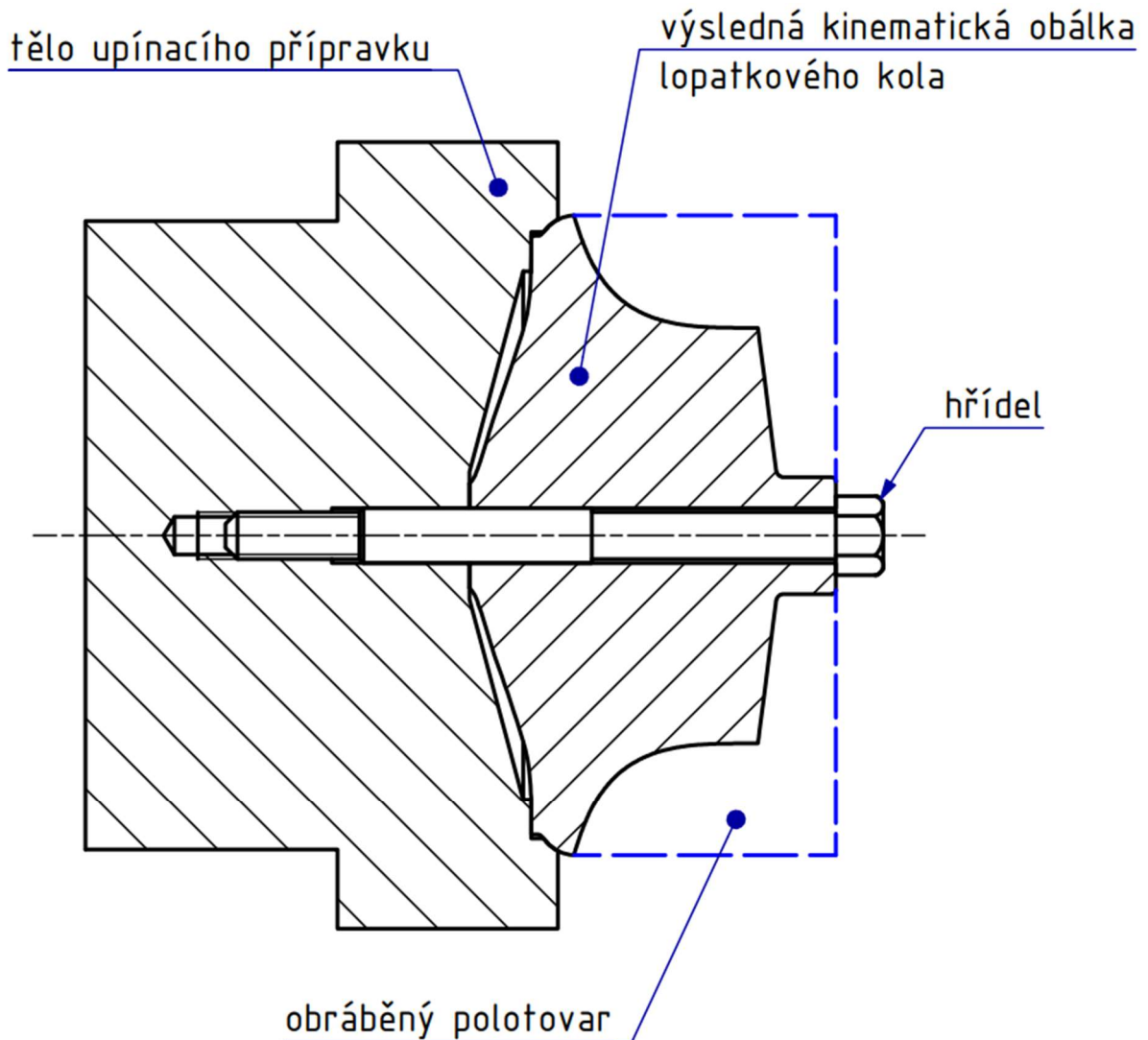
Varianta upínacího přípravku 2 je téměř identická s variantou č. 1. Je zde ale nahrazen normalizovaný šroub s šestihránnou hlavou hřídelí se závitem, touto změnou je podstatně zlepšena přesnost středění jak obráběného polotovaru, tak i v těle upínacího přípravku.

Tato varianta také obsahuje úpravy – odlehčení na styčné ploše těla upínacího přípravku s obrobkem. Tyto úpravy styčné plochy zlepšují dosednutí obrobku do upínacího přípravku a vystředění obrobku.

Pracnost a časová náročnost výroby tohoto upínacího přípravku je ale stále velmi vysoká.

Tato varianta upínacího přípravku je pouze axiálně pevná, ale pokud by byly provedeny drobné změny ve tvaru těla upínacího přípravku a destičky, tak by bylo dosaženo stejné variability mezi axiálně pevnou a volnou aplikací tohoto upínacího přípravku jako u varianty 1.

5.6.3 Varianta 3

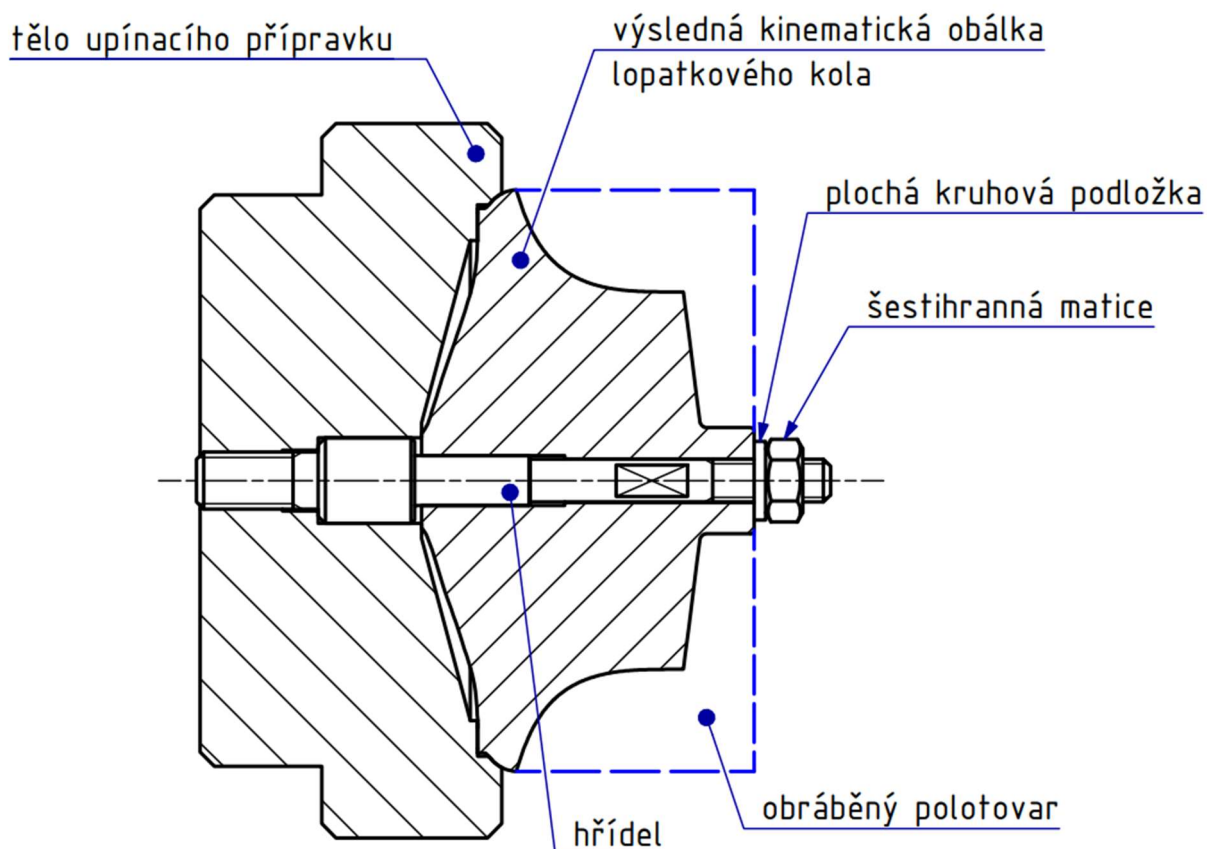


Obrázek 13: Skica varianty 3

Varianta upínacího přípravku 3 je výrazně jednodušší než předchozí dvě varianty. Obsahuje podstatně méně součástek a dílů, výroba tohoto upínacího přípravku je výrazně jednodušší a čas potřebný na výrobu tohoto upínacího přípravku je také výrazně kratší.

K vystředění obrobku slouží stejně jako ve variantě 2 část hřídele, vertikálně rovné dosedací plochy a část rádiusu kinematické obálky.

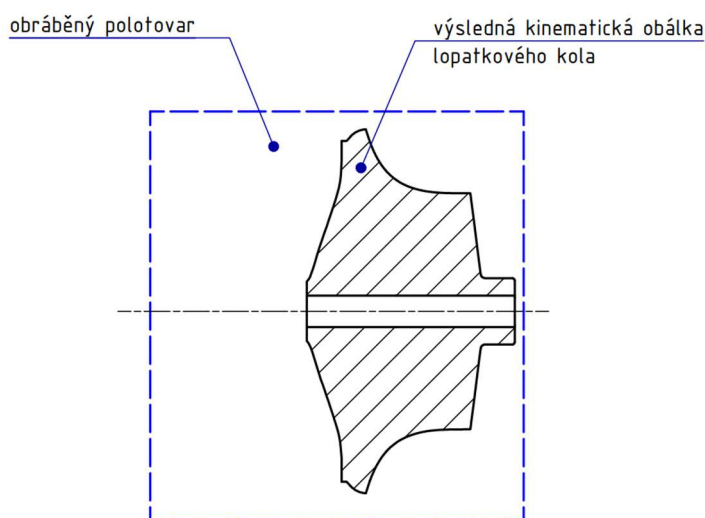
5.6.4 Varianta 4



Obrázek 14: Skica varianty 4

Varianta upínacího přípravku 4 funguje následovně. Nejprve se hřídel zašroubuje do těla upínacího přípravku. Aby šlo zašroubování snadno, tak k tomuto účelu slouží zfrézované plošky na hřídeli, které snadno uchytíme klíčem nebo kleštěmi a zašroubování tak půjde snadno. Aby opakovatelnost upnutí byla co nejvyšší, tak než se dorazí na konec závitů na hřídeli, tak se čelo většího průměru hřídele opře o stěnu těla upínacího přípravku. Tím je zajištěna vždy stejná poloha hřídele. Následně se na hřídel nasune obráběný polotovár, který se zajistí plochou kruhovou podložkou a šestihrannou maticí. Kruhová podložka zvětšuje plochu styku mezi obráběným polotovarem a šestihrannou maticí. Vystředění obráběného polotovaru a upínacího přípravku probíhá na stejných styčných plochách jako ve 2. a 3. variantě, jedinou změnou je, že u této varianty upínacího přípravku se tělo upínacího přípravku středí na jiný, větší průměr hřídele než obráběný polotovár.

5.6.5 Varianta 5



Obrázek 15: Skica varianty 5

Varianta 5 je zcela odlišná od všech předchozích. V této variantě je uvažována výroba kinematické obálky lopatkového kola bez upínacího přípravku, na jedno upnutí. Výroba kinematické obálky tímto způsobem je možná, ale velmi komplikovaná a už při výrobě poměrně malého počtu kusů kinematických obálek se výroba tímto způsobem nevyplatí, protože bude mnohem větší spotřeba materiálu na jeden kus výrobku a strojní čas výroby jednoho kusu bude mnohem delší než při použití upínacího přípravku.

Postup výroby kinematické obálky tímto způsobem by byl následující:

- 1) Příčný hrubovací cyklus odstraní materiál k pravé vertikální stěně kinematické obálky viz obr. 15 a zde zůstane přídavek na obrábění načisto.
- 2) Podélný hrubovací cyklus odebere přebytečný materiál v oblasti od největšího průměru kinematické obálky směrem doprava viz obr. 15 a ponechá přídavek na obrábění načisto.
- 3) Vrtání díry v rotační ose kinematické obálky.
- 4) Vnější kontura pravé části kinematické obálky až po největší průměr dle orientace obr. 15 se obrobí načisto.
- 5) Zapichovacími příčnými cykly se obrobí levá tvarová plocha dle orientace obr. 15 nahrubo.
- 6) Následně se tato část vnější kontury kinematické obálky obrobí načisto.
- 7) Dojde k upíchnutí kinematické obálky od přebytečného materiálu.

5.7 Vícekriteriální porovnání a zhodnocení navržených konstrukčních variant upínacích přípravků

V následující tabulce je provedena rozhodovací analýza. Jsou v ní porovnány jednotlivé upínací varianty dle pěti kritérií. Čím lepší je daná varianta dle určitého kritéria, tím získá více bodů za dané kritérium. Varianta upnutí s celkovým nejvyšším ziskem bodů je vyhodnocena nejlepší variantou z daného výběru dle daných kritérií.

Kritérium	Interval možných hodnot	V1	V2	V3	V4	V5
Náročnost výroby upínacího přípravku	$\langle 0; 10 \rangle$	3	2	7	7	10
Časová náročnost výroby kinematické obálky	$\langle 0; 10 \rangle$	5	5	5	5	2
Složitost manipulace s přípravkem	$\langle 0; 10 \rangle$	5	5	6	7	10
Přesnost upnutí	$\langle 0; 10 \rangle$	2	8	7	8	5
Spotřeba materiálu na 1 kus kinematické obálky	$\langle 0; 10 \rangle$	7	7	7	7	2
	Σ	22	27	32	34	29

Tabulka 3: Vícekriteriální porovnání variant upínacích přípravků

Vícekriteriálním hodnocením vyšla varianta 4 jako nejlepší z daného výběru dle daných kritérií. Proto je dále zpracován výrobní postup všech vyráběných částí tohoto upínacího přípravku a výrobní postup kinematické obálky a dílu na měření radiálního házení obrobku při použití tohoto upínacího přípravku.

5.8 Výrobní postup všech dílů varianty 4

Výroba hřídele je zamýšlena na konvenčním soustruhu. Výroba všech ostatních dílů: těla upínacího přípravku, dílu na měření radiálního házení a kinematické obálky lopatkového kola je uvažována na CNC soustruhu. Tvorba NC kódů byla provedena v CAD/CAM softwaru Fusion 360 od firmy Autodesk.

❖ **Zvolený materiál hřídele:** - konstrukční ocel C45 (ČSN 12050)

❖ **Zvolený polotovár:** - kruhová tyč o \varnothing 20 mm a délce 100 mm

❖ **Potřebné nástroje:**

- Navrtávák
- Vnější pravý soustružnický nůž s VBD
- Závitořezné očko M8 – 6g
- Závitořezné očko M6 – 6g
- Válcová fréza o \varnothing 10 mm

❖ **Výrobní postup:**

- 1) Upnutí polotovaru do sklíčidla – délka upnuté části 20 mm
- 2) Zarovnání čela
- 3) Obrobení malé části vysunutého konce na \varnothing 6 mm
- 4) Vytvoření středícího důlku v ose hřídele navrtávákem
- 5) Podepření hřídele hrotem koníku
- 6) Obrobení zbytku vysunuté části na \varnothing 12 mm
- 7) Obrobení vysunuté části hřídele do vzdálenosti 58,2 mm na \varnothing 7 mm
- 8) Obrobení vysunuté části hřídele do vzdálenosti 42 mm na \varnothing 6 mm
- 9) Sražení hrany na \varnothing 12 mm
- 10) Sražení hrany na \varnothing 7 mm
- 11) Přeupnutí obrobku – upnutí do kleštiny za obrobenou část o \varnothing 7 mm
- 12) Obrobení čela
- 13) Obrobení vysunuté neobrobené části hřídele na \varnothing 8 mm
- 14) Sražení hrany na \varnothing 12 mm
- 15) Sražení hrany na \varnothing 8 mm
- 16) Vytvoření závitu M8 závitořezným očkem
- 17) Přeupnutí obrobku – upnutí do kleštiny za \varnothing 12 mm
- 18) Vytvoření závitu M6 závitořezným očkem
- 19) Vyfrézování plošek pro uchycení klíče/kleští na tříosé frézce

5.8.2 Seznam nástrojů použitých na výrobu těla upínacího přípravku, dílu na měření radiálního házení a kinematické obálky lopatkového kola

1) Vnější pravý soustružnický nůž

- **Držák:** Dormer Pramet – SVJCR 2020 K 16-M-A



- **VBD:** VCGT160408



→ Tento nástroj je používán na hrubovací i dokončovací obráběcí strategie.

2) Vnitřní pravý soustružnický nůž

- **Držák:** Dormer Pramet – A08H – SCLCR 06



- **VBD:** CCGT060202



→ Tento nástroj je používán na hrubovací i dokončovací obráběcí strategie.

3) Monolitní vrták ze slinutého karbidu Ø 6,1 mm:

Dormer Pramet – R453

4) Monolitní vrták ze slinutého karbidu Ø 6,8 mm:

Dormer Pramet – R453

5) Monolitní vrták ze slinutého karbidu Ø 8,5 mm:

Dormer Pramet – R453

6) Monolitní vrták ze slinutého karbidu Ø 11 mm:

Dormer Pramet – R453



7) HSS výstružník Ø 7 H7: Dormer Pramet – B901

8) HSS výstružník Ø 12 H7: Dormer Pramet – B901



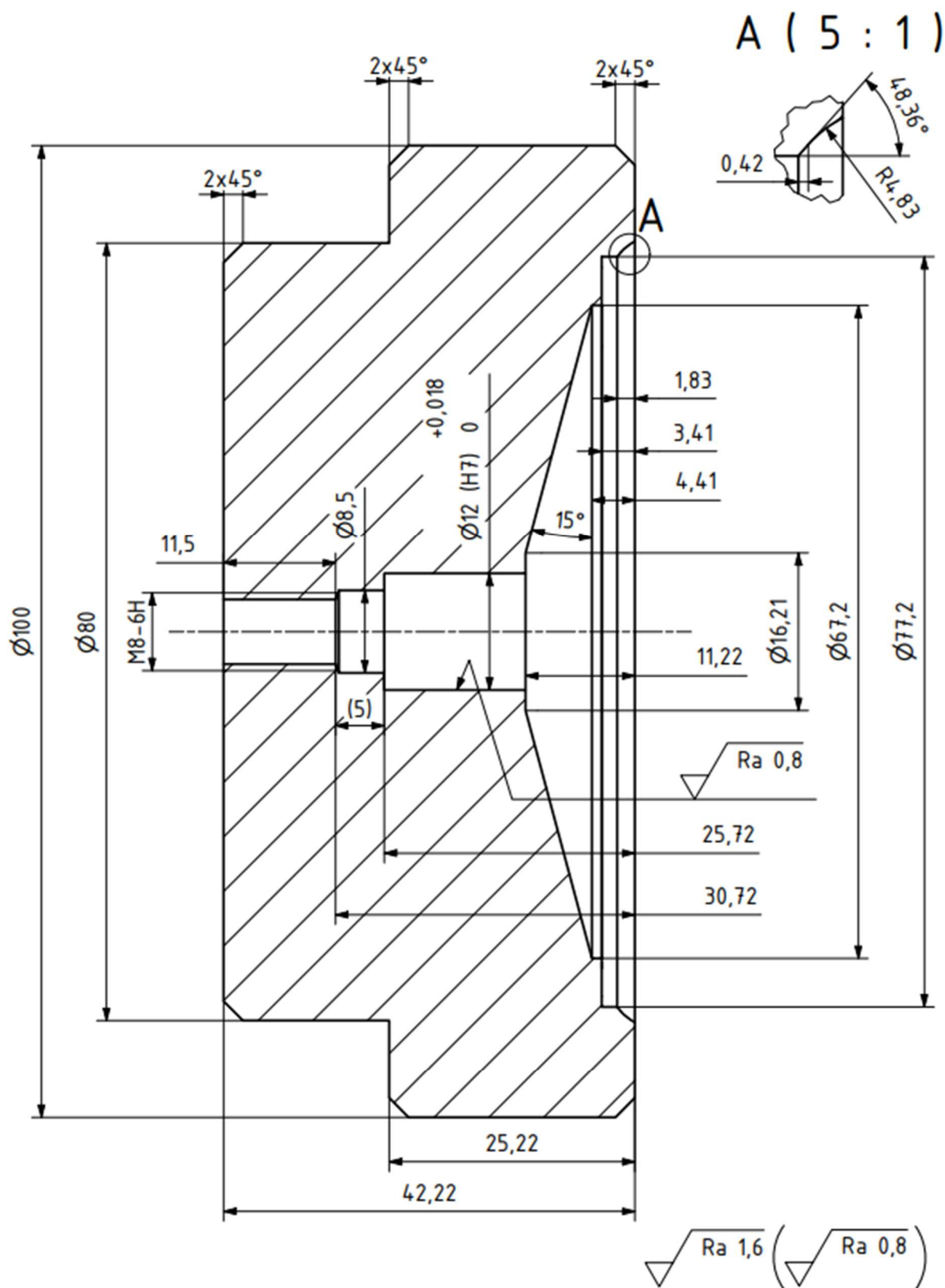
9) HSS strojní závitník M8: Dormer Pramet – EP006H



- Na výrobu těla upínacího přípravku jsou použity nástroje:
1), 2), 4), 5), 6), 8), 9)
- Na výrobu přípravku na měření házení jsou použity nástroje:
1), 3), 4), 7)
- Na výrobu kinematické obálky jsou použity nástroje:
1), 3), 4), 7)

→ Ilustrační obrázky nástrojů jsou čerpány z katalogů výrobce nástrojů firmy Dormer Pramet.

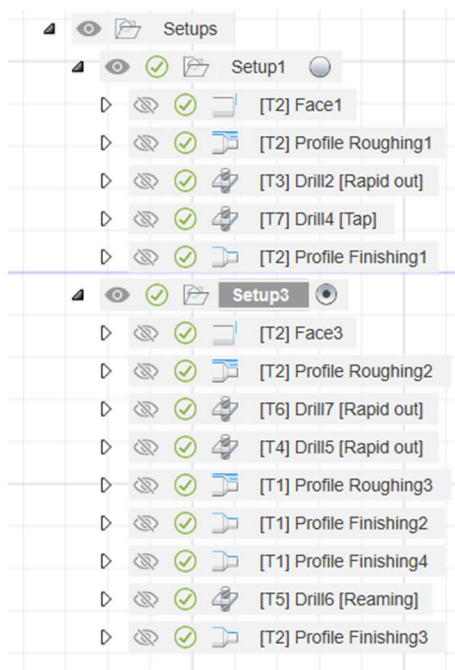
5.8.3 Výrobní postup těla upínacího přípravku



Úhel a délka zkosení mezi dírou o $\varnothing 8,5$ a závitem M8 dle vrcholového úhlu vrtáku.

Obrázek 18: Zobrazení výrobního výkresu těla upínacího přípravku

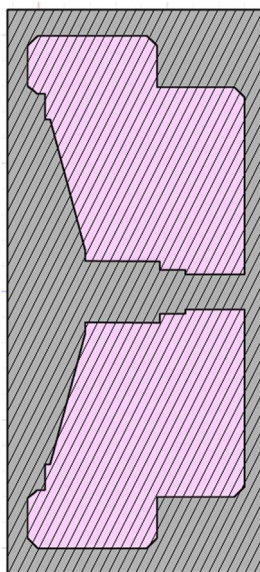
- ❖ Výrobní postup této součásti obsahuje jedno přepnutí a 14 obráběcích strategií.
- ❖ **Materiál těla upínacího přípravku:** - slitina hliníku EN AW 7075 - T6
- ❖ **Zvolený polotovar:** - kruhová tyč o \varnothing 110 mm a délce 50 mm
- ❖ **Výrobní postup:**



Obrázek 19: Souhrn obráběcích strategií výrobního procesu těla upínacího přípravku

1) Upnutí:

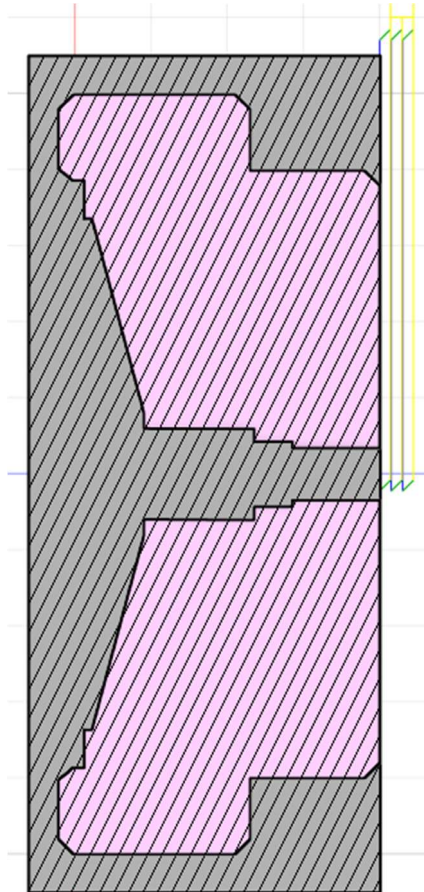
- Polotovar je upnut do sklíčidla za vnější průměr. Délka upnuté části ve sklíčidle je 20 mm. Dle orientace obrázku 20 je sklíčidlo stroje z levé strany.



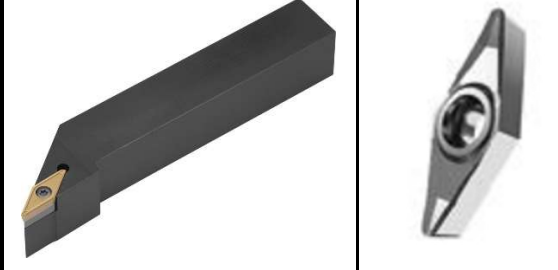
Obrázek 20: Zobrazení polohy 3D modelu výrobku v polotovaru

2) Obrobení čelní plochy – hrubování:

- příčný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm



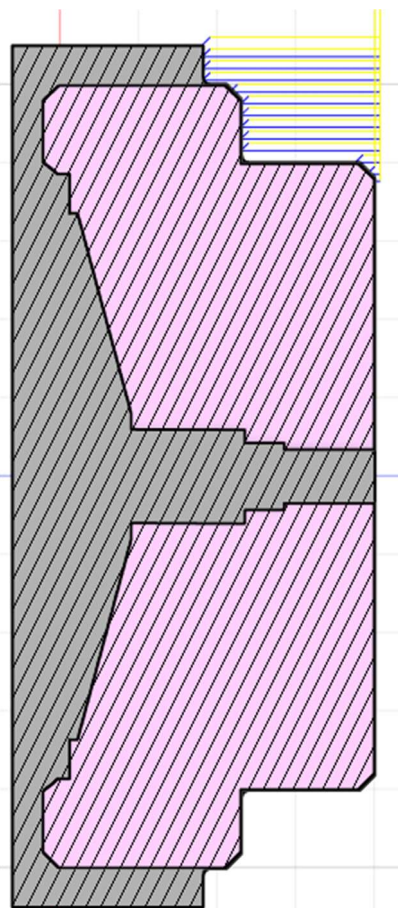
Obrázek 21: Znáznění 1. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění [s]
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	1,5	0,48	210	37
					

Tabulka 4: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 1. obráběcí strategie

3) Hrubování vnější kontury:

- podélný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm

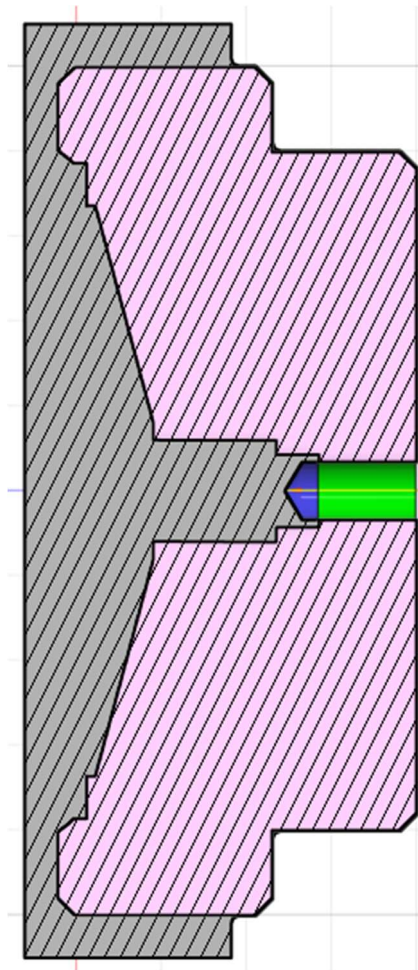


Obrázek 22: Znáznornění 2. obráběcí strategie


Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p [mm]	$f_{ot.}$ [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Držák	VBD				
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	1,5	0,48	210	56

Tabulka 5: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 2. obráběcí strategie

4) Vrtání díry o \varnothing 6,8 mm pro následnou výrobu vnitřního závitu:

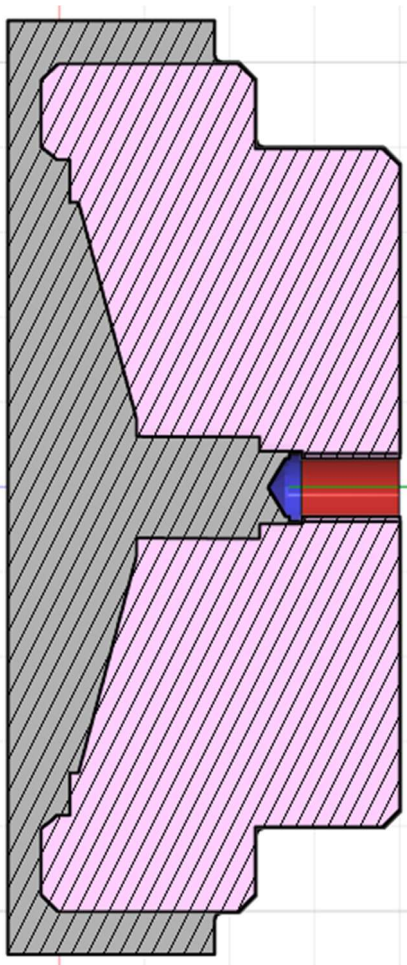


Obrázek 23: Znázornění 3. obráběcí strategie

Nástroj – vrták \varnothing 6,8 mm ze slinutého karbidu	$f_{ot.}$ [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Dormer Pramet – R453	0,22	60	17
			

Tabulka 6: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 3. obráběcí strategie

5) Výroba vnitřního závitu M8 – 6H:



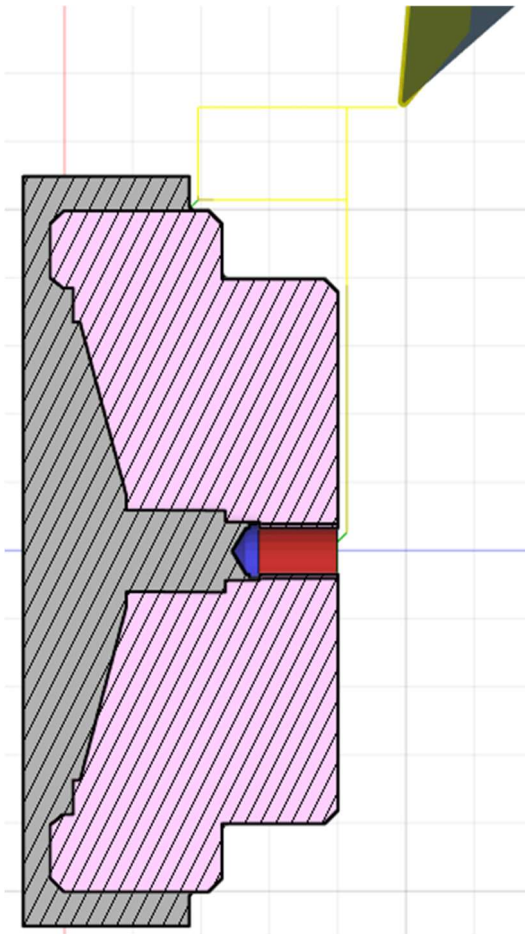
Obrázek 24: Znáznornění 4. obráběcí strategie

Nástroj – HSS strojní závitník M8 – 6H	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Dormer Pramet – EP006H	7	21
		

Tabulka 7: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 4. obráběcí strategie

6) Obrobení vnější kontury načisto:

- + průjezd navíc (Spring Pass)



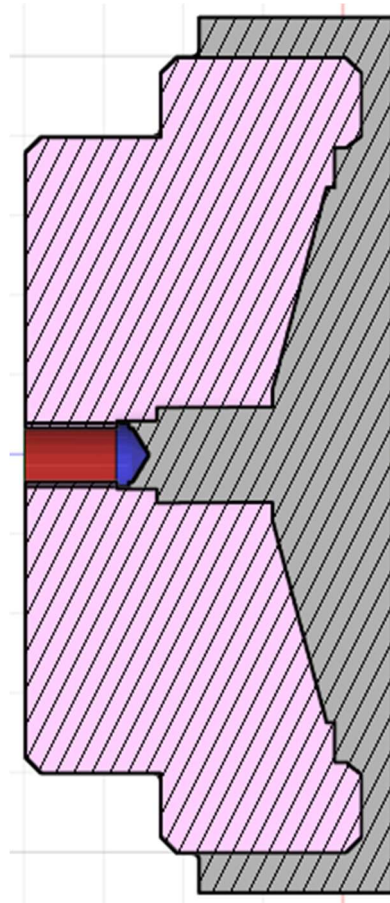
Obrázek 25: Znáznornění 5. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění [s]
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	0,1	0,48	210	37

Tabulka 8: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 5. obráběcí strategie

7) Přepnutí obrobku:

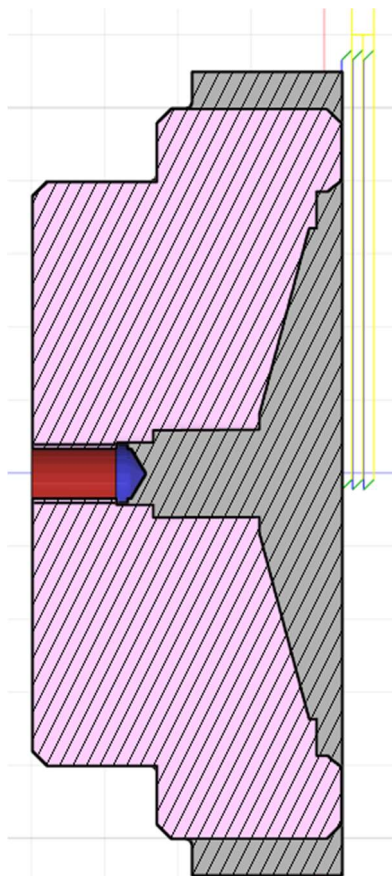
- Obrobek je otočen a upnut do sklíčidla za již obrobený menší průměr.





Obrázek 26: Zobrazení přepnutí obrobku

8) Obrobení druhé čelní plochy polotovaru – hrubování:

- příčný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm



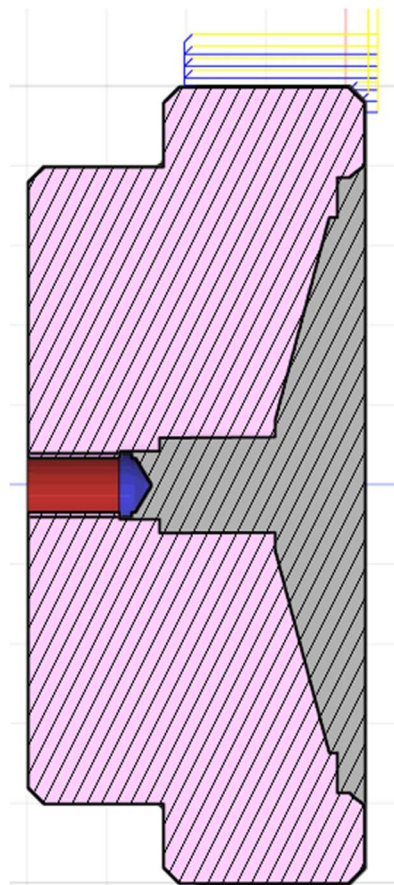
Obrázek 27: Znárodnění 6. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p [mm]	$f_{ot.}$ [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Držák	VBD				
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	1,5	0,48	210	37
					



Tabulka 9: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 6. obráběcí strategie

9) Hrubování vnější kontury:

- podélný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm

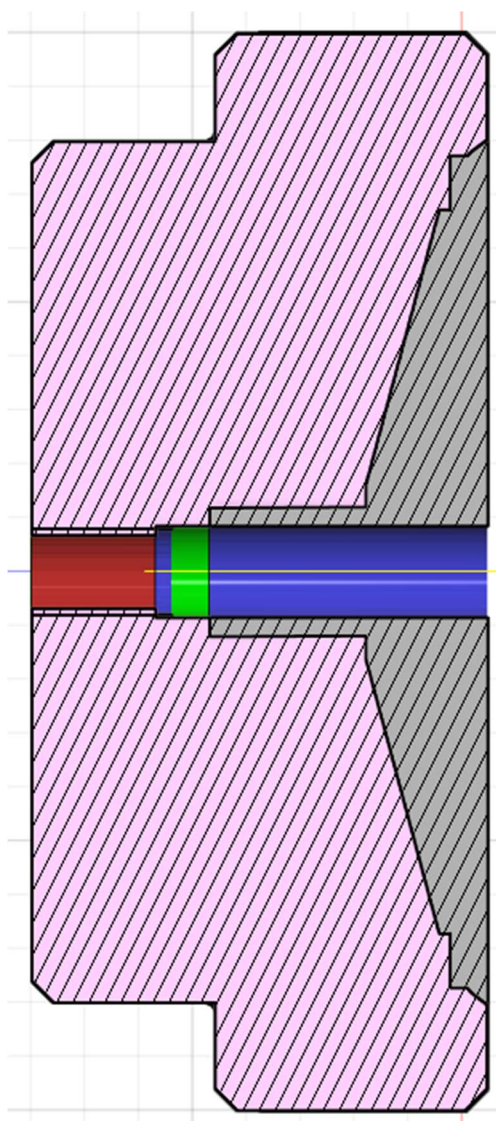


Obrázek 28: Znárodnění 7. obráběcí strategie

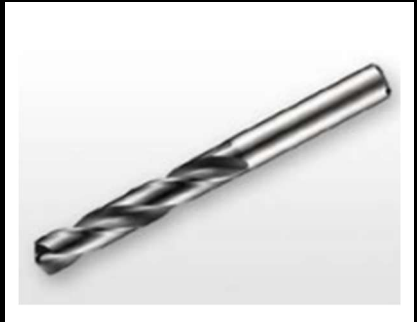
Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění [s]
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	1,5	0,48	210	38
					

Tabulka 10: Nástroj, rezné podmínky a čas obrábění 7. obráběcí strategie

10) Vrtání díry o \varnothing 8,5 mm:

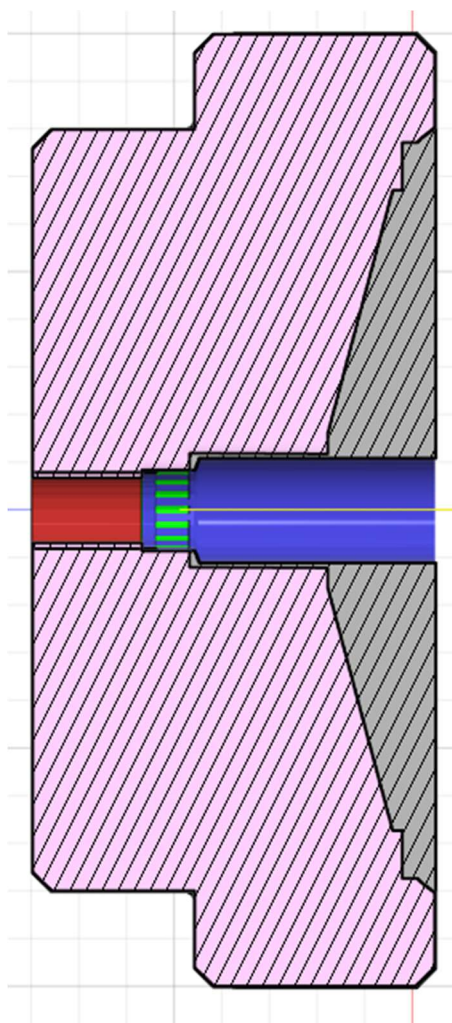


Obrázek 29: Znáznornění 8. obráběcí strategie


Nástroj – vrták \varnothing 8,5 mm ze slinutého karbidu	f_{ot} [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Dormer Pramet – R453	0,27	80	17
			

Tabulka 11: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 8. obráběcí strategie

11) Vrtání díry o \varnothing 11 mm:



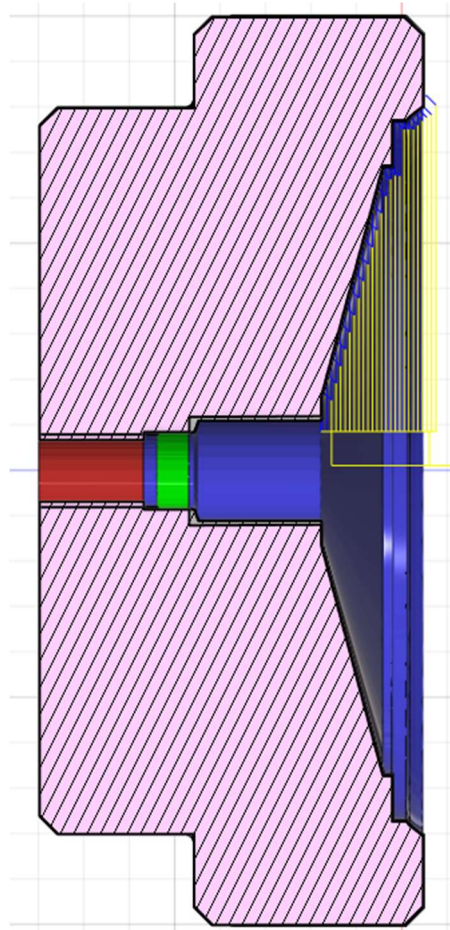
Obrázek 30: Znáznornění 9. obráběcí strategie

Nástroj – vrták \varnothing 11 mm ze slinutého karbidu	f_{ot} [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Dormer Pramet – R453	0,35	100	17
			

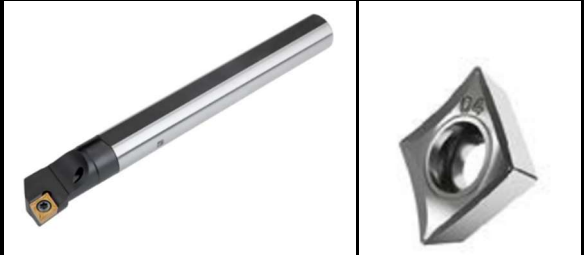
Tabulka 12: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 9. obráběcí strategie

12) Hrubování vnitřní kontury:

- příčný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm

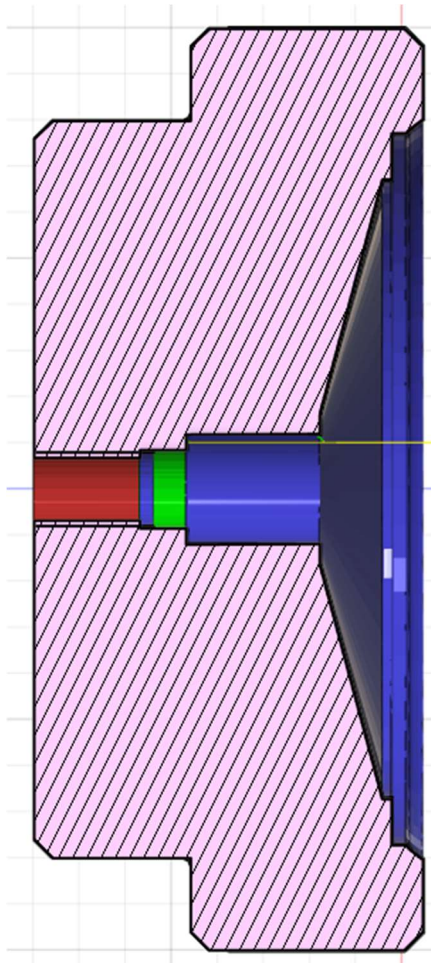


Obrázek 31: Znáznornění 10. obráběcí strategie


Nástroj – vnitřní pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění
Dormer Pramet A08H – SCLCR 06	CCGT060202	0,5	0,12	155	4 min 12 s
					

Tabulka 13: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 10. obráběcí strategie

13) Obrobení díry o \varnothing 12 mm načisto:



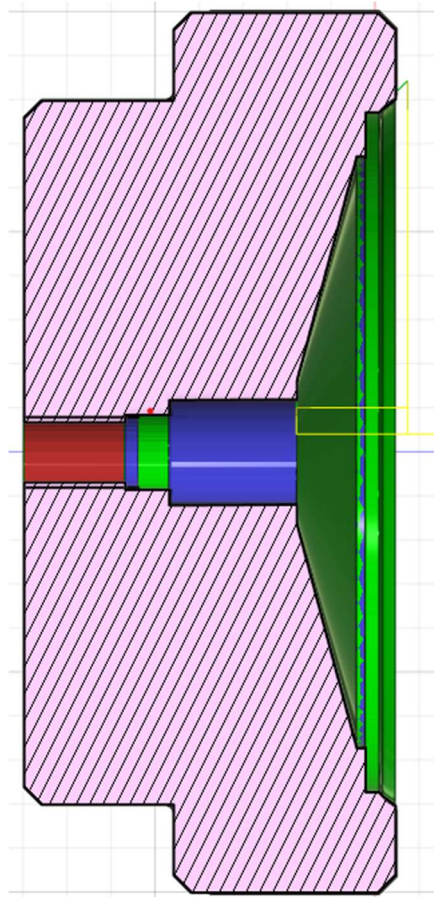
Obrázek 32: Znázornění 11. obráběcí strategie

Nástroj – vnitřní pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění [s]
Dormer Pramet A08H – SCLCR 06	CCGT060202	0,2	0,12	155	22
					


Tabulka 14: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 11. obráběcí strategie

14) Obrobení vnitřní kontury načisto:

- + průjezd navíc (Spring Pass)

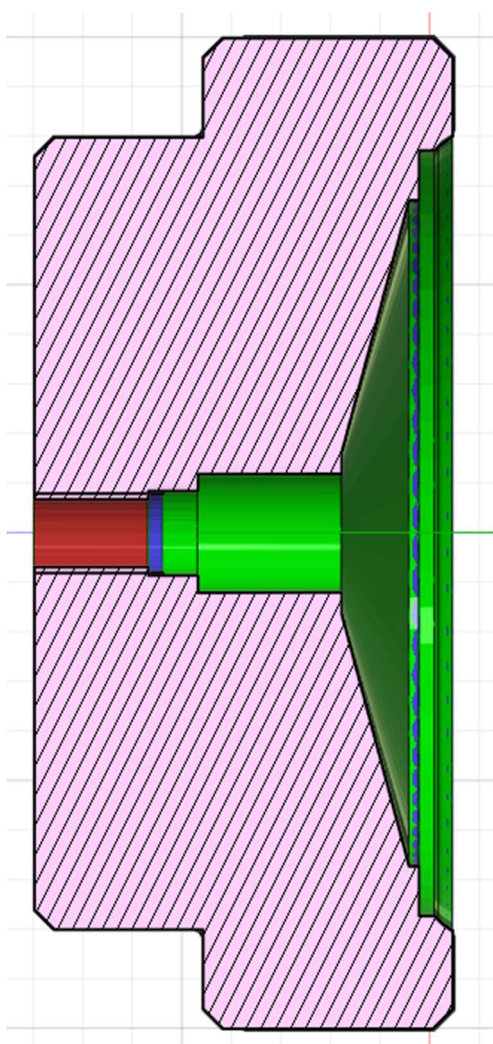


Obrázek 33: Znárodnění 12. obráběcí strategie

Nástroj – vnitřní pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění [s]
Dormer Pramet A08H – SCLCR 06	CCGT060202	0,1	0,12	155	63
					

Tabulka 15: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 12. obráběcí strategie

15) Vystružení díry na $\varnothing 12$ H7:



Obrázek 34: Znárodnění 13. obráběcí strategie

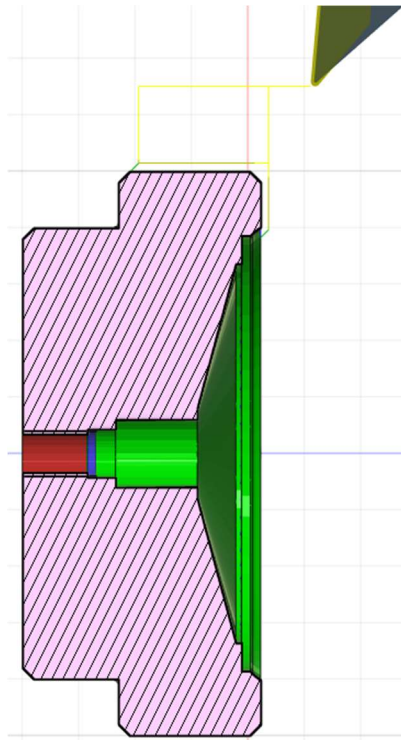
Nástroj – HSS výstružník $\varnothing 12$ H7	f_{ot} [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Dormer Pramet – B901	0,55	12	36



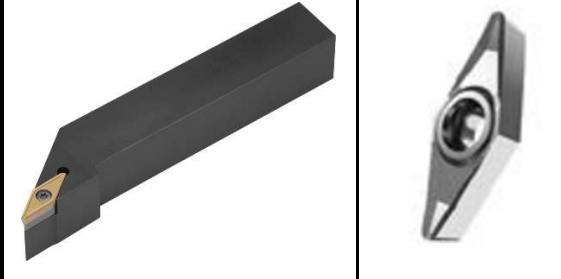
Tabulka 16: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 13. obráběcí strategie

16) Obrobení vnější kontury načisto:

- + průjezd navíc (Spring Pass)



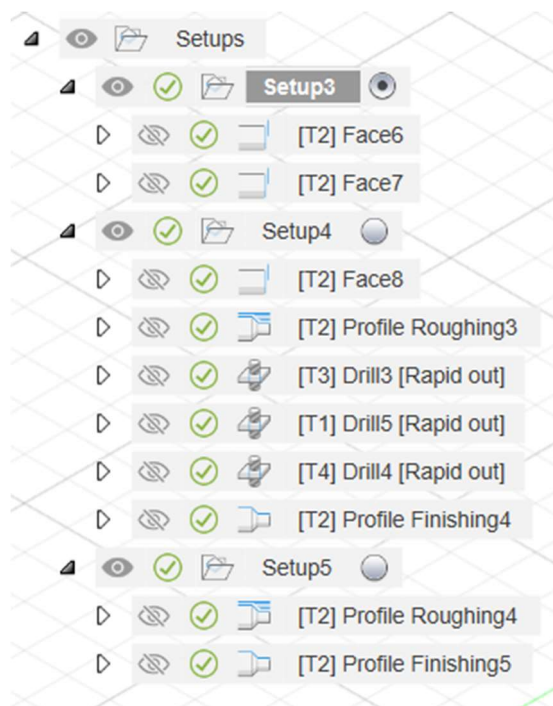
Obrázek 35: Znázornění 14. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění [s]
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	0,1	0,48	210	35
					

Tabulka 17: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 14. obráběcí strategie

V celém procesu obrábění je nastaven horní limit otáček vřetene stroje na 3 000 ot./min, aby nedošlo k přetížení vřetene stroje. Celkový čas obrábění této součásti je dle simulace v CAD/CAM softwaru Fusion 360 11 minut 25 sekund. Do tohoto času není zahrnuta doba potřebná k přeupnutí obrobku.

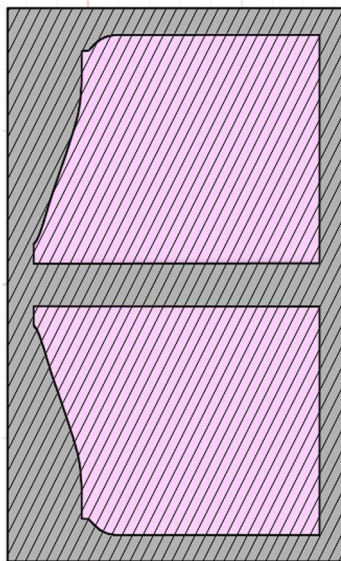
- ❖ Výrobní postup této součásti obsahuje dvě přepnutí a 10 obráběcích strategií.
- ❖ **Materiál dílu na měření radiálního házení:** - slitina hliníku EN AW 7075 - T6
- ❖ **Zvolený polotovár:** - kruhová tyč o průměru 90 mm a délce 55 mm
- ❖ **Výrobní postup:**



Obrázek 37: Souhrn obráběcích strategií výrobního procesu dílu na měření radiálního házení

1) Upnutí:

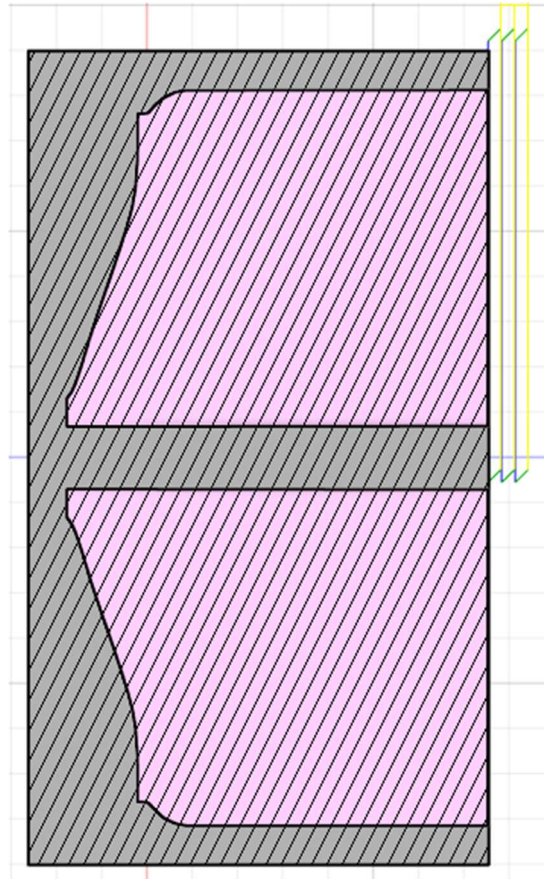
- Polotovár je upnut do sklíčidla za vnější průměr. Délka upnuté části ve sklíčidle je 20 mm. Dle orientace obrázku 38 je sklíčidlo stroje z levé strany.





Obrázek 38: Zobrazení polohy 3D modelu výrobku v polotovaru

2) Obrobení čelní plochy – hrubování:

- příčný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm

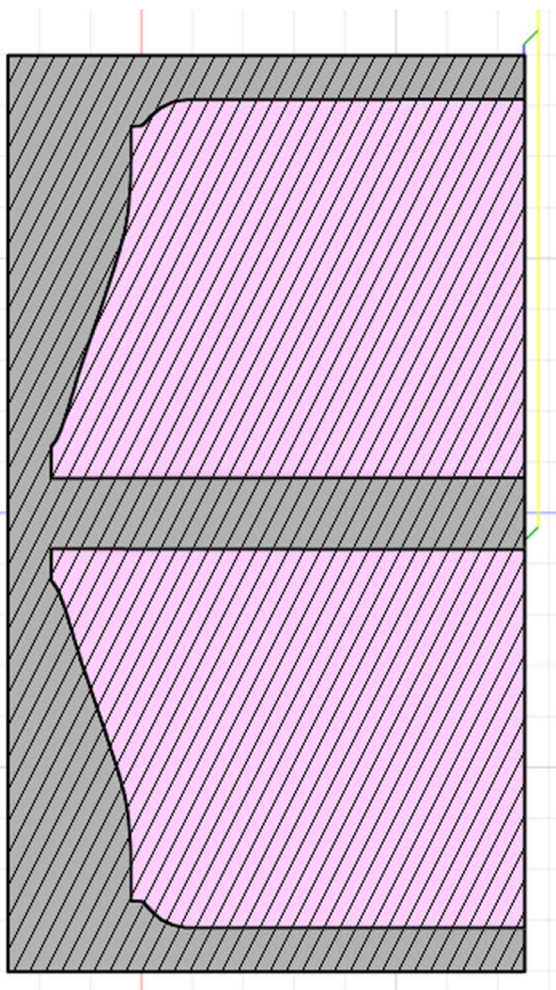


Obrázek 39: Znáznornění 1. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p [mm]	$f_{ot.}$ [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Držák	VBD				
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	1,5	0,48	210	31
					

Tabulka 18: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 1. obráběcí strategie

3) Obrobení čelní plochy – načisto:



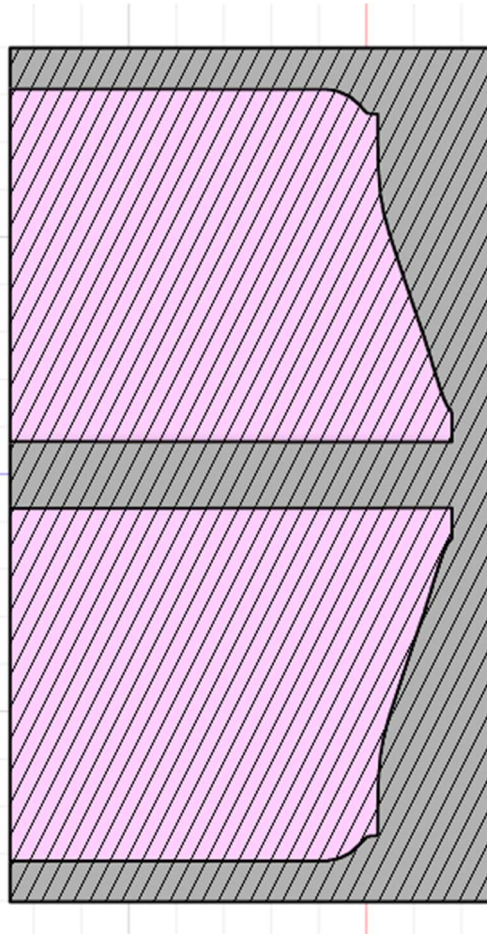
Obrázek 40: Znázornění 2. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění
					[s]
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	0,1	0,48	210	20

Tabulka 19: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 2. obráběcí strategie

4) Přepnutí polotovaru:

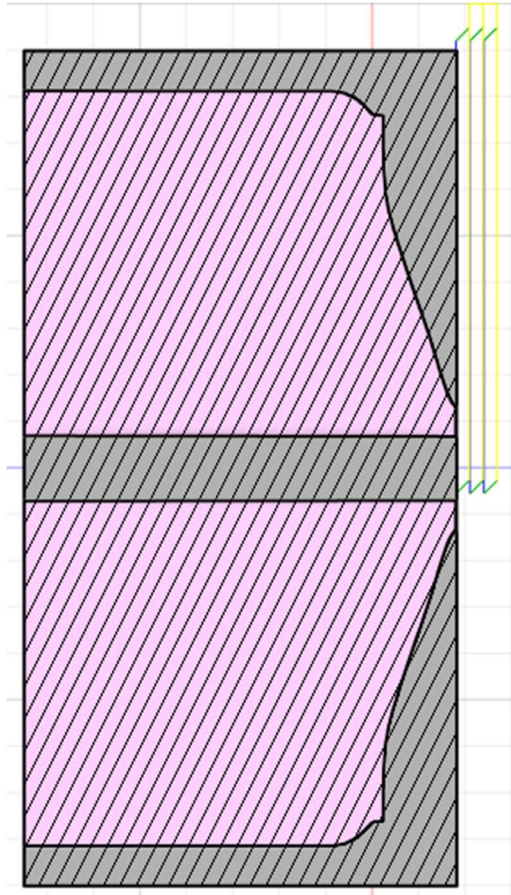
- Obrobek je otočen a upnut do sklíčidla. Délka upnuté části ve sklíčidle je 20 mm. Stále zachováváme orientaci, že sklíčidlo je nalevo dle obr. 41.





Obrázek 41: Zobrazení přepnutí obrobku

5) Obrobení druhé čelní plochy polotovaru – hrubování:

- příčný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm



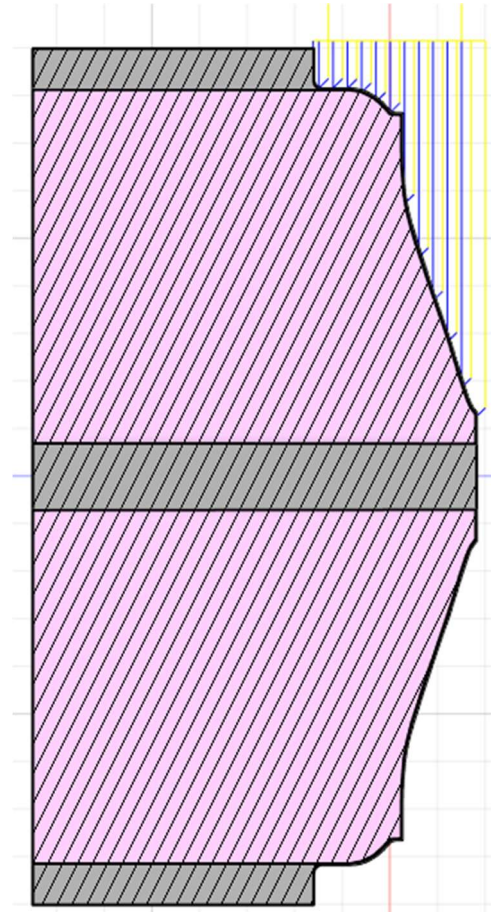
Obrázek 42: Znázornění 3. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p [mm]	$f_{ot.}$ [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Držák	VBD				
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	1,5	0,48	210	31
					

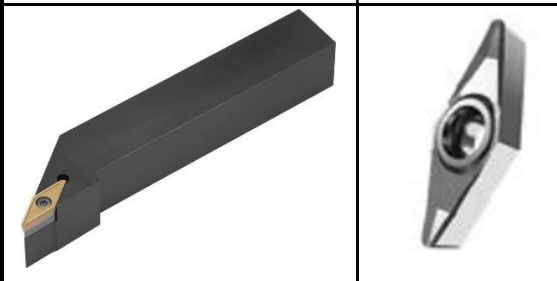
Tabulka 20: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 3. obráběcí strategie

6) Hrubování vnější kontury:

- příčný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm

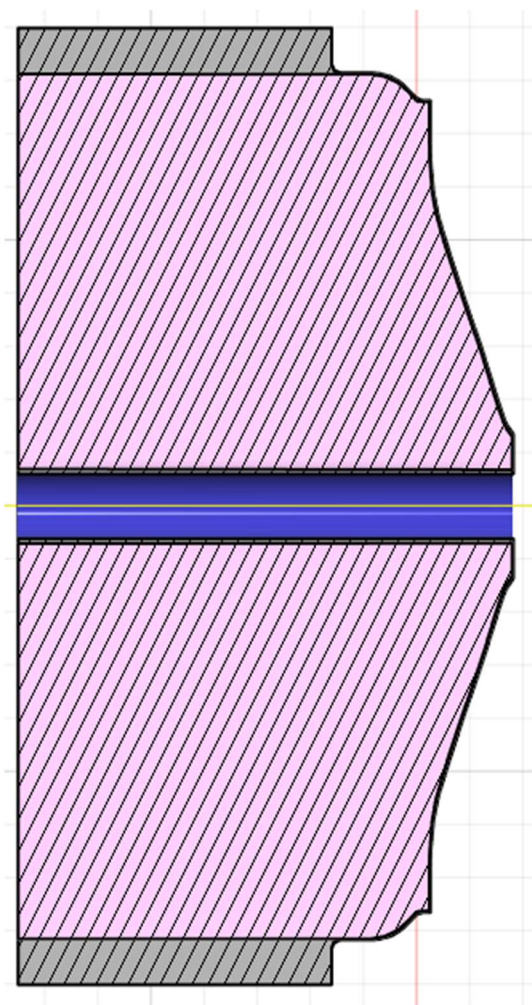


Obrázek 43: Znáznornění 4. obráběcí strategie


Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění [s]
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	1,5	0,48	210	43
					

Tabulka 21: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 4. obráběcí strategie

7) Vrtání průchozí díry o $\varnothing 6,1$ mm:

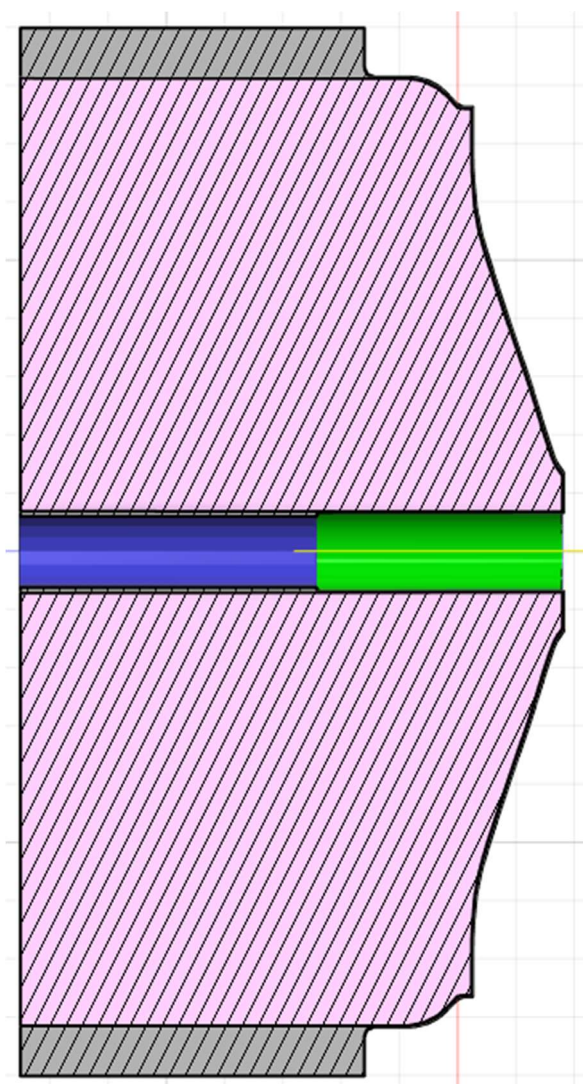


Obrázek 44: Znázornění 5. obráběcí strategie

Nástroj – vrták $\varnothing 6,1$ mm ze slinutého karbidu	f_{ot} [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Dormer Pramet – R453	0,2	55	20
			

Tabulka 22: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 5. obráběcí strategie

8) Vrtání díry o \varnothing 6,8 mm:

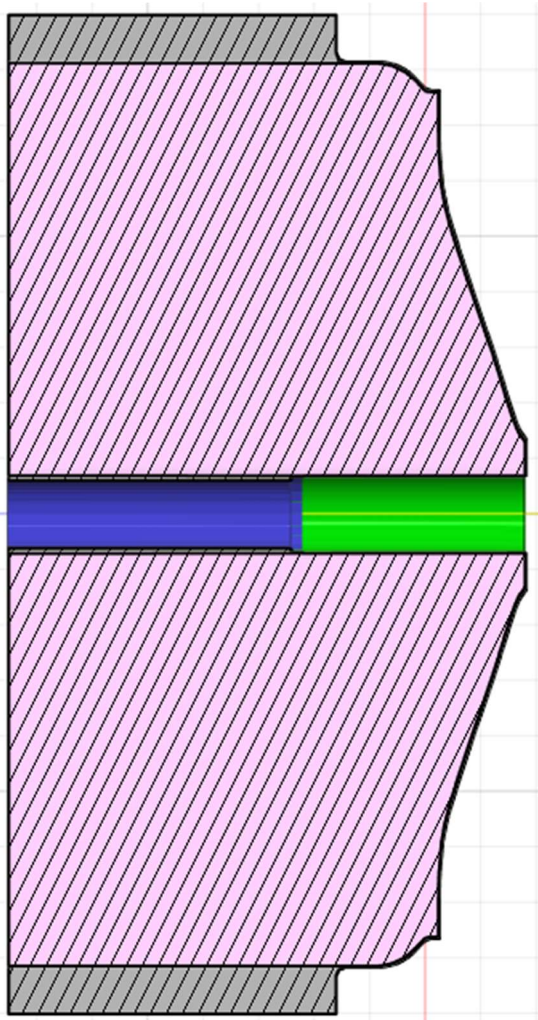


Obrázek 45: Znáznornění 6. obráběcí strategie


Nástroj – vrták \varnothing 6,8 mm ze slinutého karbidu	$f_{ot.}$ [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Dormer Pramet – R453	0,22	60	17

Tabulka 23: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 6. obráběcí strategie

9) Vystružení díry na $\varnothing 7$ H7:



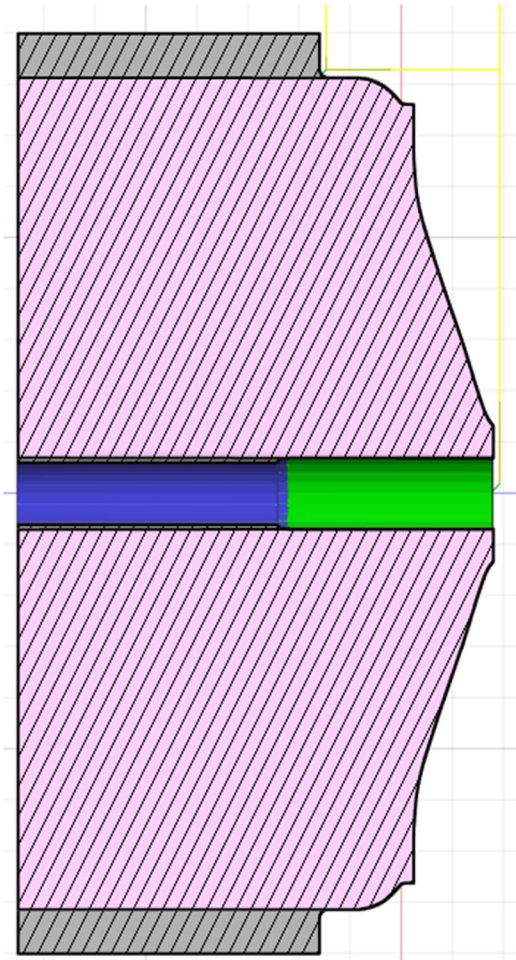
Obrázek 46: Znáornění 7. obráběcí strategie

Nástroj – HSS výstružník $\varnothing 7$ H7	$f_{ot.}$ [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Dormer Pramet – B901	0,4	12	22
			



Tabulka 24: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 7. obráběcí strategie

10) Obrobení vnější kontury načisto:

- + průjezd navíc (Spring Pass)



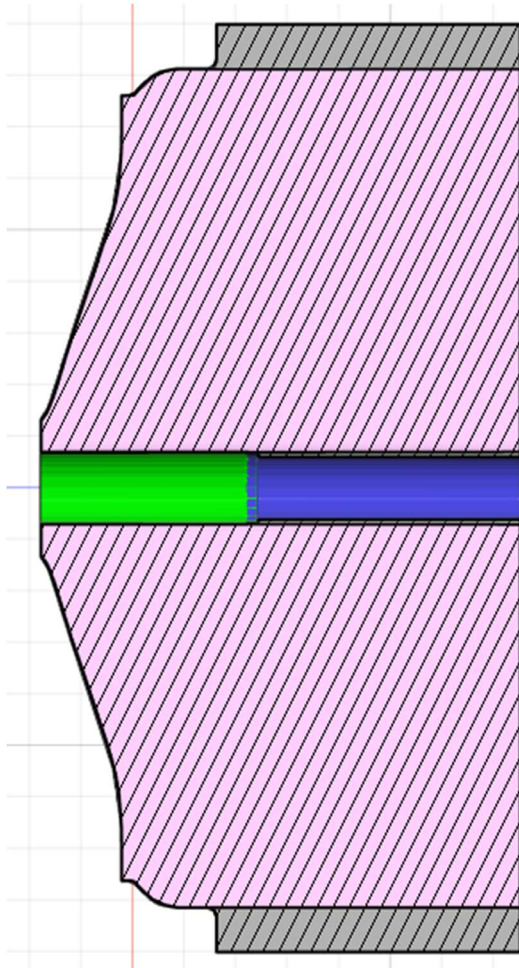
Obrázek 47: Znázornění 8. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění [s]
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	0,1	0,48	210	25
					

Tabulka 25: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 8. obráběcí strategie

11) Přeupnutí obrobku do upínacího přípravku:

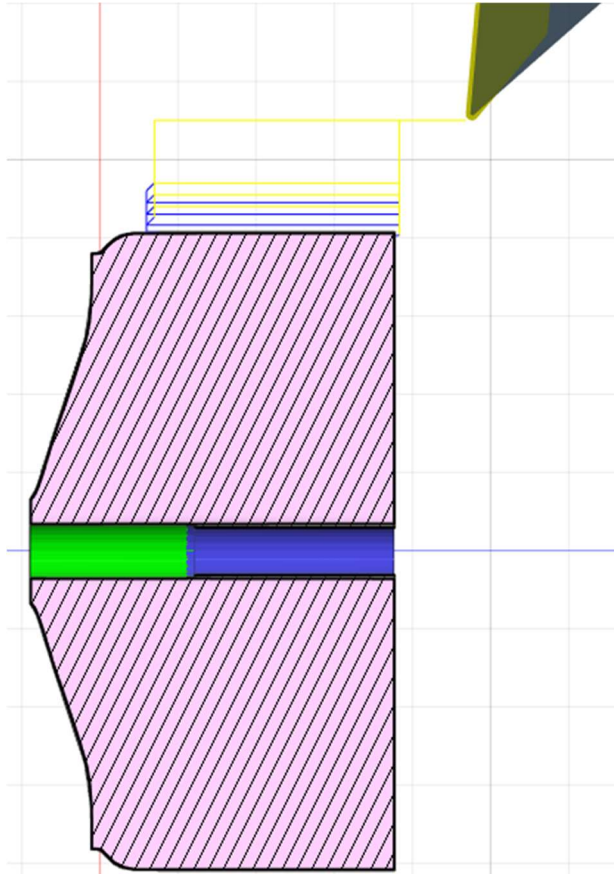
- upínací přípravek je upnut do sklíčidla



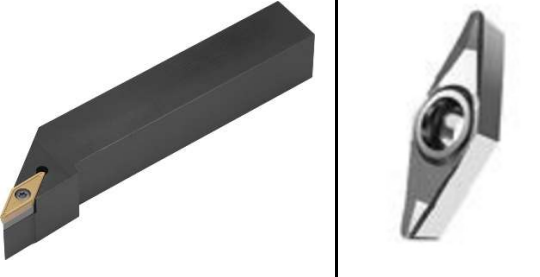
Obrázek 48: Zobrazení přeupnutí obrobku

12) Hrubování zbytku vnější kontury:

- podélný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm



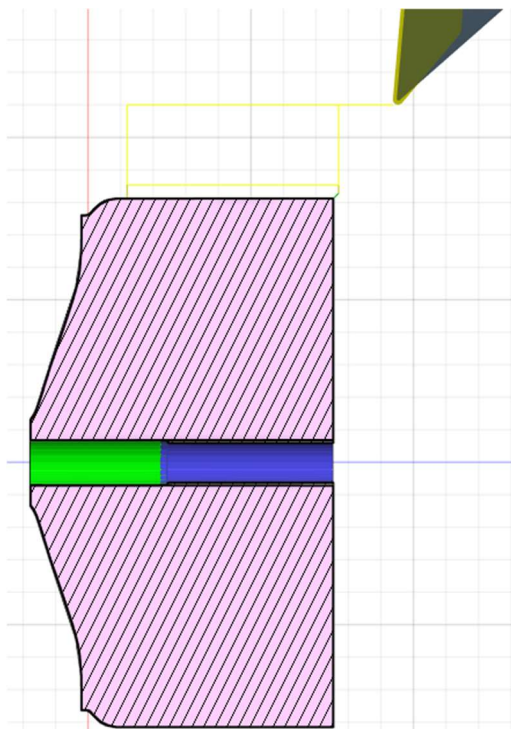
Obrázek 49: Znárodnění 9. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p [mm]	$f_{ot.}$ [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Držák	VBD				
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VC GT160408	1,5	0,48	210	37
					

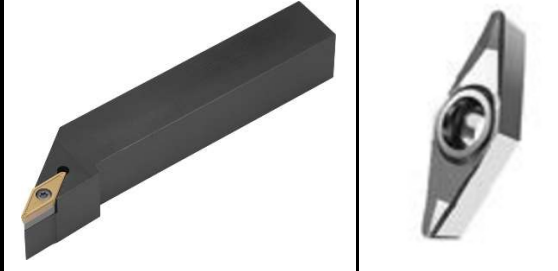
Tabulka 26: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 9. obráběcí strategie

13) Obrobení zbytku vnější kontury načisto:

- + průjezd navíc (Spring Pass)



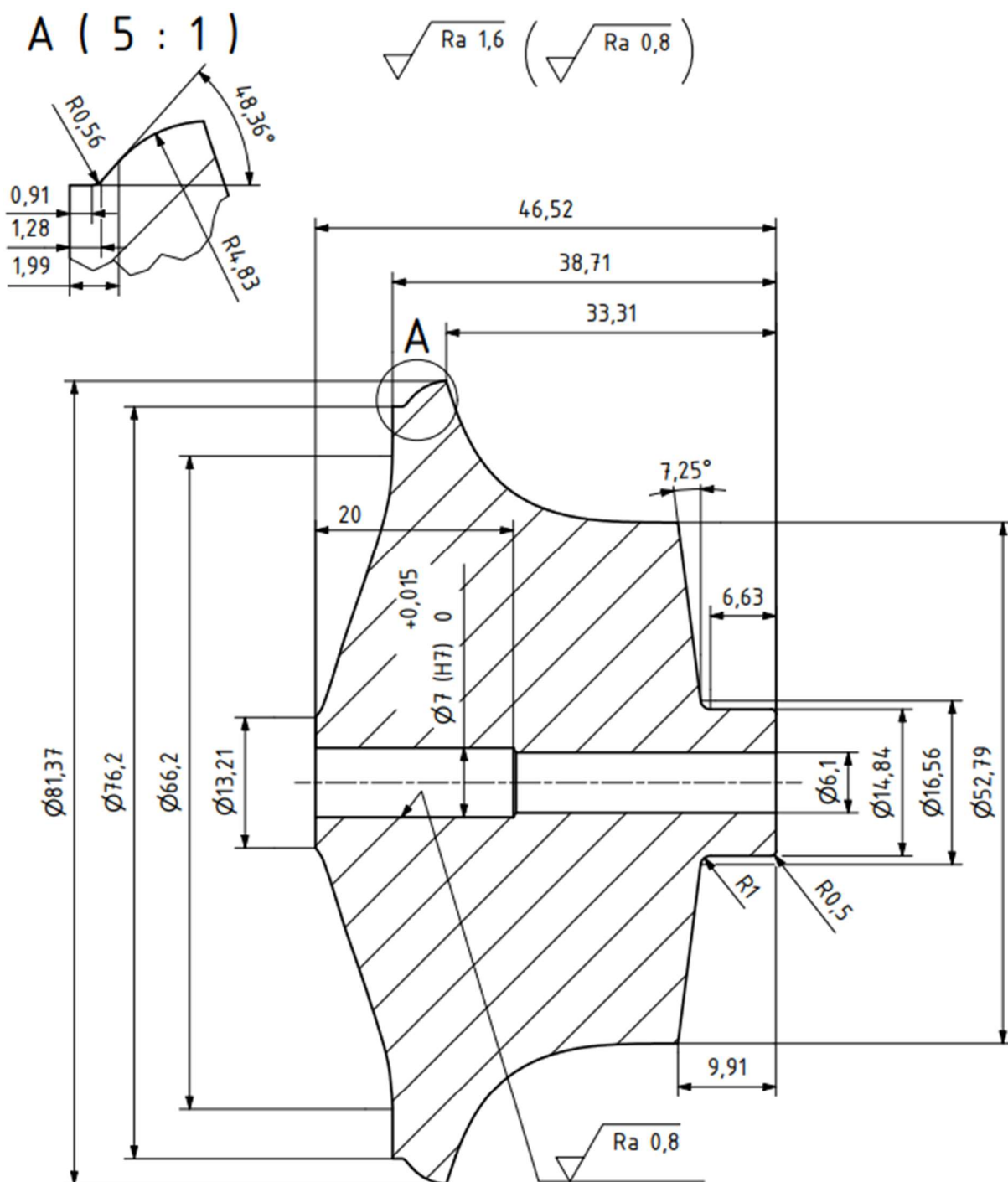
Obrázek 50: Znárodnění 10. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p [mm]	$f_{ot.}$ [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Držák	VBD				
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	0,1	0,48	210	26
					

Tabulka 27: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 10. obráběcí strategie

V celém procesu obrábění je nastaven horní limit otáček vřetene stroje na 3 000 ot./min, aby nedošlo k přetížení vřetene stroje. Celkový čas obrábění této součásti je dle simulace v CAD/CAM softwaru Fusion 360 4 minuty 32 sekund. Do tohoto času není zahrnuta doba potřebná k přeupínání obrobku.

5.8.5 Výrobní postup kinematické obálky lopatkového kola

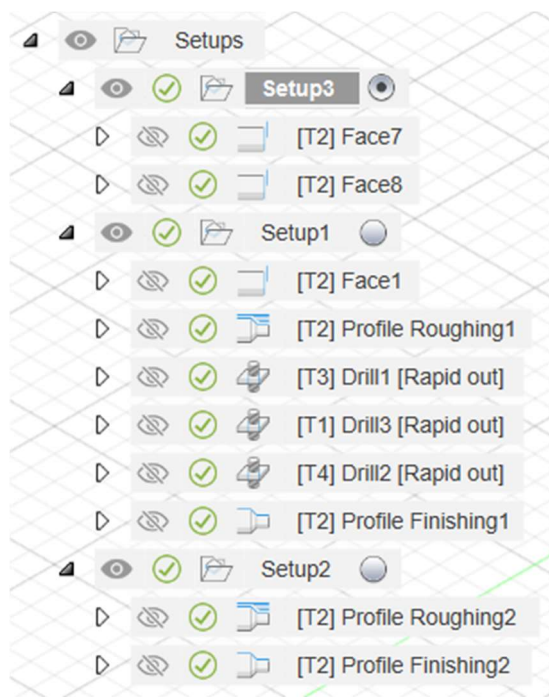


Rozměry a tvar neokótovaných tvarových ploch dle 3D modelu tělesa.

Úhel a délka zkosení mezi dírou o $\varnothing 7$ H7 a $\varnothing 6,1$ dle vrcholového úhlu vrtáku.

Obrázek 51: Zobrazení výrobního výkresu kinematické obálky lopatkového kola

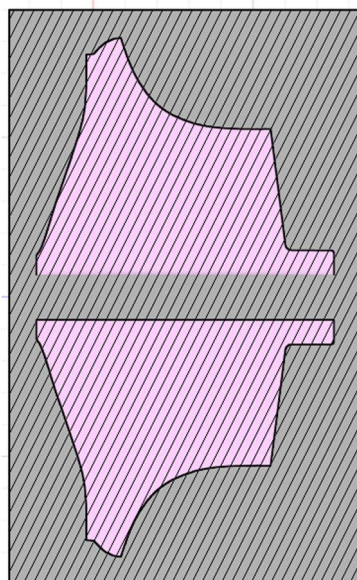
- ❖ Výrobní postup této součásti obsahuje dvě přepnutí a 10 obráběcích strategií.
- ❖ **Materiál kinematické obálky:** - slitina hliníku EN AW 7075 - T6
- ❖ **Zvolený polotovaz:** - kruhová tyč o průměru 90 mm a délce 55 mm
- ❖ **Výrobní postup:**



Obrázek 52: Souhrn obráběcích strategií výrobního procesu kinematické obálky lopatkového kola

1) Upnutí:

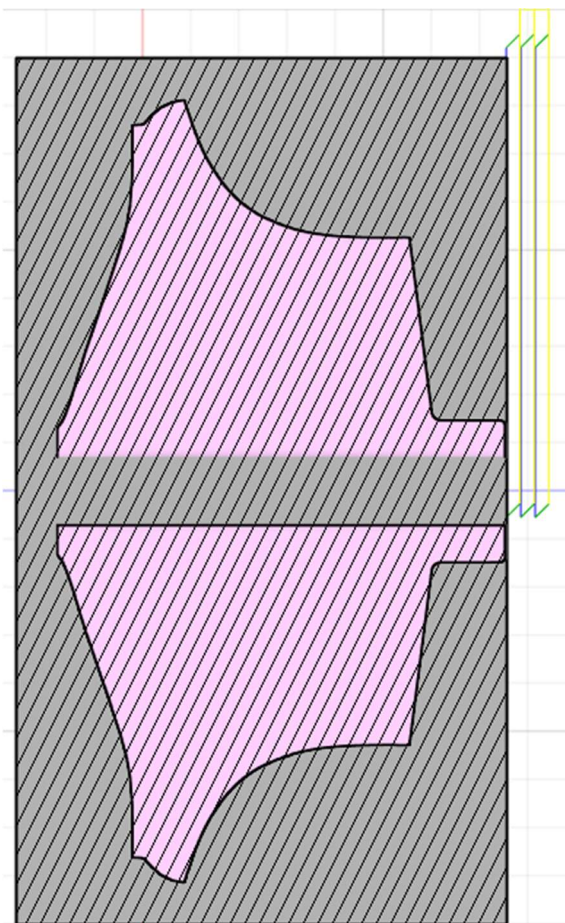
- Polotovaz je upnut do sklíčidla za vnější průměr. Délka upnuté části ve sklíčidle je 20 mm. Dle orientace obrázku 53 je sklíčidlo stroje z levé strany.



Obrázek 53: Zobrazení polohy 3D modelu výrobku v polotovaru

2) Obrobení čelní plochy – hrubování:

- příčný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm

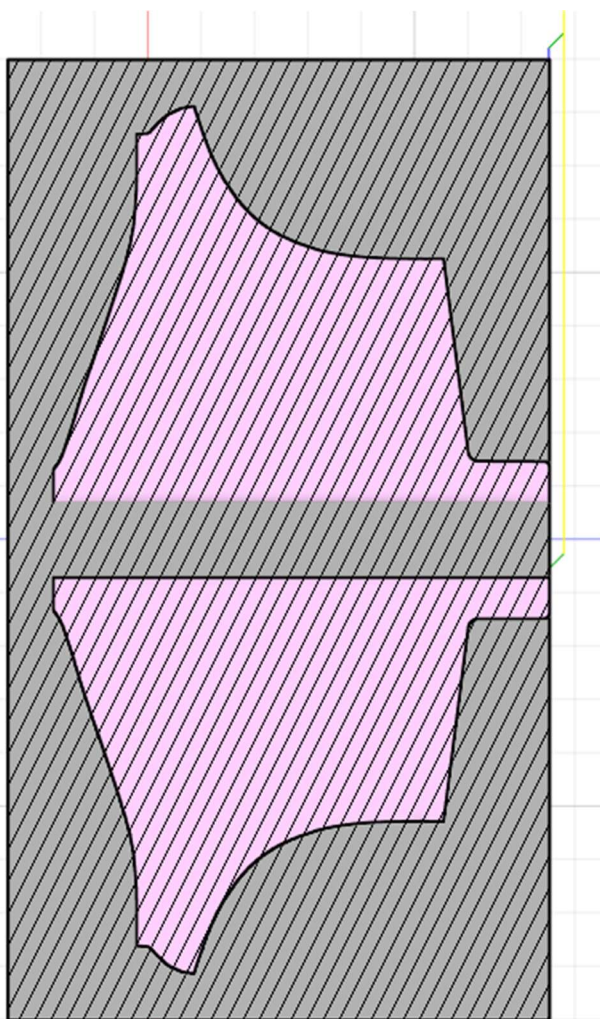


Obrázek 54: Znáznornění 1. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p [mm]	$f_{ot.}$ [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Držák	VBD				
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VC GT160408	1,5	0,48	210	31

Tabulka 28: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 1. obráběcí strategie

3) Obrobení čelní plochy – načisto:



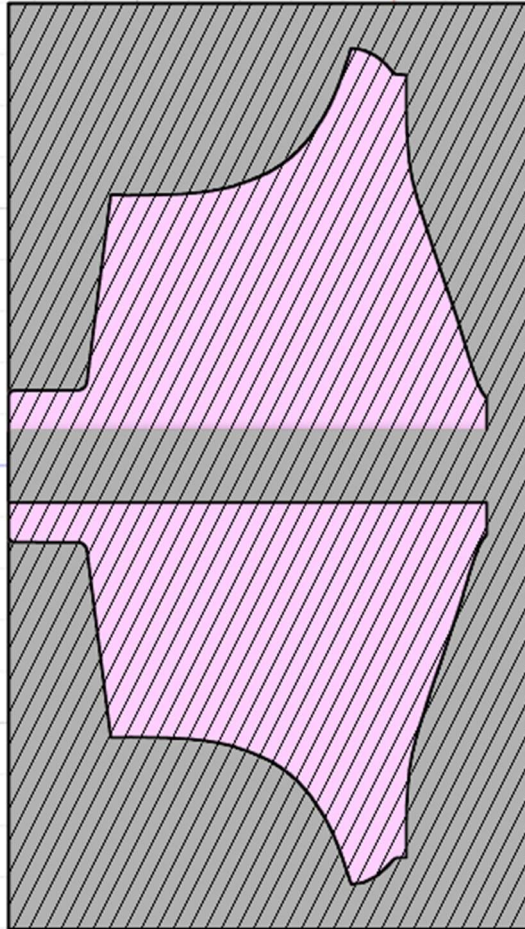
Obrázek 55: Znáznornění 2. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění [s]
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	0,1	0,48	210	20

Tabulka 29: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 2. obráběcí strategie

4) Přeupnutí polotovaru:

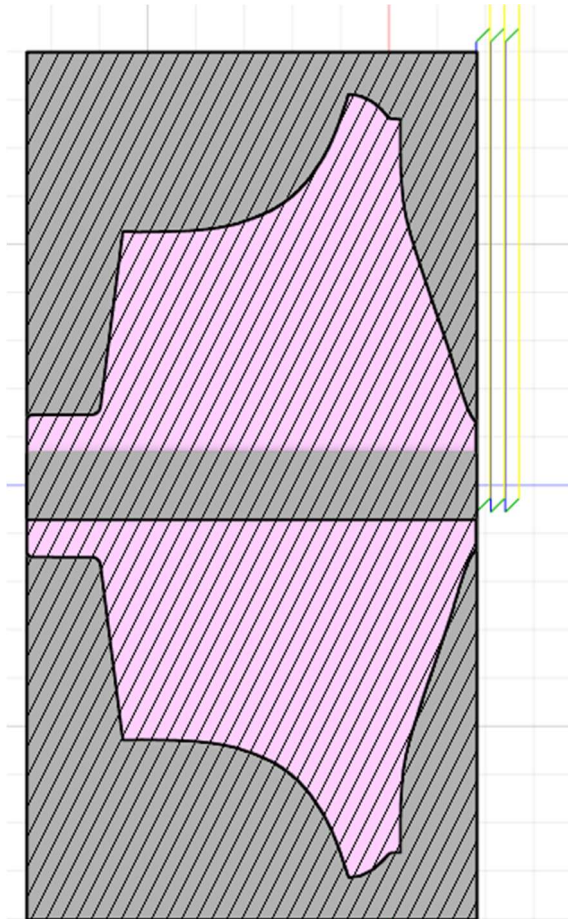
- Obrobek je otočen a upnut do sklíčidla. Délka upnuté části ve sklíčidle je 20 mm. Stále zachováváme orientaci, že sklíčidlo je nalevo dle obr. 56.



Obrázek 56: Zobrazení přeupnutí polotovaru

5) Obrobení druhé čelní plochy polotovaru – hrubování:

- příčný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm



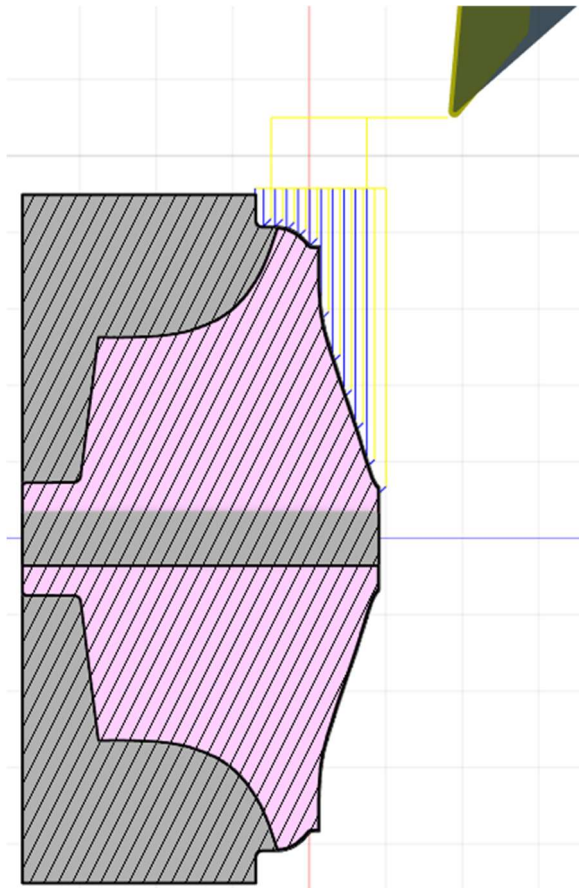
Obrázek 57: Znárodnění 3. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábnění [s]
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	1,5	0,48	210	31

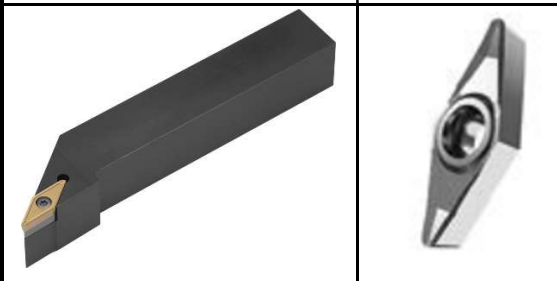
Tabulka 30: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 3. obráběcí strategie

6) Hrubování vnější kontury:

- příčný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm

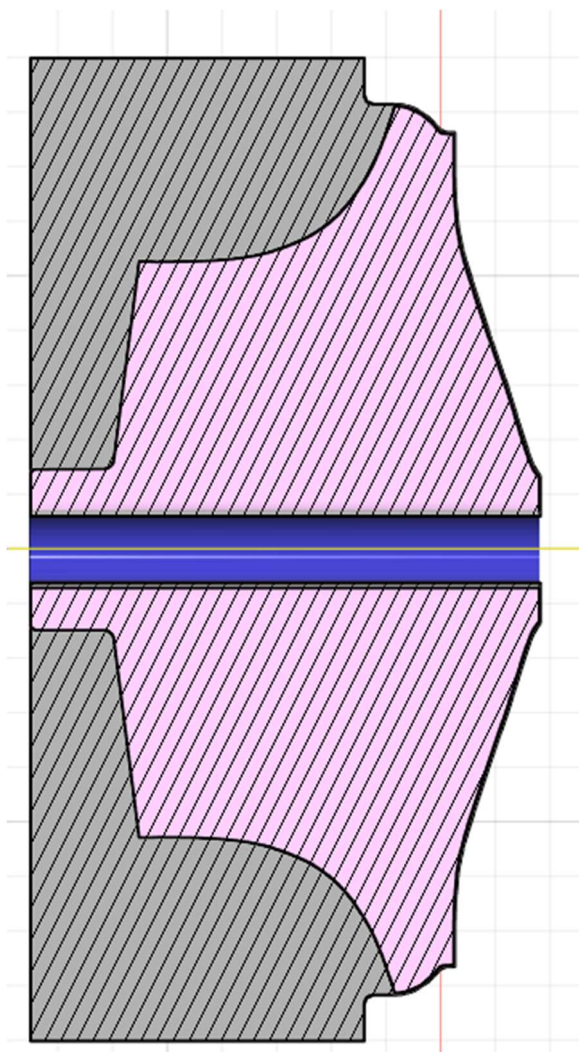


Obrázek 58: Znázornění 4. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění [s]
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	1,5	0,48	210	42
					

Tabulka 31: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 4. obráběcí strategie

7) Vrtání průchozí díry o \varnothing 6,1 mm:



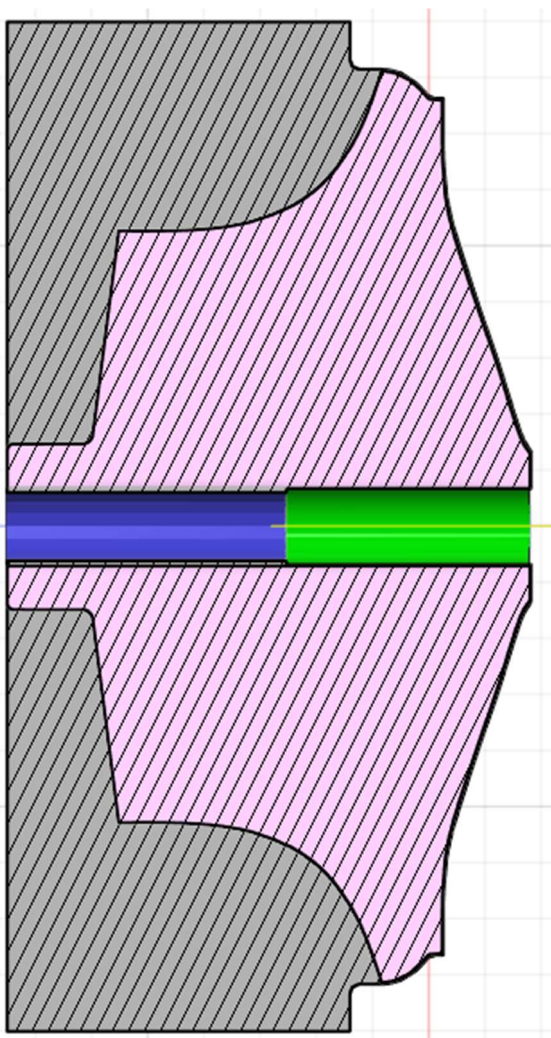
Obrázek 59: Znáornění 5. obráběcí strategie

Nástroj – vrták \varnothing 6,1 mm ze slinutého karbidu	f_{ot} [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Dormer Pramet – R453	0,2	55	20




Tabulka 32: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 5. obráběcí strategie

8) Vrtání díry o \varnothing 6,8 mm:

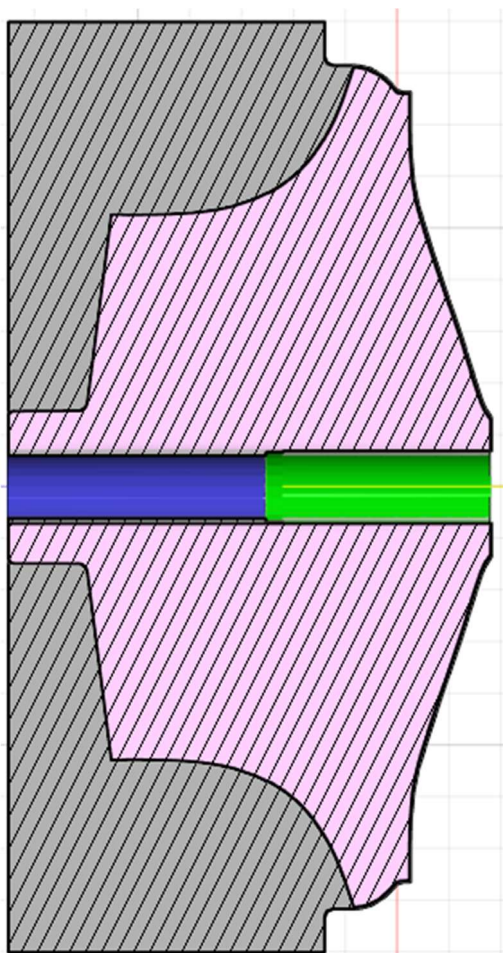


Obrázek 60: Znázornění 6. obráběcí strategie


Nástroj – vrták \varnothing 6,8 mm ze slinutého karbidu	$f_{ot.}$ [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Dormer Pramet – R453	0,22	60	18
			

Tabulka 33: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 6. obráběcí strategie

9) Vystružení díry na $\varnothing 7$ H7:



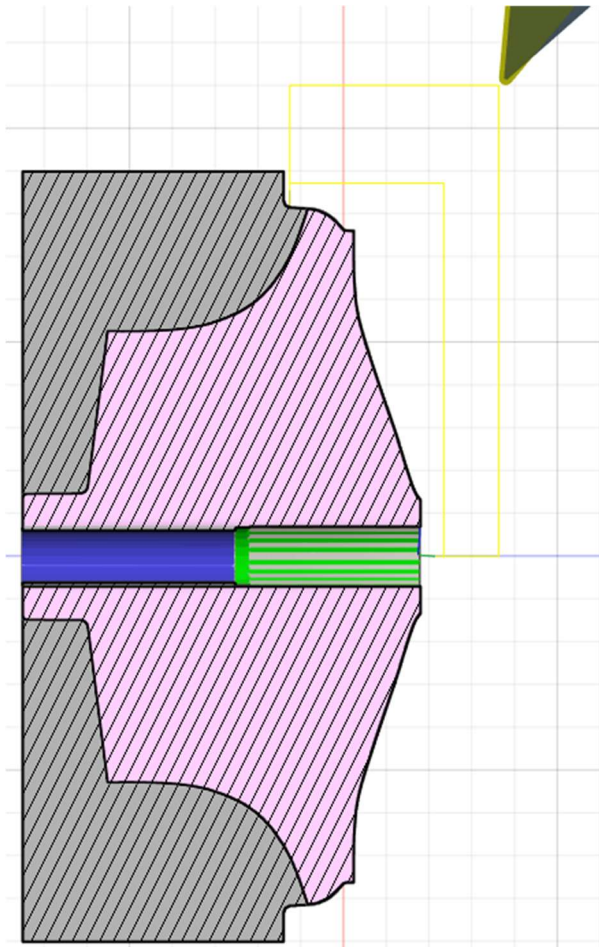
Obrázek 61: Znázornění 7. obráběcí strategie

Nástroj – HSS výstružník $\varnothing 7$ H7	f_{ot} [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Dormer Pramet – B901	0,4	12	22
			



Tabulka 34: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 7. obráběcí strategie

10) Obrobení vnější kontury načisto:

- + průjezd navíc (Spring Pass)



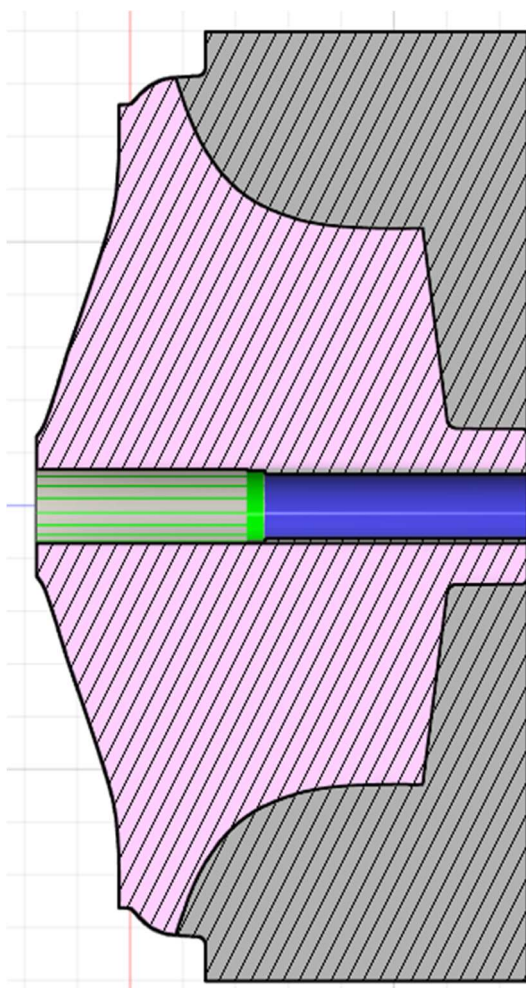
Obrázek 62: Znáznornění 8. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p	$f_{ot.}$	v_c	čas
Držák	VBD	[mm]	[mm/ot.]	[m/min]	obrábění [s]
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VC GT160408	0,1	0,48	210	23
					

Tabulka 35: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 8. obráběcí strategie

11) Přeupnutí obrobku do upínacího přípravku:

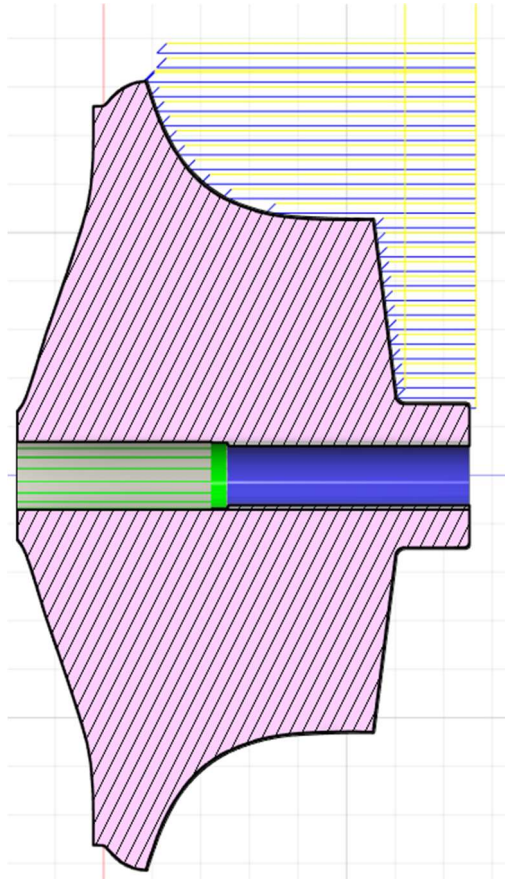
- upínací přípravek je upnut do sklíčidla



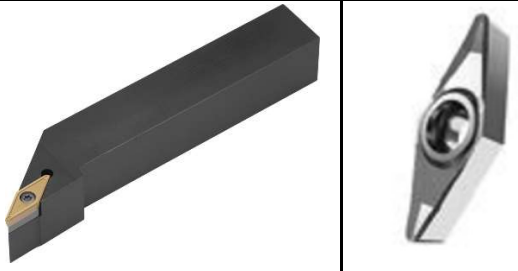
Obrázek 63: Zobrazení přeupnutí obrobku

12) Hrubování zbytku vnější kontury:

- podélný hrubovací cyklus
- přídavek na dokončovací obráběcí strategii 0,1 mm



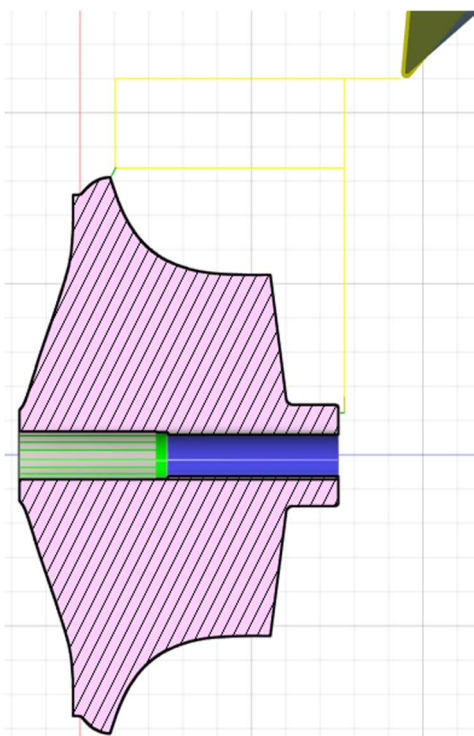
Obrázek 64: Znárodnění 9. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p [mm]	f_{ot} [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrnění [s]
Držák	VBD				
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	1,5	0,48	210	81
					

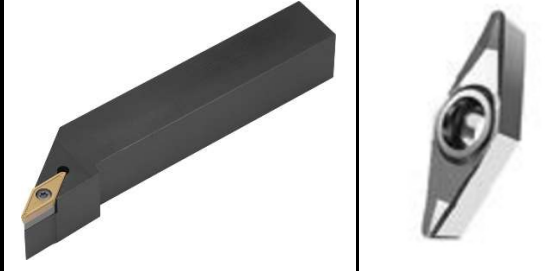
Tabulka 36: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 9. obráběcí strategie

13) Obrobení zbytku vnější kontury načisto:

- + průjezd navíc (Spring Pass)



Obrázek 65: Znázornění 10. obráběcí strategie

Nástroj – vnější pravý soustružnický nůž		a_p [mm]	$f_{ot.}$ [mm/ot.]	v_c [m/min]	čas obrábění [s]
Držák	VBD				
Dormer Pramet SVJCR 2020 K 16-M-A	VCGT160408	0,1	0,48	210	25
					

Tabulka 37: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 10. obráběcí strategie

V celém procesu obrábění je nastaven horní limit otáček vřetene stroje na 3 000 ot./min, aby nedošlo k přetížení vřetene stroje. Celkový čas obrábění této součásti je dle simulace v CAD/CAM softwaru Fusion 360 5 minut 13 sekund. Do tohoto času není zahrnuta doba potřebná k přeupínání obrobku.

6. Závěr

V teoretické části této bakalářské práce bylo nejprve probráno využití lopatkových kol, princip a funkce turbodmychadel. Dále se teoretická část věnuje pracovním podmínkám kompresorového a turbínového lopatkového kola turbodmychadla ve spalovacích motorech, také je zde popsána konstrukce radiálního kompresorového kola. Teoretická část bakalářské práce pokračuje kapitolou zaměřenou na výrobu lopatkových kol turbodmychadel, kde jsou zahrnuty všechny výrobní technologie, které se na výrobu lopatkových kol používají. Jedná se o technologii slévání, obrábění a 3D tisk. V této kapitole je zahrnuta i problematika vhodných materiálů, které se používají na výrobu lopatkových kol turbodmychadel, jak kol kompresorových, tak kol turbínových. Dále je v této práci popsána problematika programování CNC strojů. V této kapitole se nachází popis všech způsobů tvorby NC kódu. Jedná se o ruční, dílenské a strojní programování.

Bakalářská práce pokračuje částí experimentální, která se zaměřuje na konstrukční návrh a výrobu upínacího přípravku kinematické obálky lopatkového kompresorového kola turbodmychadla. V této části nejprve dochází k volbě výrobní technologie, stanovení požadavků na konstrukci upínacího přípravku a k výběru materiálu upínacího přípravku. Následuje kapitola o zadaném materiálu kinematické obálky kompresorového kola turbodmychadla – slitině hliníku 7075 - T6. Dále je v praktické části navrženo 5 konstrukčních variant upínání kinematické obálky. Tyto varianty jsou následně rozhodovací analýzou porovnány a dochází k výběru nejlepší navržené varianty upínacího přípravku. Praktická část této bakalářské práce pokračuje detailními popisy výrobních postupů všech dílů vybraného upínacího přípravku a výrobního postupu dílu na měření radiálního házení obrobku v upínacím přípravku a výrobního postupu kinematické obálky lopatkového kola. Výroba hřídele upínacího přípravku je uvažována na konvenčním soustruhu. Výroba všech ostatních dílů je uvažována na CNC soustruhu. Výkresy a 3D modely dílů byly vypracovány v CAD softwaru Inventor Professional od firmy Autodesk a programování obráběcích procesů pro výrobu dílů na CNC soustruhu bylo prováděno v CAD/CAM softwaru Fusion 360 taktéž od firmy Autodesk. Na fyzickou výrobu z časových důvodů nedošlo, a tak jsou výrobní postupy doplněny o fotky ze simulace obráběcího procesu softwaru Fusion 360 s viditelnými dráhami nástrojů dané obráběcí strategie.

7. Bibliografie

- [1] ŠKORPÍK, Jiří. *Turbomachinery.education: ÚVOD DO LOPATKOVÝCH STROJŮ* [online]. [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://turbomachinery.education/uvod-do-lopatkovych-stroju.html>
- [2] MILLER, Jay K. *Turbo: real world high-performance turbocharger systems*. North Branch, MN: CarTech, 2008, 160 p. ISBN 19-324-9429-4.
- [3] *Oil consumption caused by unfavourable operating conditions for turbocharger* [online]. [cit. 2023-07-06]. Dostupné z: <https://www.motorservice.com/en/technipedia/post/oil-consumption-caused-by-unfavourable-operating-conditions-for-turbocharger/>
- [4] FLEXIAMI AUTO. *Teorie - Princip turbodmychadla*. In: Flexamiauto.cz [online]. [cit. 2023-12-30]. Dostupné z: <https://www.flexamiauto.cz/teorie/>
- [5] LORIA, Edward A. *Quo vadis gamma titanium aluminide*. *Intermetallics*. 2001, vol. 9, is. 12, s. 997-1001. ISSN 0966-9795.
- [6] ŠUPÁLEK, Milan. *Přesné lití turbínových kol turbodmychadel ze slitin TiAl*. 2009. VUT Brno. Diplomová práce
- [7] SKOŘEPA, Jakub. *Víceosé obrábění lopatkových kol s využitím CAM*. 2022. ČVUT Praha. Diplomová práce
- [8] TIŠER, Tomáš. *Obrábění lopatkových kol*. 2020. ČVUT Praha. Diplomová práce
- [9] SMITH, Alison. *Advances in Turbocharger Impeller Materials*. In: Cummins Turbo Technologies Ltd [online]. 2006 [cit. 2023-12-11]. Dostupné z: https://caboturbo.nl/wp/wp-content/uploads/2012/03/HTi_07.pdf
- [10] ANBANG, Qu a Li FANCHUN. *Influence of 3D printing on compressor impeller fatigue crack propagation life*. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023.
- [11] REDWOOD, Ben, Filemon SCHÖFFER a Brian GARRET. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. Amsterdam: 3D Hubs, 2018. ISBN 9082748509.
- [12] TETSUI, Toshimitsu: *Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles*. *Materials Science and Engineering*:. 2002. ISSN 0921-5093.

- [13] WALLACE, Greg, Andrew P. JACKSON a Stephen P. MIDSON. *Novel Method for Casting High Quality Aluminum Turbocharger Impellers*. SAE International Journal of Materials and Manufacturing Vol. 3, No. 1. 2010, 405-412.
- [14] POKORNÝ, Peter a KUBEK Andrej. *Problematika opotrebenia při 5-osovom frézování* [online]. [cit. 2023-08-28]. Dostupné z:
<https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/16378/1/Kubek.pdf>
- [15] *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2023-08-30]. Dostupné z:
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/profile-milling>
- [16] *Hoffmann Group* [online]. [cit. 2023-08-31]. Dostupné z:
<https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/oblasti-pouziti/obrabeni/tk-soudeckova-freza-garant-ppc/e/68093/>
- [17] *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. 1. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6.
- [18] VRABEC, Martin a Jan MÁDL. *NC programování v obrábění*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3045-8.
- [19] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.
- [20] *6061 VS 7075 hliník, jaký je rozdíl?*. In: DEK [online]. 27.10.2020 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.dekmake.com/cs/6061-vs-7075-hlinik/>
- [21] *Obecný úvod do problematiky CNC programování*. [online]. [cit. 2023-10-08]. Dostupné z: https://www.sosbites.cz/images/stories/Pro-studenty/studijni-materialy/VUKOV_TEXT_-_1.ST.pdf

8. Seznam tabulek

Tabulka 1: Význam písmen v NC kódu [21]	24
Tabulka 2: Chemické složení slitiny hliníku 7075 - T6 [20]	29
Tabulka 3: Vícekriteriální porovnání variant upínacích přípravků	35
Tabulka 4: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 1. obráběcí strategie	42
Tabulka 5: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 2. obráběcí strategie	43
Tabulka 6: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 3. obráběcí strategie	44
Tabulka 7: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 4. obráběcí strategie	45
Tabulka 8: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 5. obráběcí strategie	46
Tabulka 9: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 6. obráběcí strategie	48
Tabulka 10: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 7. obráběcí strategie	49
Tabulka 11: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 8. obráběcí strategie	50
Tabulka 12: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 9. obráběcí strategie	51
Tabulka 13: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 10. obráběcí strategie	52
Tabulka 14: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 11. obráběcí strategie	53
Tabulka 15: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 12. obráběcí strategie	54
Tabulka 16: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 13. obráběcí strategie	55
Tabulka 17: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 14. obráběcí strategie	56
Tabulka 18: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 1. obráběcí strategie	59
Tabulka 19: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 2. obráběcí strategie	60
Tabulka 20: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 3. obráběcí strategie	62
Tabulka 21: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 4. obráběcí strategie	63
Tabulka 22: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 5. obráběcí strategie	64
Tabulka 23: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 6. obráběcí strategie	65
Tabulka 24: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 7. obráběcí strategie	66
Tabulka 25: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 8. obráběcí strategie	67
Tabulka 26: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 9. obráběcí strategie	69
Tabulka 27: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 10. obráběcí strategie	70
Tabulka 28: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 1. obráběcí strategie	73
Tabulka 29: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 2. obráběcí strategie	74
Tabulka 30: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 3. obráběcí strategie	76

Tabulka 31: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 4. obráběcí strategie.....	77
Tabulka 32: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 5. obráběcí strategie.....	78
Tabulka 33: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 6. obráběcí strategie.....	79
Tabulka 34: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 7. obráběcí strategie.....	80
Tabulka 35: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 8. obráběcí strategie.....	81
Tabulka 36: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 9. obráběcí strategie.....	83
Tabulka 37: Nástroj, řezné podmínky a čas obrábění 10. obráběcí strategie.....	84

9. Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma turbodmychadla automobilu [12]	12
Obrázek 2: Řez turbodmychadlem [3].....	13
Obrázek 3: Popis radiálního kompresorového kola [2]	14
Obrázek 4: Lopatkové kolo vyrobené z čiré pryskyřice metodou SLA [11]	16
Obrázek 5: Turbínové kolo automobilového turbodmychadla odlité ze slitiny γ –TiAl [5]	18
Obrázek 6: Kompresorové lopatkové kolo turbodmychadla o průměru 85 mm vyrobené ze slitiny hliníku metodou semi – solid casting [13]	19
Obrázek 7: Porovnání vykloněné a nevykloněné kulové frézy [15]	21
Obrázek 8: Porovnání kulové a soudečkové frézy [16]	21
Obrázek 9: Příklad jednoho řádku NC kódu [21]	23
Obrázek 10: Schéma postupu tvorby NC kódu.....	25
Obrázek 11: Skica varianty 1.....	30
Obrázek 12: Skica varianty 2.....	31
Obrázek 13: Skica varianty 3.....	32
Obrázek 14: Skica varianty 4.....	33
Obrázek 15: Skica varianty 5.....	34
Obrázek 16: Zobrazení výrobního výkresu hřídele.....	36
Obrázek 17: Závitožezné očko (ilustrační obrázek)	36
Obrázek 18: Zobrazení výrobního výkresu těla upínacího přípravku.....	40
Obrázek 19: Souhrn obráběcích strategií výrobního procesu těla upínacího přípravku	41
Obrázek 20: Zobrazení polohy 3D modelu výrobku v polotovaru	41
Obrázek 21: Znázornění 1. obráběcí strategie	42
Obrázek 22: Znázornění 2. obráběcí strategie	43
Obrázek 23: Znázornění 3. obráběcí strategie	44
Obrázek 24: Znázornění 4. obráběcí strategie	45
Obrázek 25: Znázornění 5. obráběcí strategie	46
Obrázek 26: Zobrazení přeupnutí obrobku	47
Obrázek 27: Znázornění 6. obráběcí strategie	48
Obrázek 28: Znázornění 7. obráběcí strategie	49
Obrázek 29: Znázornění 8. obráběcí strategie	50

Obrázek 30: Znázornění 9. obráběcí strategie	51
Obrázek 31: Znázornění 10. obráběcí strategie	52
Obrázek 32: Znázornění 11. obráběcí strategie	53
Obrázek 33: Znázornění 12. obráběcí strategie	54
Obrázek 34: Znázornění 13. obráběcí strategie	55
Obrázek 35: Znázornění 14. obráběcí strategie	56
Obrázek 36: Zobrazení výrobního výkresu dílu na měření radiálního házení.....	57
Obrázek 37: Souhrn obráběcích strategií výrobního procesu dílu na měření radiálního házení	58
Obrázek 38: Zobrazení polohy 3D modelu výrobku v polotovaru	58
Obrázek 39: Znázornění 1. obráběcí strategie	59
Obrázek 40: Znázornění 2. obráběcí strategie	60
Obrázek 41: Zobrazení přeupnutí obrobku	61
Obrázek 42: Znázornění 3. obráběcí strategie	62
Obrázek 43: Znázornění 4. obráběcí strategie	63
Obrázek 44: Znázornění 5. obráběcí strategie	64
Obrázek 45: Znázornění 6. obráběcí strategie	65
Obrázek 46: Znázornění 7. obráběcí strategie	66
Obrázek 47: Znázornění 8. obráběcí strategie	67
Obrázek 48: Zobrazení přeupnutí obrobku	68
Obrázek 49: Znázornění 9. obráběcí strategie	69
Obrázek 50: Znázornění 10. obráběcí strategie	70
Obrázek 51: Zobrazení výrobního výkresu kinematické obálky lopatkového kola	71
Obrázek 52: Souhrn obráběcích strategií výrobního procesu kinematické obálky lopatkového kola	72
Obrázek 53: Zobrazení polohy 3D modelu výrobku v polotovaru	72
Obrázek 54: Znázornění 1. obráběcí strategie	73
Obrázek 55: Znázornění 2. obráběcí strategie	74
Obrázek 56: Zobrazení přeupnutí polotovaru	75
Obrázek 57: Znázornění 3. obráběcí strategie	76
Obrázek 58: Znázornění 4. obráběcí strategie	77
Obrázek 59: Znázornění 5. obráběcí strategie	78

Obrázek 60: Znázornění 6. obráběcí strategie	79
Obrázek 61: Znázornění 7. obráběcí strategie	80
Obrázek 62: Znázornění 8. obráběcí strategie	81
Obrázek 63: Zobrazení přeupnutí obrobku	82
Obrázek 64: Znázornění 9. obráběcí strategie	83
Obrázek 65: Znázornění 10. obráběcí strategie	84

10. Seznam příloh

Příloha 1: Výkres sestavy upínacího přípravku s kinematickou obálkou	94
Příloha 2: Výrobní výkres hřídele.....	95
Příloha 3: Výrobní výkres těla upínacího přípravku	96
Příloha 4: Výrobní výkres dílu na měření radiálního házení.....	97
Příloha 5: Výrobní výkres kinematické obálky lopatkového kola.....	98

Příloha 2: Výrobní výkres hřídele

