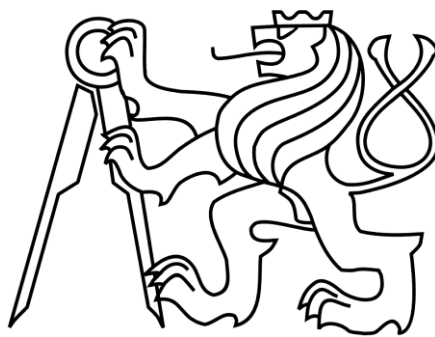


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A  
METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Prototypová výroba části kolové skupiny s využitím CAM

Prototype manufacturing of the part of wheel assembly with use of CAM

AUTOR: Lukáš Holoubek

STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Michal Slaný

2022

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Holoubek** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **492615**  
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:

**Prototypová výroba části kolové skupiny s využitím CAM**

Název bakalářské práce anglicky:

**Prototype manufacturing of the part of wheel assembly with use of CAM**

Pokyny pro vypracování:

Proveďte návrh výrobního postupu a realizujte výrobu dané součásti.

1. Historie a vývoj CAM softwaru
2. Rozbor dokumentace
3. Výrobní postup, volba nástrojů a návrh upínání
4. Tvorba NC programu a výroba
5. Měření a vyhodnocení výroby

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Michal Slaný ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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


Datum zadání bakalářské práce: **15.03.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **29.07.2022**

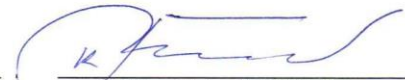
Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_



Ing. Michal Slaný  
podpis vedoucí(ho) práce



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



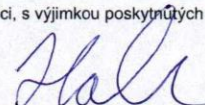
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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.

6.4.2022

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval sám s využitím literatury řádně ocitované dle normy ČSN ISO 960. Všechny zdroje informací, ze kterých jsem čerpal, uvádím na stránce použitých zdrojů literatury.

V Praze dne: .....

Podpis: .....

## Poděkování

Děkuji Ing. Michalovi Slanému za vedení a realizaci bakalářské práce, za dobré rady i věcné připomínky. CarTech CTU mi vyšel vstříc ve spolupráci a jsem velice rád, že mohu být součástí projektu Formula Student. Také bych tímto rád poděkovat své rodině a kamarádům za podporu při studiu.

## Abstrakt

Účel této práce je projít celým procesem výroby středu kola na studentskou formuli z pozice technologa. Výsledkem tak je 8 vyrobených funkčních dílů (dvě sady). Vypracovaný výrobní postup bude možné v budoucnu použít i pro výrobu dalších kusů pro nové formule, životnost dílů je totiž omezena pouze na jednu sezónu. Tvorba NC programu pro řízení CNC strojů byla vytvořena pomocí externího CAM softwaru. Část práce se zabývá historií a vývojem těchto CAM softwarů. Díl se po vyrobení zkontroluje na tříosém souřadnicovém měřícím stroji a provede se zhodnocení naměřených hodnot.

## Klíčová slova

Výrobní postup, historie CAM, vývoj CAM, střed kola, CMM souřadnicové měření, návrh upnutí, CNC obrábění

## Abstract

The purpose of this work is to go through the entire process of manufacturing a wheel center on a student formula from the position of a technologist. The result is 8 manufactured functional parts (two sets). The developed production process will be able to be used in the future for the production of other pieces for new formulas, as the lifespan of the parts is limited to one season only. The creation of the NC program for the control of CNC machines was created using external CAM software. Part of the work deals with the history and development of these CAM software. After production, the part is checked on a three-axis coordinate measuring machine and the measured values are evaluated.

## Key words

Manufacturing process, CAM history, CAM development, wheel center, CMM coordinate measurement, fixture design, CNC machining

## Použité zkratky

- CAD Computer Aided Design – počítačem podporované projektování
- CAM Computer Aided Manufacturing – počítačem podporovaná výroba
- CAE Computer Aided Engineering – počítačový software k inženýrským analýzám
- CMM Coordinate Measuring Machine – Souřadnicový měřicí stroj
- CNC Computer Numerical Control – počítačem řízený obráběcí stroj
- NC Numerical Control – číslicové řízení
- CL data Cutter Location – dráhy virtuálního nástroje na virtuálním stroji
- HSM High-Speed Machining – obrábění vysokou rychlostí

## Použité symboly a jednotky

- $T_{as}$  strojní čas [s]
- $v_c$  řezná rychlost [ $m \cdot \text{min}^{-1}$ ]
- $f$  posuv na otáčku [mm/ot]
- $f_z$  posuv na zub [mm/z]
- $a_p$  hloubka řezu [mm]
- $R_a$  průměrná úchylka profilu drsnosti [ $\mu\text{m}$ ]

## Obsah:

1	Úvod .....	10
2	Historie a vývoj CAM softwaru .....	11
2.1	Historie CAM softwaru .....	12
2.2	Vývoj CAM softwaru .....	16
3	Rozbor výrobní dokumentace .....	19
3.1	Popis součásti .....	21
3.2	Sestava kolové soustavy .....	22
4	Volba a návrh polotovaru .....	23
5	Výrobní postup .....	24
5.1	1. operace Řezání .....	25
5.2	2. operace soustružení a vrtání .....	26
5.3	3. operace soustružení .....	28
5.4	4. operace frézování a vrtání .....	30
5.5	5. operace frézování .....	33
5.6	Návrh upnutí .....	35
5.6.1	Upnutí 2. operace .....	35
5.6.2	Upnutí 3. operace .....	35
5.6.3	Upnutí 4. operace .....	36
5.6.4	Upnutí 5. operace .....	39
5.7	Volba nástrojů a upínačů .....	40
5.7.1	Nástroje použité na soustruhu Okuma Genos L200E-MY .....	40
5.7.2	Nástroje použité na frézce HAAS VF2 .....	46
5.8	Použité výrobní a měřicí stroje .....	50
5.8.1	CNC soustruh Okuma Genos L200E-MY .....	50
5.8.2	CNC frézka HAAS-VF2 .....	51
5.8.3	Pásová pila Bomar practix 285.230 G .....	52
5.8.4	Souřadnicový měřicí stroj ZEISS UCM 1000 .....	53
5.9	Využití materiálu .....	54
6	Tvorba NC programu .....	56
7	Měření na CMM .....	59



7.1	Kontrola drsnosti povrchu .....	62
8	Diskuse.....	64
9	Závěr .....	65
10	Seznam obrázků .....	66
11	Seznam tabulek .....	68
12	Zdroje.....	69

# 1 Úvod

Hlavním cílem této práce je vyrobit funkční sadu dílů středu kola na projekt studentské formule s využitím souřadnicových výrobních strojů. Budu se zde zabývat optimalizací řezných podmínek obrábění, procesu výroby a volbou nejvhodnějšího řešení výrobního postupu. Má role je především pozice technologa, kdy ze zadané výrobní dokumentace projdu celým výrobním procesem od objednávky materiálu až po předání vyrobené dávky zákazníkovi (CarTech CTU).

CNC stroje, na kterých proběhne výroba, jsou řízeny NC programem. Tento NC program vytvořím pomocí externího CAM softwaru. Tomuto způsob tvorby programu se odborně říká strojní programování. Programování je založené na postupném způsobu tvorby NC kódu, kterému se věnuji ve své práci. Tento program následně nahraji do řídicího softwaru numericky řízeného stroje, provedu finální simulaci drah nástroje a poté tak zahájím i samotnou výrobu.

Část práce je soustředěna na výběr vhodného řešení upnutí součásti u použitých strojů a jeho vliv na přesnost hotového dílu. Na závěr hotový díl zkontroluji na CMM měřícím stroji a vyhodnotím požadované funkční rozměry a geometrické tolerance.

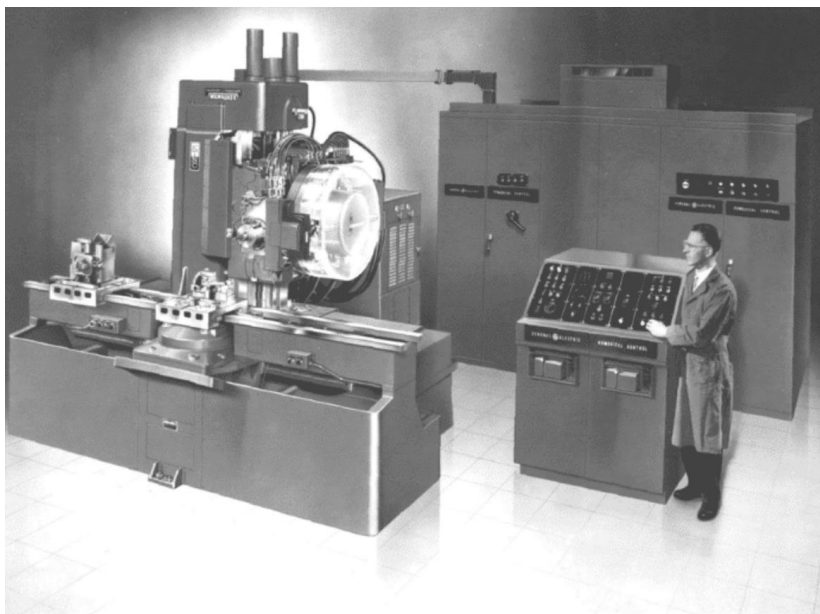
## 2 Historie a vývoj CAM softwaru

Computer Aided Manufacturing (CAM) je software pro strojní programování. Vychází z CAD (Computer Aided Design) dat ve formě 3D modelu nebo výkresu. Na základě těchto dat se postprocesorem vytváří NC kód, který je dále aplikován do CNC (Computer Numeric Control) číslicově řízeného stroje a udává dráhu automatizovanému obráběcímu nástroji pro výrobu široké škály dílů a produktů. Základní a nejrozšířenější formou zápisu NC programu je ISO G kód, který je dán normou ISO 6983:2009 a německou normou DIN 66025, které určují základní standard. Název G kód vychází z nejvíce používaného písmene G v programu, který definuje pohyby stroje, potažmo nástroje, v prostoru kartézských souřadnic. V minulém desetiletí však ze strany výrobců CNC strojů a CAM řídicích systémů začalo docházet k ignoraci těchto ISO norem ve snaze inovací a zjednodušení. Obcházení těchto zavedených pravidel jednotného G kódu tak vedlo k odlišnému významu těchto funkcí. Tyto formy zápisu, kterými se řídí některé další CNC stroje, si vytváří a doplňují sami výrobci, jedním z nejvýrazněji odlišným řídicím systémem je Heidenhein dialog. Vznikají tak i proprietární softwary vytvořené přesně na míru určitým typům výroby. Těmito automatizovanými stroji mohou být například soustruhy, frézky, vypalovačky, laserové děličky, vodní paprsky, ale i stroje pro aditivní výrobu, ad. Účelem CAMu je urychlit, zjednodušit a zpřesnit výrobní proces. [20]

Vývoj CAD/CAM softwaru kopíruje trend vývoje počítačové techniky, čím byly počítače dostupnější a více využívány, tím byly i více integrovány do výrobních strojů. CAM však předběhl CAD o několik let. Na počátku 50. let 20. století byla použita poprvé technologie CAM na NC strojích, ne však taková, jakou známe dnes. Tehdejší stroje nebyly zdaleka tak vyvinuté jako ty dnešní a pro výrobu používaly jednoduché kódované pokyny na děrných štítcích z papíru. Následně se zde zabývám, jak tento technický vývoj šel dopředu a s ním i vývoj CAM softwaru. [1]

## 2.1 Historie CAM softwaru

První vývoj NC strojů je připisován Johnu T. Parsonsovi, který pracoval ve firmě svého otce Parson Corp. Parsons tehdy pracoval na zakázce výroby rotorů do vrtulníků. Ve snaze urychlit výrobní proces ho napadlo využít děrných štítků pro vytvoření technických výpočtů. Parsons pracoval s Franken Sulenem na vývoji děrných štítků, které pak umožňovaly automatizovaný pohyb při obrábění. Tato metoda se však tolik neprosadila. V roce 1949 začalo americké letectvo financovat stavbu Parsonova vlastního numericky řízeného stroje, který by předčil všechny dosavadní snahy o automatizované řízení strojů. Za účelem rozvoje v tom samém roce se rozhodl oslovit odborníky v laboratoři na MIT (Massachusetts Institute of Technology), kteří se zabývali servomechanismy. Dohromady tak vyvinuli první prototyp numericky řízeného stroje. Společně s tím byl vyvinut i systém, který měřil polohu vzdálenosti otočných prvků. Kvůli příliš vysokým nákladům letectvo v roce 1953 zastavilo jeho financování. Vývoj byl ovšem ihned obnoven firmou Giddings and Lewis Machine Tool Co. John Runyon z MIT vyvinul převratný počítačový systém řízení CNC strojů aplikovaný na děrné pásky. Tím zkrátil čas přípravy programu k výrobě následného dílu a zasloužil se o prosazení tohoto řízení CNC strojů na veřejném trhu.



Obrázek 1 - CNC stroj na děrné pásky [1]

Americká armáda viděla v těchto strojích veliký potenciál, proto nakoupila více jak stovku těchto strojů a zapůjčila je výrobcům ve snaze zvýšit popularitu CNC. Díky vysoké produktivitě výroby si ji také výrobci ihned oblíbili. Jakmile se stroje začaly uchycovat u velkých výrobců, bylo zapotřebí sjednotit programovací jazyk, americké letectvo proto přijalo návrh na vytvoření jednotného univerzálního programovacího jazyka pro tyto numericky řízené stroje. Na konci 50. let minulého století MIT určilo cestu vývoji prvním CAM softwarům jazykem, který postupným vývojem přešel v normalizovaný G kód, jaký dnes již tak dobře známe. Tento jazyk již obsahoval souřadnicovou polohu pro přesný automatizovaný pohyb obráběcího nástroje. Pomocí počítače byl tento G kód převeden do děrných štítků a aplikován na stroji, docílilo se tím mnohem většího přenosu informací na stroj. Program tak obsahoval přesnou cestu a rychlost jakou se mají motory stroje pohybovat. Touto popularizací následoval trend nahrazování ručního obrábění technologií CNC. [1]

V roce 1961 Patrick J. Hanratty Ph.D. považovaný za otce a zakladatele CAD/CAM technologie ve firmě General Motors vytvořil Design Automated Computer (DAC). DAC využíval interaktivního grafického rozhraní, které používalo programování numerického řízení PRONTO, jež Hanratty vytvořil dříve v roce 1959. Patrick J. Hanratty si v roce 1970 založil svou vlastní společnost s CAD/CAM systémem nazvanou ICS. Firma vyvíjela svůj vlastní systém ICS INTERAPT, obchod s tímto systémem nebyl příliš úspěšný z důvodu, že počítač, na kterém software fungoval nebyl příliš dostupný široké veřejnosti. To vedlo Hanrattyho k založení další společnosti Manufacturing Consulting Services (MCS). V následujícím roce 1971, kdy Intel přichází se svým výkonným mikroprocesorem, Hanratty představuje světu jeho CAD software s názvem Automated Drafting and Machinery (ADAM). Byl v té době považovaný za jediný dostupný komerční rýsovací a obráběcí systém. Odhaduje se, že 80 % dnešních komerčních softwarů může vysledovat své kořeny až k softwaru ADAM. [2]



Obrázek 2 - Patrick J. Hanratty Ph.D [18]

V 60. letech Ivan Sutherland jako součást jeho Ph.D. práce na MIT vytvořil CAD software s názvem Sketchpad. Byl to inovativní software využívající pera, pomocí kterého se dalo na monitoru počítače interagovat s programem. Byl založen na GUI (Graphic User Interface) pro

generování x-y grafů. Tento software nebyl úspěšný kvůli vysoké ceně a velikým rozměrům počítače, na kterém program fungoval. [3] [4]

Pierre Bezier v letech 1966 až 1968 pracoval pro francouzskou automobilku Renault, kde vyvinul povrchový 3D CAD/CAM systém UNISURF. Tento software měl sloužit k navrhování a obrábění dílů do automobilů, ale i na prototypové modely určené k 3D frézování. [3]

1967 americká firma Ford vyvinula CAD/CAM systém nazývaný PDGS (Product Design Graphics System). Tento software byl používán pouze interně ve firmě Ford a v partnerských firmách a společnostech. Další jejich program FINS (Ford INSpection System) sloužil jako nástroj pro kontrolu součástí souřadnicovou měřící technikou CMM z digitálního modelu. [4]

1977 CADAM (Computer Augmented Design And Manufacturing) od firmy Lockheed byl jeden z prvních průkopových softwarů v leteckém průmyslu a leteckém inženýrství. [4]

V roce 1977 byl francouzskou firmou Dassault Systèmes představen rozšiřující software již existujícího systému CADAM a názvem CATI (Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive). Tato nadstavba umožňovala vývoj a výrobu francouzských bojových stíhaček. Tomuto vývoji 3D povrchového modeláře předcházely více než desetiletý matematický výzkum, umožňovalo to tak vytváření složitých trojrozměrných tvarů a výrobní dokumentace těchto tvarů. 1981 byl software sjednocen a přejmenován na dnes již tak známý a používaný název CATIA. V roce 1984 si letecká společnost Boeing vybrala tento CAD/CAE/CAM program pro vývoj svých letadel, byl to jejich hlavní centralizovaný nástroj, který umožňoval tvorbu velkých sestav. 1989 začal americký výrobce automobilů Chrysler používat CATII pro své automobily značky Jeep a kamiony. Tím software CATIA poprvé vstoupil do automobilového průmyslu, kde se tento program v hojné míře používá dodnes. V roce 1996 již software umožňoval připojení na internet a tím zpřístupnil kontrolu a komentování více lidem spolupracujících na projektu. 1998 byla vydána nová verze CATIA V5 s funkcemi určenými pro stavbu lodí a ponorek. Jedná se zde již o velice mocný nástroj rozšířený nejen ve strojírenství, ale i ve stavebnictví a elektrotechnice. [6] [4]

1978 firma Siemens vstoupila na trh se špičkovým softwarem nazývaným Unigraphic. V dnešní době tento software známe spíše pod názvem NX, který je řazen do nejvyšší třídy CAD/CAM systémů a jedná se o jeden z nejrozšířenějších systémů naší doby. Již v roce vydání byl velice intuitivní, jednoduchý a snadno použitelný k ovládání. Tento software stanovil nový zlatý standard používaný mnoha korporacemi. Dráhy nástroje mohly být kontrolovány vizuálně na obrazovce stolního počítače. Výsledkem byla NC děrná páska s informacemi o pohybu nástrojů. [4]

1982 John Walker zakládá firmu Autodesk a později tohoto roku vydává AutoCAD. Jednalo se o první software určený pro osobní počítače namísto pracovních stanic sálových počítačů. Tyto osobní počítače začaly být tehdy hojně rozšířeny i mezi běžné lidi díky firmě IBM a jejich cenově dostupných počítačů. Díky tomuto rozvoji mnoho firem přistupuje k CAD/CAM systémům, a využívá je ve výrobě. 1985 přichází AutoCAD 3D. V roce 1992 byl software zpřístupněn i na Windows. Do roku 2007 Autodesk prodal osm milionů kopií programu, čímž se stal lídrem v oboru. [4] [2]

Jako další především CAD software přichází v roce 1987 Pro/Engineer, který zahrnoval nápady sketchpadu. Až později byly do tohoto programu zahrnuty i CAM obráběcí strategie. Nyní je tento program známý především pod názvem PTC Creo, jedná se o CAD/CAE/CAM software. Hlavní předností tohoto programu bylo využívání parametrického modelování využívajícího kóty a historii prvků modelu, to znamenalo další významný historický milník v technologii CAD/CAM. [4]

1994 byl zaveden normalizovaný ISO formát převodu 3D modelů mezi softwary počítačů nazývaný STEP, ten tak nahradil dřívější formát IGES. STEP je dodnes velice hojně využíván. [4] [5]

1995 společnost Dassault Systemes vytvořila SolidWorks 95. Byl to jeden z dalších CAD/CAM systémů umožňující snadné použití. V tomto samém roce přišel na trh i Solid Edge od vývojářů Siemens PLM Software jako konkurenční odpověď na SolidWorks 95. Pracoval na systému Windows a poskytoval modelování těles, sestav a umožňoval 2D ortografické pohledy. [4]

S cílem intuitivnosti a jednoduchosti, v roce 1999 přišel Autodesk se softwarem s názvem Inventor. Výhodou tohoto programu bylo rychlé a jednoduché tvoření sestav. Dodnes se tento program často používá a Autodesk za účelem rozvoje a prosazení tohoto produktu na trhu umožňuje zdarma přístup školním institucím jeho používání. Inventor se řadí mezi středně výše pokročilé CAD/CAM softwary. Roku 2010 přichází Autodesk s AutoCAD na telefony, který umožňuje zaměstnancům práci na dálku. 2012 byl vyvinut cloudový software Autodesk 360. 2013 přichází Autodesk Fusion 360, dnes tento program používá více lidí než Inventor díky jeho nižší prodejní ceně. [4]

## 2.2 Vývoj CAM softwaru

Za posledních 20 let CAM zažil obrovský trend vývoje těchto systémů, lze tedy předpokládat, že tomu bude tak i nadále. Tyto softwary se dělí již do mnoha odvětví výroby, kde našly svá uplatnění. V dnešní době jsou CNC stroje relativně cenově dostupné pro výrobce v mnoha různých odvětvích. Výrobci těchto strojů umožňují sestavení vlastního stroje dle potřeb a preferencí zákazníka ze stavebnicových částí. Při fokusované výrobě pouze na jeden druh výrobku návrháři a velké společnosti umožňují prodej svých CAM softwarů po částech. Tento CAM má omezené množství funkcí, které však výrobci postačuje za výrazně nižší cenu, další nadstavbové funkce lze v případě zájmu a potřeby i dokupovat. [1]

Jak už tomu bylo v minulosti, CAM softwary se budou muset přizpůsobovat době. Programátoři a návrháři budou nuceni adaptovat se a přijímat nové trendy, aby zvýšili prodeje svých softwarů a dostáli tak konkurenceschopnosti. Vývoj by měl směřovat k urychlení, zjednodušení se, zachováním a rozšířením funkcí, zpřesnění, menší energetické náročnosti strojů a mnoho dalšího do budoucna potřebného. Bude tedy pravděpodobné rozšíření CAD/CAM technologií i do jiných pracovních odvětví za účelem minimalizování finanční a časové náročnosti. Jak se technologie neustále rozvíjeny, přichází tak i nové možnosti, jako například virtuální realita. Tato technologie má velký potenciál a někteří výrobci již přesouvají část svého vývoje i sem. Čas však ukáže, zda je to ta správná cesta, jistě bude třeba více popularizovat tuto technologii a přidat nové možnosti. Dle mého názoru má větší potenciál technologie AR rozšířené reality. CAD/CAM softwary se stávají mnohem intuitivnější, je tak jisté, že návrhy tak



budou mnohem pokročilejší. Návrhy, které se zdály dříve těžce a složitě realizovatelné, tak budou velice snadno zvládnutelné. [1]

Současný trend vývoje dnes směřuje například k podpoře víceosého obrábění. Indexové 3+2 osé obrábění umožňuje změny souřadného systému v průběhu obrábění uspořádáním rotačních os stroje. Další možností implementace od systémů je čtyř osé obrábění takzvaně rotační, jež umožňuje kontinuálně měnit polohu natočení kolem jedné osy. Přidáním další osy rotace vzniká pěti osé obrábění, které je schopné polohování ve všech osách zároveň. Podpora víceosého obrábění není standartně zahrnuta u všech CAM softwarů. Mezi výhody víceosého obrábění, nejen za účelem tvorby složitých tvarů, patří i aktivní řízení polohy nástroje za účelem konstantní řezné rychlosti a záběru nástroje, jež eliminuje nevhodné stavy a úhly náklonu. Při standartním tří osém frézování se bod doteku nástroje mění. [7]

Vývoj zlepšení obráběcích strategií je další z možností inovace CAM softwaru. Parametry a strategie ovlivňují výsledný povrch po obrábění, stejně tak i mění směry zatížení nástroje, což může mít vliv například na chvění. [7]

Využití principů technologického CAMu umožňuje automatické rozpoznání obráběných prvků a přiřadí jim obráběcí strategie. Současné CAM softwary však nyní dokáží rozpoznat jen standartní prvky, jako například drážky, kapsy, díry či závity. Je zde však hodně prostoru pro zlepšení, stále tu je potřeba člověka, který výsledky vygenerovaného programu zkontroluje a uvede k chodu. Program není zcela automatický, je tu mnoho neznámých a proměnlivých dat, které musí být specifikovány. Zatím tu vše nefunguje stejně tak jako u nyní vysoce vyzdvihovaného 3D tisku, kde je pouze zadán model a program po nastavení několika hodnot automaticky vygeneruje dráhy tisku. [7]

Další cestou, jednou z nejdůležitějších, kudy se vývoj ubírá, je podpora vysokorychlostního obrábění HSM. Při obrábění HSM je potřeba klást důraz na tečnost drah obráběcího nástroje. Je tomu třeba z důvodu, aby nedocházelo ke skokovým změnám v zatížení, rychlé změny pohybu při tomto obrábění jsou nežádoucí. Napomáhá se tomu zaoblováním drah, speciálními strategiemi bez lineárních pohybů, například strategií trochoidální frézování. CAM by měl zvládat počítat konstantní či kontinuálně měnící se úhel opásání nástroje, tímto se dají

eliminovat již zmíněné skokové změny zatížení nástroje. Výrobci se neustále předhánají a prezentují rozvoj svých vlastních inovativních možností a strategií vysokorychlostního obrábění. [7]

Za účelem zvýšení produktivity výroby se zvyšují i výkony obrábění. Je snaha docílit co nejoptimálnějšího a nejekonomičtějšího využití nástroje s daným potenciálem stroje. Dociluje se toho většími posuvy a malým opásáním, větší hloubkou řezu, vyššími rychlostmi a lepším využitím ostří nástroje. Jedná se zde také především o jednu z nejdůležitějších úloh vývoje CAMu. [7]

Cesta vývoje směřuje i ke tvorbě specializovaných CAM softwarů za účelem výroby nestandardních dílů či kvůli specifickým požadavkům a vlastnostem. Zaměřuje se především na úzký sortiment výroby, jako například: vysokorychlostní oběžná kola turbíny, lopatky parní, plynové či letecké. Jedním příkladem typicky nestandardní strojní výroby je specializovaný CAM software zaměřující se na frézování zubních náhrad v ortodoncii s názvem DentMILL. [7]

Minimalizace neaktivní doby obrábění. Softwary by se měly snažit vytvářet dráhy nástroje tak, aby zkracovaly časy polohy nástroje, kdy neobrábí. Odjezdy a příjezdy by měly být co nejlépe optimalizovány, případně i eliminovány. Při nezbytných drahách mimo řez by měl být automaticky použit rychloposuv za účelem úspory času. [7]

Některé CAM softwary umožňují pomocí práce s CL daty zobrazení polohy nástroje kolem obrobku a toto zobrazení může obsahovat i odebrání materiálu z přednastaveného polotovaru. Napodobení celého procesu obrábění může být řešeno spojením pohybu nástroje s celým předdefinovaným strojem. Touto simulací je možné předcházet kolizím nástroje či stroje s obrobkem a jiným nežádoucím pohybům. Program vytváří tyto simulace na základě CL dat, ovšem lepší možnost je práce se samotným NC kódem. Ověření je další krok, který může následovat. Zde zjišťujeme, zda to, co programujeme, odpovídá tomu, co opravdu chceme vyrobit. Na vzniklém virtuálním modelu je možné pozorovat s určitou přesností i výsledný vzhled nepřesností zanechaný tvarem obráběcího nástroje. Poslední kontrolou, jak často bývá před samotným zahájením obrábění, předchází ověření drah obrábění na stroji, který ukáže, zda je správné to, co jsme naprogramovali v CAMu. [7]

Podporu rozšířených možností výroby často výrobci přidávají do svých softwarů za účelem navýšení svého potenciálu a hodnoty. Jednou z funkcí je podpora aditivní výroby, jako například 3D navařování ve třech či více osách. Častá je i podpora 3D tisku a v budoucnu můžeme určitě očekávat i mnoho dalších jistě užitečných funkcí. [7]

### 3 Rozbor výrobní dokumentace

Na základě komunikace se studentským týmem CarTech CTU byla dohodnuta spolupráce na výrobě středu kola použitého na formuli s pořadovým číslem FS14. Byl mi následně poskytnut 3D model součásti a výrobní výkres s předepsanými požadavky, tolerancemi na přesnost funkčních rozměrů a geometrickými tolerancemi (Obr.3). Tato technická dokumentace mě provázela od začátku až ke konci výroby, kde byla potřeba změřit a vyhodnotit požadované rozměry.

Od začátku již bylo nutné uvažovat s možnostmi a dostupnými stroji pro výrobu. Fakulta však disponuje velkým portfoliem výrobních strojů, především číslicově řízenými, umožňuje mi tak mnoho možností. Z tvaru dílu mi byla ihned patrná nutnost soustružení a tří osého frézování. Sledem operací se budu následně zabývat v kapitole výrobního postupu. Z technologického hlediska tak je i s možnostmi v dílnách na fakultě strojní tento díl vyrobitelný.

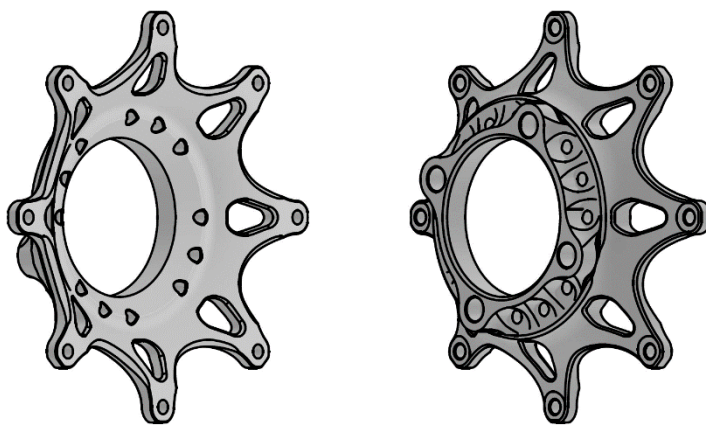
Po konzultaci nad prvky nutnými k výrobě jsem vytvořil objednávku potřebných obráběcích nástrojů určených pro obrábění slitin hliníku kategorie značených v katalogu písmenem N. Tato objednávka byla vytvořena u prodejce nástrojů Dormer Pramet. Později tyto nástroje blíže specifikuji. Též byl zakoupen polotovar z materiálu slitiny hliníku předepsané výkresem EN-AW 7075.

S počtem zadaných osmi kusů k výrobě, jedná se tak o dvě sady kol, přistupuji jako k menší sérii kusové výroby, s možností realizovatelnosti i do budoucna v případě nutnosti. Díly jsou konstruovány s použitím pouze na jednu sezónu.



### 3.1 Popis součásti

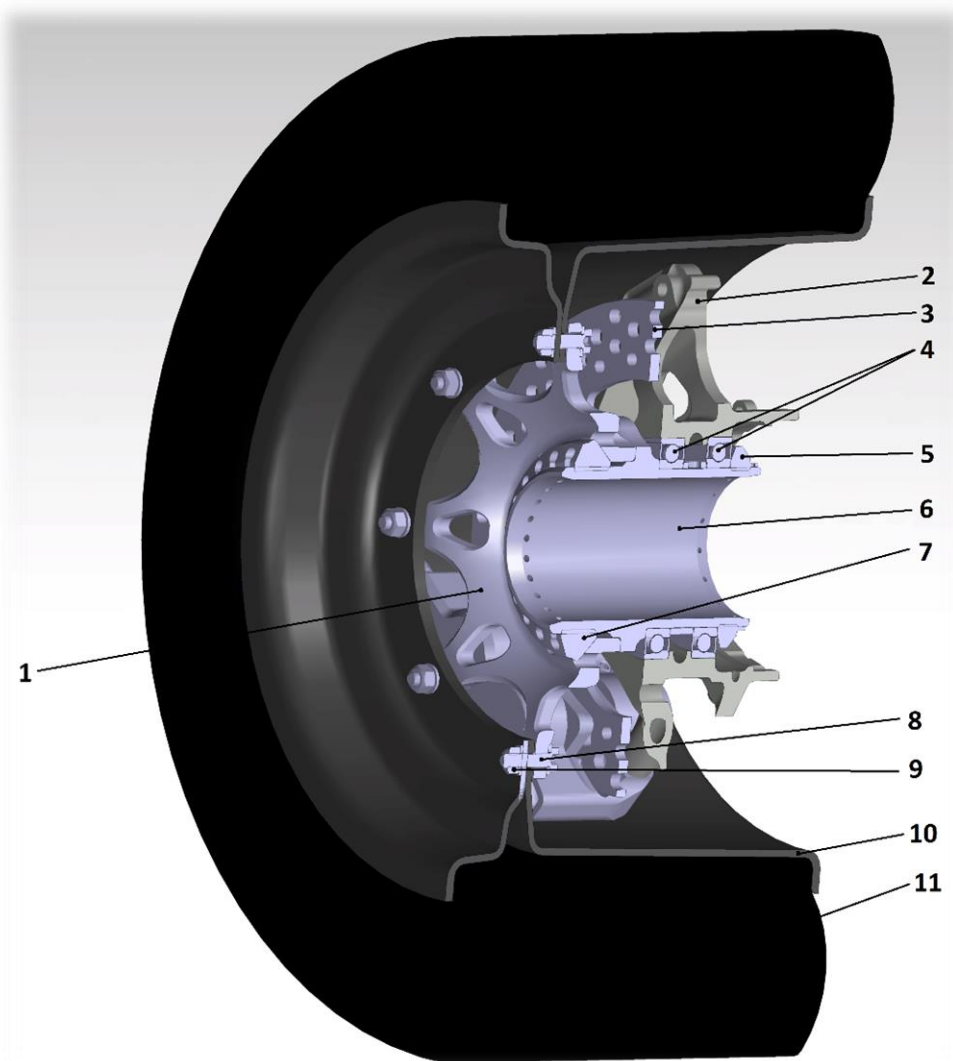
Funkcí tohoto dílu je spojení límce kola s nábojem. Dociluje se tak k přenosu sil, jednou z hlavních je kroutící momentu přenášený z hřídele na pneumatiku kola. Po obvodu dílu je osm děr o průměru 6,4 mm tolerančního pole H12, skrz které prochází osm šroubů M6, kterými je uchycen ráfek pneumatiky. Díl se dále nasouvá dírou o průměru 72 mm na náboj, tím je tak vystředěn a plní tak funkci hřídele. S přenosem kroutícího momentu napomáhají čtyřmi kolíky, které zapadají do děr o průměru 10,7 mm s tolerancí děr  $\pm 0,05$  a zabraňují prokluzu (ve výkrese značeno jako  $\varnothing 10,8$  mm, jedná se o průběžnou konstrukční změnu). S těmito rozměry je i svázána geometrická tolerance polohy a válcovitosti. Geometrickou tolerancí tvaru plochy vázané základnou díry průměru 72 mm je vytvořen funkční kužel (kužel není však zcela správně zakótovaný na výkrese) na který dosedá matice zašroubovaná v náboji a přitahuje tak střed, který následně dosedá svou plochou k náboji a pevně tak drží pospolu. Na tuto plochu se též vztahuje geometrická tolerance kolmosti a házení. Na díle se dále nachází mnoho důležitých prvků pro odlehčení, jež je pro snížení hmotnosti formule nezbytné. Konkrétně se jedná o osm půlkruhových otevřených kapes po obvodu, osm uzavřených vnitřních kapes hruškového tvaru, dvanácti vyvrtaných děr průměru 6 mm a vybraných tvarových kapes nad a okolo nich. Tyto odlehčující prvky však lehce prodlužovaly a komplikovaly výrobní proces. Například zdánlivá zkosení hran dílu nebyla plně navržena pod úhlem  $45^\circ$  a postupně přecházely až do  $90^\circ$ , což vytvářelo mnoho tvarových ploch nutných k složitější tvorbě programu a zdlouhavému frézování kulovou frézou. Nejednalo se však o nezvládnutelný problém a vše jsem následně vyrobil dle zadání.



Obrázek 4 - 3D model středu kola

### 3.2 Sestava kolové soustavy

Zde na Obr.5 je znázorněné spojení středu kola označeného číslem 1 s ostatními díly kolové soustavy formule. Na ráfek pneumatiky je upevněn osmi šrouby s maticemi, a přes dosedací funkční kužel dotažen přední maticí (7) k náboji (6). Závit na náboji je konstruovaný tak, aby při jízdě nedocházelo k samo uvolnění kola.

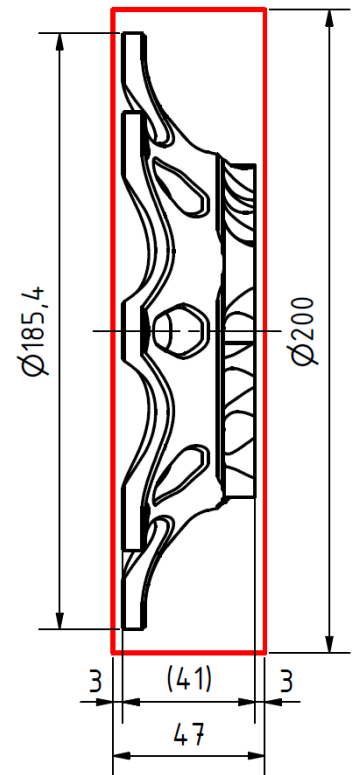


Obrázek 5 - Kolová soustava [19]

1 – střed, 2 – těhlice, 3 – brzdový kotouč, 4 – ložiska, 5 – zadní matice kola, 6 – náboj,  
7 – přední matice kola, 8 – šroub, 9 – matice, 10 – ráfek kola (límeč), 11 – pneumatika

## 4 Volba a návrh polotovaru

Největší průměr dílu je 185,4 mm a tloušťka 41 mm. Po konzultaci jsem navrhl přídavek 3 mm z každé strany, který zahrnuje rezervu na prořez pásem pásové pily a nepřesnost řezu. Výsledná tloušťka jednoho kusu tak je 47 mm. Průměr s přihlédnutím k dostupnosti pro objednání na trhu volím 200 mm. Výsledné schéma polotovaru pro jeden kus je patrné na Obr.6. K osmi požadovaným kusům přidávám 2 ks. pro optimalizaci řezných podmínek a jako rezervu v případě zmetků. Celková požadovaná délka kruhové tyče tak vychází i s technologickým přídavkem na upnutí 500 mm. Výsledná objednávka u firmy Primapol: Tyč kruhová EN AW-7075  $\text{\O}200$  mm x 500 mm.



Obrázek 6 - Schéma polotovaru

Materiál polotovaru byl zvolen týmem CarTech CTU jako EN AW-7075, jedná se o slitinu konkrétního chemického složení  $\text{AlZn5,5MgCu}$ . Tato slitina obsahuje: 0,4% Si, 0,5% Fe, 1,2 až 2% Cu, 0,3% Mn, 2,1 až 2,9% Mg, 0,18 až 0,28% Cr, 5,1 až 6,1% Zn, 0,2% Ti. Materiálové Vlastnosti: Pevnost v tahu  $R_m = 440$  až 560 MPa, tvrdost 160 HBW, hustota slitiny  $2800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Jde o již používaný a ověřený materiál dílů na dřívějších modelech formule. [8] [9]

Pokud by se jednalo o větší sérii výroby, bylo by určitě vhodnější optimalizovat rozměry polotovaru za účely menší ztráty materiálu na nejmenší možně, případně přistoupit k variantě výkovku. S celkovým počtem 10 vyráběných kusů je z mého pohledu navržený polotovár optimálně dostatečný.

## 5 Výrobní postup

Výrobní postup středu kola jsem rozdělil do pěti operací následně blíže specifikovaných za účelem dodržení předepsaných tolerancí.

Před započítím výroby mi byl vznesen požadavek ze strany CarTech teamu na změnu velikosti čtyř středících děr průměru  $10,8 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$  na průměr  $10,7 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ , což po kontrole vyrobitelnosti nepředstavovalo žádný technologický problém, jediným limitujícím faktorem byla již zakoupená velikost frézy určená pro použití na slitiny hliníku. Ve výsledku se tak jednalo pouze o lehkou změnu v programu.

Upnutí dílu na CNC strojích věnuji čistě samostatnou podkapitolu v této práci, kde jsem přistoupili k tvorbě vlastního upnutí kvůli těžce dostupným funkčním plochám. Zde pouze schematicky znázorněné.

Nejprve byl celý výrobní postup obroben do polotovaru z nylonu. Byly vyrobeny dva zkušební kusy. Nylon je mnohem měkčí materiál než výsledná slitina hliníku EN AW-7075, jež dokáže odpustit drobné nesrovnalosti v programu. Výsledné rozměry však nebyly brány příliš v potaz, jelikož nylon je pružný a po upnutí se lehce deformoval. U nylonu bylo zapotřebí použít procesní kapaliny, jelikož se z počátku bez použití účinku chlazení díl taval díky vysoké teplotě řezu. A při použití řezných rychlostí pro slitinu hliníku u soustružení vyšších než  $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , bylo vyzorováno, že nylon utvářel krátkou dělenou třísku.



Obrázek 7 - Hotový díl z nylonu



Po úspěšné výrobě dvou dílů z nylonu a malým úpravám a korekcím strategií v programu jsem přistoupil ke slitině hliníku. Na prvním zkušebním dílu ze slitiny hliníku byla provedena optimalizace řezných podmínek použitelných na dalších dílech. Dále zde byly přidány korekce rozměrů tolerovaných funkčních ploch řádově v setinách milimetru.

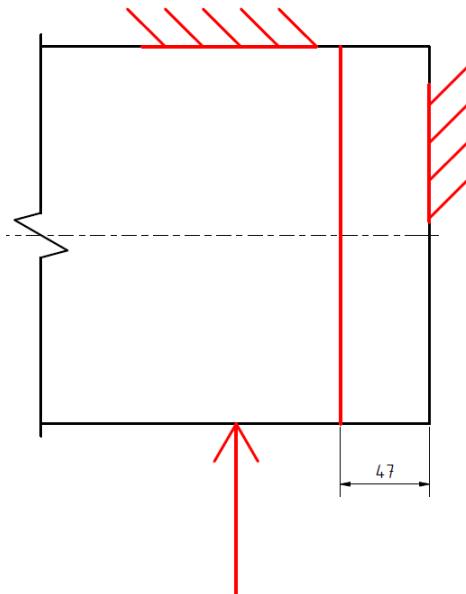
V celém výrobním procesu bylo použito procesní kapaliny (emulze) za účely chlazení, mazání, odvodu třísky a snížení vibrací.

Rád bych zde připomenul, že technologický výrobní postup je stejně platný jako technický výkres. A v případě potřeby výroby dalších kusů doporučuji důkladné dodržení úseků a operací výrobního postupu.

## 5.1 1. operace Řezání

Na zvolené pásové pile Bomar practix 285.230 G jsem nadělil 2 ks. polotovaru z nylonu a 10 ks. ze slitiny hliníku o délce 47 mm. Pro tuto operaci byl použit nový pilový pás s většími zuby pro urychlení procesu dělení.

Průměrný strojní čas řezání jednoho dílu  $t_{as1} = 11 \text{ min } 51 \text{ s}$ .



Obrázek 9 - Schéma upnutí na pásové pile

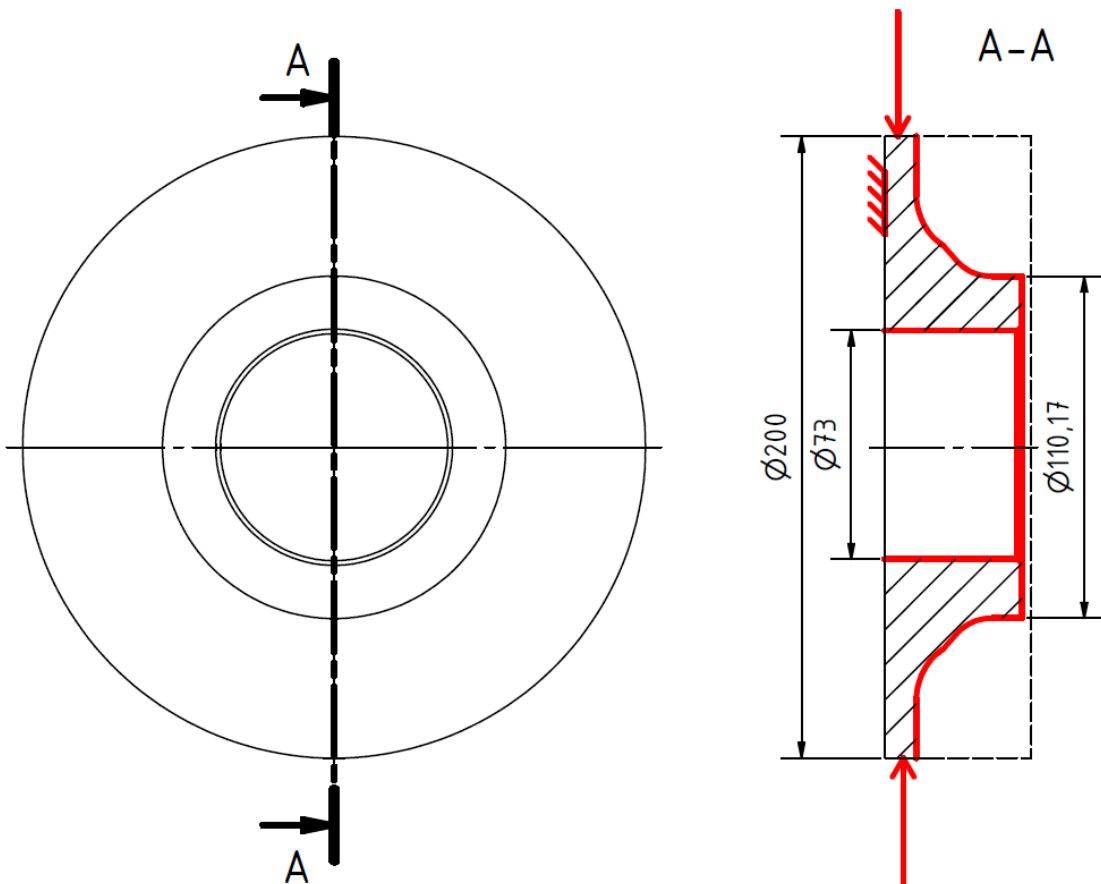


Obrázek 8 - Upnutí na pásové pile

## 5.2 2. operace soustružení a vrtání

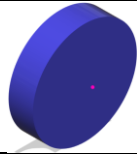
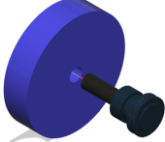


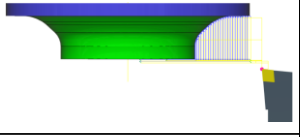
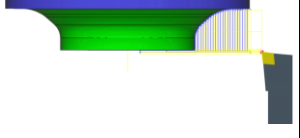
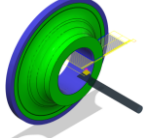
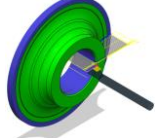
Díl je upnut za vnější průměr 200 mm v CNC soustruhu Okuma Genos L200E-MY. Na vnitřním otvoru vyznačeným na Obr.10 jako  $\varnothing 73$  mm je zanechán přídavek 0,5 mm, který bude odebrán až v následující operaci za účelem výroby více funkčních ploch dohromady a tím bude možné eliminovat nepřesnost přeupnutí.

Celkový strojní čas soustružení dílu  $t_{as2} = 21 \text{ min } 17 \text{ s}$ .



Obrázek 10 - Schéma upnutí 2. operace

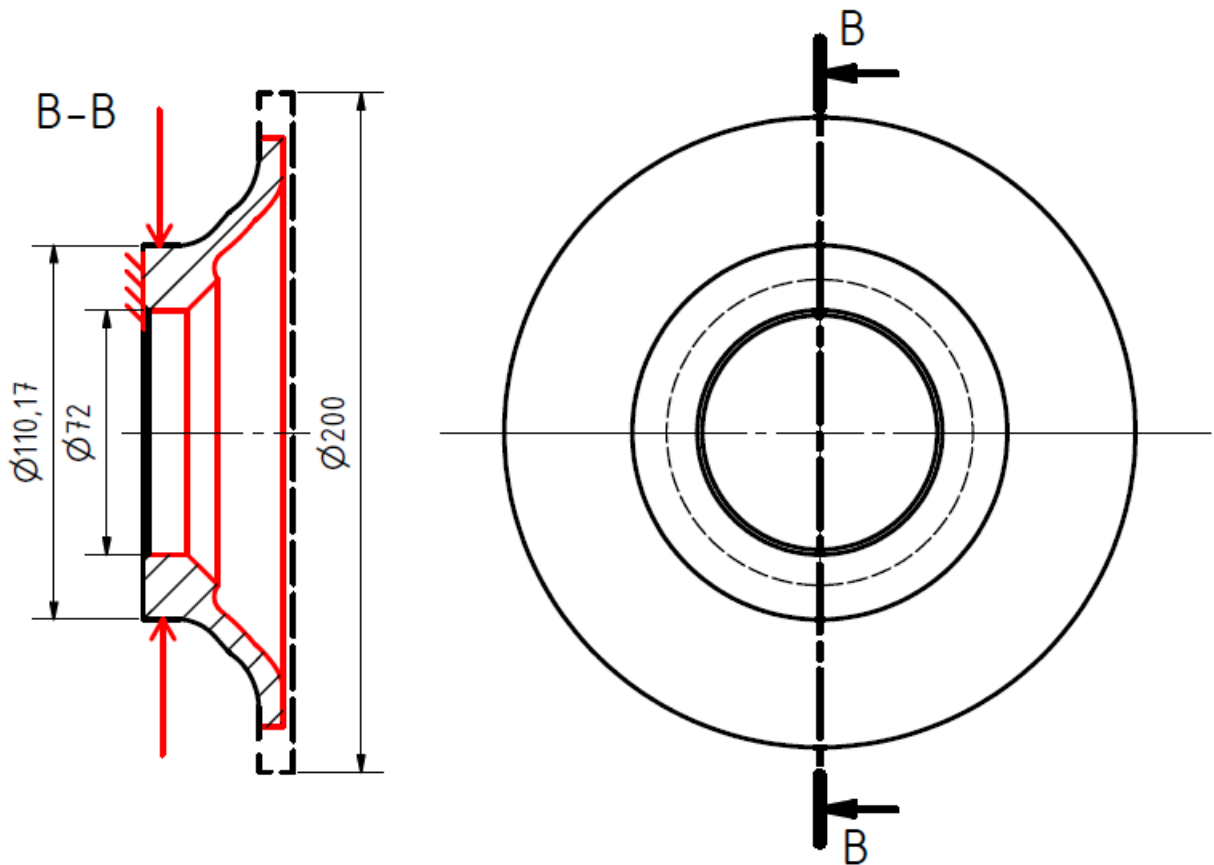
Tabulka 1 - Druhá operace [9] [10]

2. Operace - Okuma Genos L200E-MY						Autodesk Fusion 360
úsek	Popis	$v_c$ [m*min <sup>-1</sup> ]	f [mm/ot]	$a_p$ [mm]	Pozice (číslo) nástroje	Simulace
A	Upnutí na doraz do čelistí za $\varnothing$ 200 mm					
B	Vrtání průchozí díry	160	0,09		4	
C	Soustružení čela	135	0,2	1,5	8	
D	Hrubování vnější kontury	180	0,3	2	8	
E	Dokončení vnější kontury s čelem (soustružení na čisto)	180	0,08		8	
F	Technologické zkosení	180	0,08		8	
G	Hrubování vnitřní kontury	120	0,15		10	
H	Zkosení 1,5 x 45° na čisto	180	0,08		10	

### 5.3 3. operace soustružení

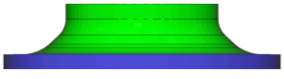
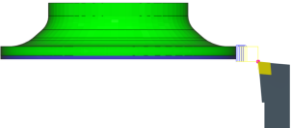
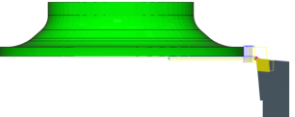
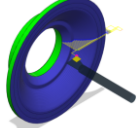
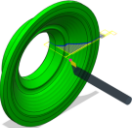
V této operaci je díl upnut do měkkých čelistí za vnější průměr 110,17 mm.

Celkový strojní čas soustružení dílu  $t_{as3} = 19 \text{ min } 33 \text{ s}$ .



Obrázek 11 - Schéma upnutí 3. operace

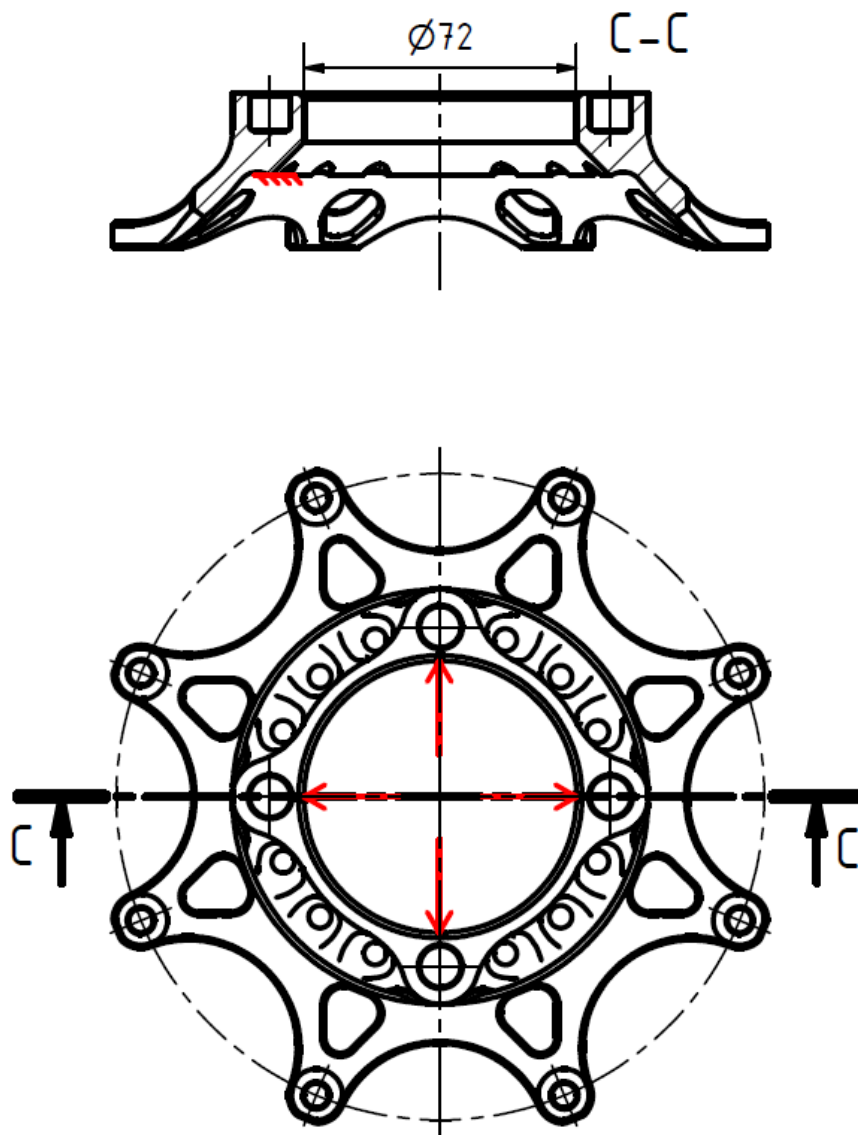
Tabulka 2 - Třetí operace [9] [10]

3. Operace - Okuma Genos L200E-MY						Autodesk Fusion 360
úsek	Popis	$v_c$ [m*min <sup>-1</sup> ]	f [mm/ot]	$a_p$ [mm]	Pozice (číslo) nástroje	Simulace
A	Upnout do měkčích čemistí za vnější $\varnothing$ 110,17 mm					
B	Soustružení vnějšího $\varnothing$ 185,4 mm	180	0,3	1,5	8	
C	Soustružení čela s přídkem 0,2 mm	135	0,2	1,5	8	
D	Soustružení nahrubo vnitřní kontury s přídkem 0,5mm	120	0,15	1,5	10	
E	Soustružení vnitřního profilu s čelem na čisto	180	0,08		6	

#### 5.4 4. operace frézování a vrtání

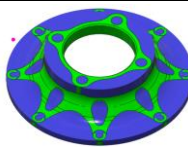
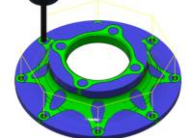
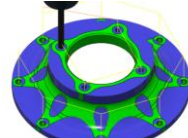
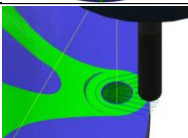
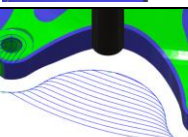
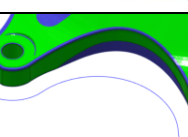
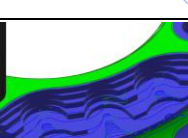

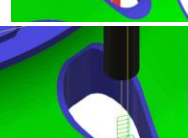
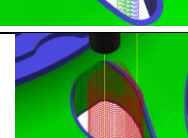
Pro upnutí tohoto dílu na frézce bylo použito svisle upevněné sklíčidlo se speciálně obroběnými měkkými čelistmi. Díl je upnut za průměr 72 mm s dosednutím na doraz znázorněném na schématu upnutí na Obr.12. Problematikou tohoto upnutí se zabývám v další podkapitole.

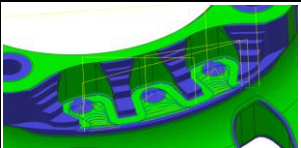
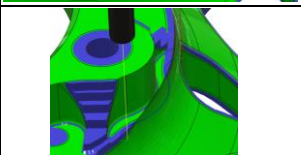
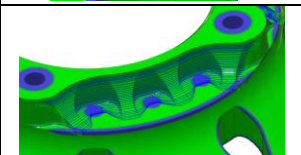
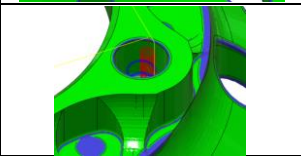

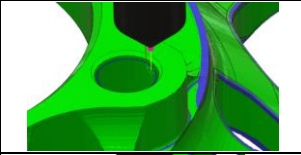
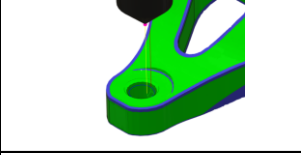
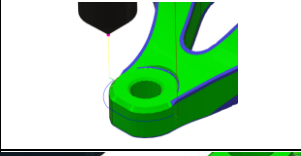
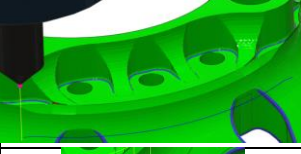
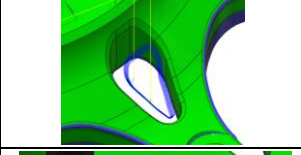
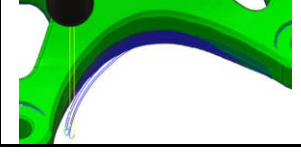
Celkový strojní čas obrábění dílu  $t_{as4} = 1 \text{ hod } 13 \text{ min } 40 \text{ s}$ .



Obrázek 12 - Schéma upnutí 4. operace

Tabulka 3 - Čtvrtá operace [9] [10]

4. Operace - HAAS VF2						Autodesk Fusion 360
úsek	Popis	$v_c$ [m*min <sup>-1</sup> ]	$f_z$ [mm/z]	$a_p$ [mm]	Pozice (číslo) nástroje	Simulace
A	Upnutí na doraz do měkkých čelistí Ø 72 mm	/	/	/	/	
B	Vrtání děr 8xØ6,4	120	0,095 [mm/ot]		10*	
C	Předvrtání děr 4xØ 10,7	120	0,095 [mm/ot]		10*	
D	Frézování osmi kapes po obvodu nad dírami Ø6,4 mm	126	0,03	max 1	12	
E	Frézování osmi obvodových kapes s přídavkem 0,5 mm	251	0,08	max 7	14	
F	Frézování obvodových kapes na čisto	251	0,06	max 7	14	
G	Adaptivní hrubování čtyř horních odlehčujících kapes	251	0,08	2	14	
H	Zafrézování do osmi vnitřních odlehčujících kapes s přídavkem 0,3 mm (rampování)	305	0,083	0,5	14	
CH	Začištění vnějšího rohu osmi odlehčujících kapes s přídavkem 0,3 mm	150	0,04	2,5	13	
I	Frézování osmi vnitřních odlehčujících kapes na čisto (rampováním)	150	0,035	0,5	13	

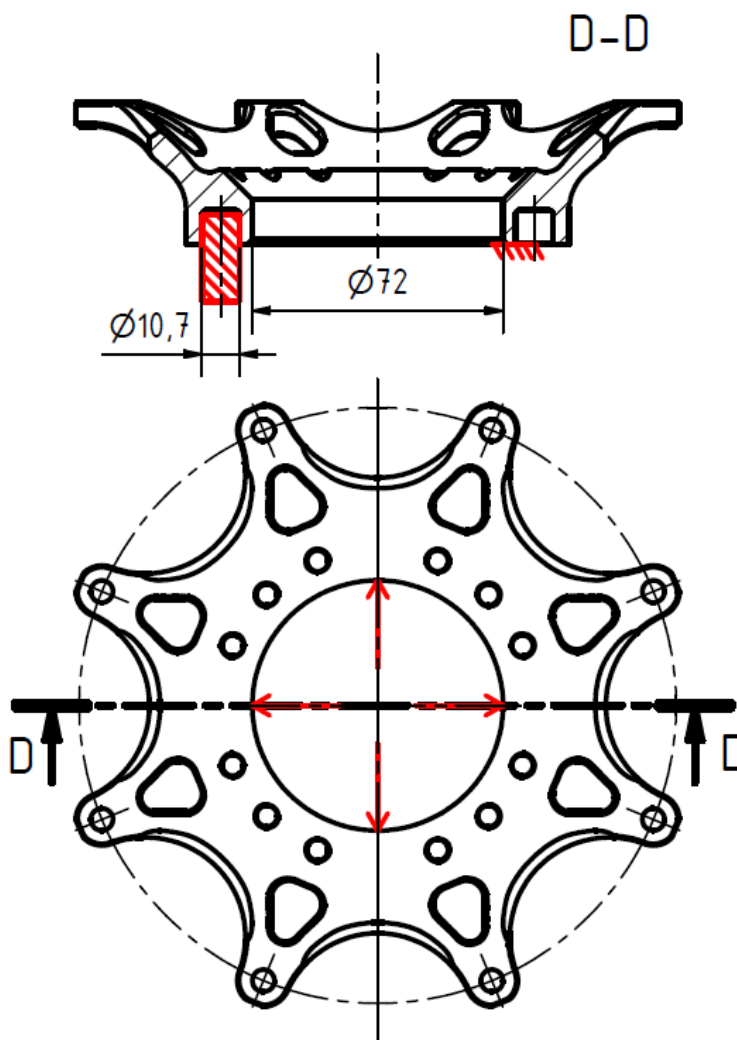
J	Zbytkové frézování dolní plochy horních kapes na čisto	126	0,033		12	
K	Frézování obvodové kontury ve hloubce 10 mm	126	0,03	10	12	
L	Zbytkové zřezování tvarové plochy po úseku G	251	0,04	0,5	15	
M	Frézování čtyř děr Ø10,7 mm na čisto	120	0,04	0,2 a 4	12	
N	Vrtání dvanácti odlehčujících děr Ø6 mm	123	0,09 [mm/ot]		11	
O	Zkosení čtyř děr Ø10,7 mm	302	0,05		16	
P	Zkosení děr Ø6,4 mm	302	0,05		16	
Q	Zkosení částí vnějšího obvodu	302	0,05		16	
R	Zkosení hrany průměru 110,17 mm	302	0,05		16	
S	Zkosení tvarových hran osmi vnitřních odlehčujících kapes (funkce Blend)	251	0,045	0,04	15	
T	Zkosení tvarových hran osmi vnějších odlehčujících otevřených kapes (funkce Blend)	251	0,05		15	



## 5.5 5. operace frézování

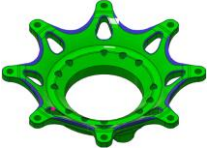
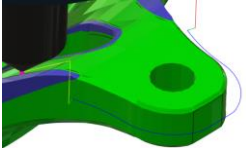
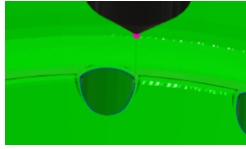
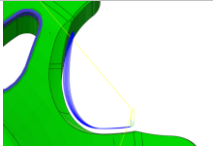
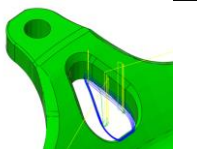
Tato operace již nezahrnuje výrobu funkčních tolerovaných ploch. Většina těchto ploch byla vyrobena především v třetí a čtvrté operaci, kde byl kladený důraz na přesnost upnutí. V této operaci jsou obráběny pouze hrany a zkosení, jež nepodléhají přísné toleranci. Díl je pouze opačně usazen do stejného sklíčidla jako v předchozí operaci a zajištěn kolíkem v díře průměru 10,7 mm proti pootočení, a hlavně ke správnému natočení dílu.

Celkový strojní čas obrábění dílu  $t_{as5} = 20 \text{ min } 4 \text{ s}$ .



Obrázek 13 - Schéma upnutí 5. operace

Tabulka 4 - Pátá operace [9] [10]

5. Operace - HAAS VF2						Autodesk Fusion 360
úsek	Popis	$v_c$ [m*min <sup>-1</sup> ]	$f_z$ [mm/z]	$a_p$ [mm]	Pozice (číslo) nástroje	Simulace
A	Upnutí na doraz do měkčích čelistí za $\varnothing 72$ mm se zajištěním středícím kolíkem v díře $\varnothing 10,7$ mm					
B	Zkosení částí vnějšího obvodu	302	0,04		16	
C	Zkosení děr $\varnothing 6$ mm	302	0,04		16	
D	Zkosení tvarových hran osmi vnějších odlehčujících otevřených kapes (funkce Blend)	251	0,04		15	
E	Zkosení tvarových hran osmi vnitřních odlehčujících kapes (funkce Blend)	251	0,04		15	



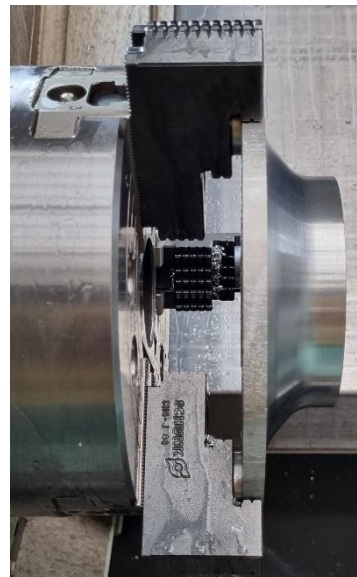
Obrázek 14 - Výsledky jednotlivých operací

## 5.6 Návrh upnutí

Upnutí tohoto dílu středu kola na CNC strojích tvořilo podstatné komplikace výroby, především u frézovacích operací, kdy díl disponoval pouze těžce dostupnými funkčními plochami. Každá operace tak vyžadovala individuální řešení.

### 5.6.1 Upnutí 2. operace

U této operace jsem použil sklíčidlo se třemi standartními kalenými čelistmi. Doraz u těchto čelistí byl příliš hluboko, a proto bylo nutné tento problém vyřešit. Jednou z možností se naskýtalo použití měkkých čelistí, ovšem z ekonomického hlediska bylo od této možnosti upuštěno. Přistoupil jsem tak ke tvorbě podložek, které zapadaly do děr pro šrouby uchycující čelisti ke sklíčidlu. Čelisti tak disponovaly dostatečnou upínací plochou. Upnutí s podložkami je znázorněné na Obr. 15.



Obrázek 15 - Upnutí druhé operace

### 5.6.2 Upnutí 3. operace

Tato operace však již vyžadovala použití měkkých čelistí. Zde bylo nutné přesně a pevně svázat vyrobenou tolerovanou dosedací plochu s vnitřním otvorem  $\varnothing 72$  mm H7 a dalšími plochami svázanými geometrickými tolerancemi kolmosti. Před zahájením obrábění měkkých čelistí bylo nutné eliminovat vůli a naklopení čelistí v zatíženém stavu pro zvýšení přesnosti upnutí. Obrábění tak bylo realizováno s upnutým přesným válcem uvnitř čelistí. Program pro obrobení dosedacího průměru 110,17 mm jsem naprogramoval dílenským způsobem přímo na stroji. Upnutí je znázorněné na Obr. 16.

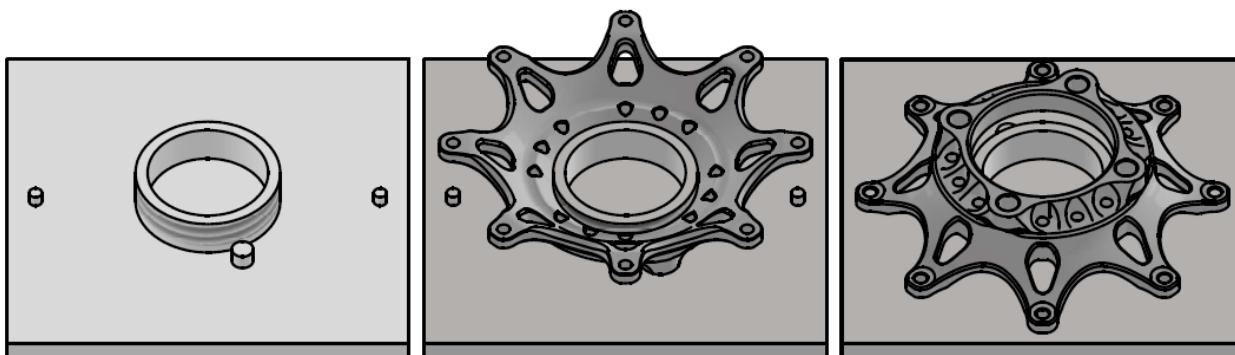


Obrázek 16 - Upnutí třetí operace

### 5.6.3 Upnutí 4. operace

Nyní bylo nutné díl upevnit na stůl tří osé CNC frézky HAAS VF2. V této operaci se nachází nejvíce obráběcích úseků, které bylo zapotřebí obrobit najednou pro co nejmenší počet přeupnutí. Kvůli velkému množství obrábění díl nedisponoval mnoha funkčními plochami, za které by ho bylo možné upnout. Nebylo zde zapotřebí polohování axiální rotace středu kola.

První uvažovaná varianta upnutí byla vytvoření si vlastního přípravku. Tento přípravek by zahrnoval upnutí i páté operace. Vytvořil jsem tak návrh patrný na Obr.17. Tento návrh uvažuje jako upínací plochu kužele, kterou je díl utažen a vystředěn na náboji kolové soustavy formule. Tento princip by byl použit i na vytvořeném přípravku s před hotoveným závitem a utažený již vyrobenou maticí. Proti zamezení rotace dílu v přípravku by se na dílu nacházely kolíky, do kterých by zapadla díra průměru 10,7 mm. Tento návrh však neodpovídá již vytvořenému výrobnímu postupu, a pro realizaci by bylo nutné vytvořit jiný sled obráběcích úseků a strategií. Pro druhou stranu upnutí by díl zapadal vyvrtanými dírami  $\varnothing 6,4$  mm do kolíků na desce přípravku a následně byl přitažen za vrchní plochu proti zamezení axiálního pohybu.

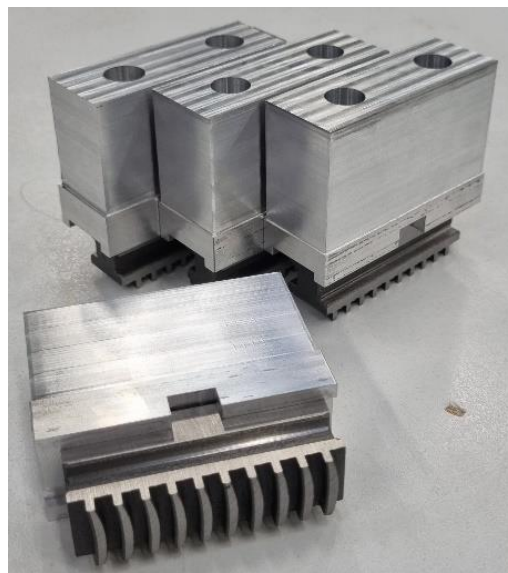


Obrázek 17 - Vlastní návrh přípravku

Navržený vlastní přípravek by byl vhodný, jednoduchý a možná i přesnější na upnutí především u velkosériové výroby, kde by bylo možné docílit opakovatelnosti přesného upnutí. Tento návrh byl by však mnohem pracnější a složitější na výrobu, proto jsem radši přistoupil s množstvím dvanácti kusů k dalšímu vlastnímu návrhu upnutí. Výsledný návrh vlastního přípravku tak nebyl zcela dokončen.

Následně realizovatelný návrh upnutí je založen na použití sklíčidla s čelistmi upnutého na pracovní desce obráběcího stroje. Ze začátku bylo jasné, že nebude možné použít standartní čelisti, jako například v druhé operaci, neměly by dostatečnou dosedací plochu a velikostí by přesahovaly a bránily obrábění. První možností byly měkké monolitní čelisti, do kterých bych vyfrézoval vlastní navržený tvar, do nichž by se dalo díl upnout z obou stran. Tyto měkké monolitní čelisti ve výsledku byly příliš nízké. Nedostačovaly svou výškou pro dostatečnou rozpínací plochu pro průměr 72 mm a zanechání spodního okraje volně usazeného. Toto volné posazení spodního okraje je nezbytné pro vyfrézování obvodových osmi půlkruhových odlehčujících kapes. Další možností bylo použití dělených měkkých čelistí. Výrobce tyto dělené čelisti vyrábí ve dvou velikostech, jež ta druhá větší varianta by byla pro mé použití dostačující. Zde bych byl limitován pouze výškou hlavy šroubu držící dělené měkké čelisti pohromadě. Tyto normalizované dělené měkké čelisti však nikde na trhu nebyly k sehnání, což představovalo další komplikaci. Jako řešení této komplikace jsem přistoupil k výrobě vlastních horních částí dělených měkkých čelistí. Zde jsem tak nebyl limitován výškou. Spodní části, do kterých se čelisti upevňují dvěma šrouby byly zakoupeny.

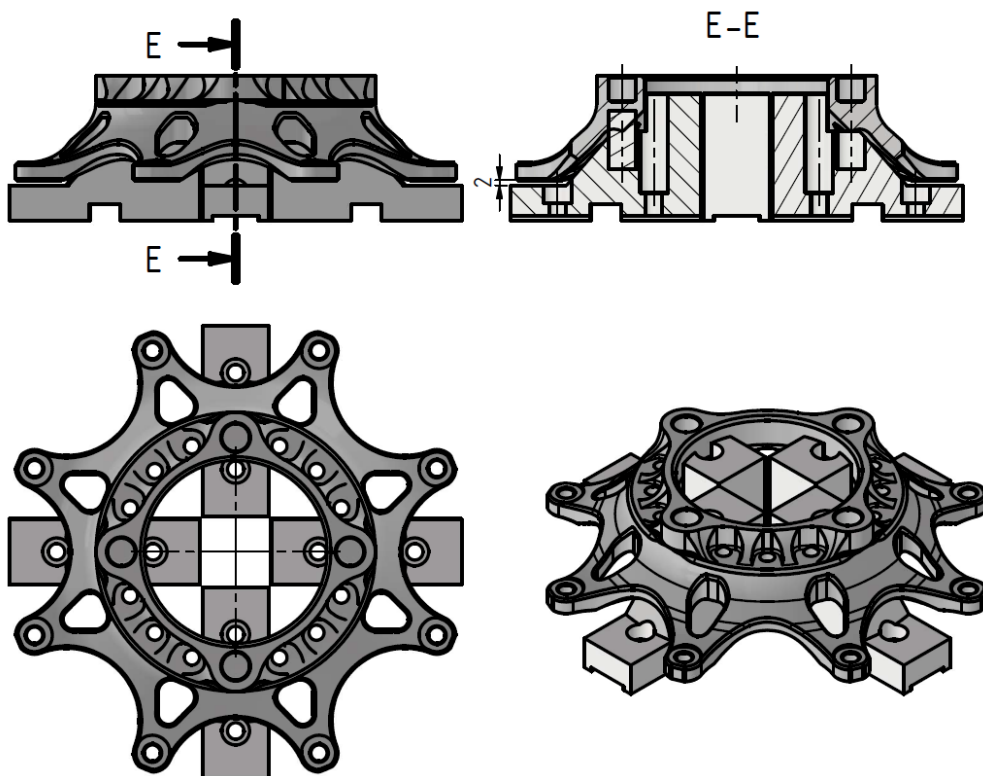
Další otázkou, kterou bylo třeba vyřešit bylo, zda použít tři nebo čtyř čelistové upnutí. Výhody tříčelistových čelistí: méně obrábění, levnější a fakt, že kruh definují tři body. Výhody čtyřčelistového sklíčidla: více opěrné plochy, symetrické upnutí vzhledem ke tvaru dílu. Po konzultaci jsem přistoupil ke čtyřčelistovému upnutí, jež jeho výhody byly mnohem přívětivější. Materiál, ze kterého jsem čelisti obráběl je slitina hliníku EN AW-7050. Nejprve bylo nutné tento materiál nadělit do příznivé velikosti, jež proběhlo na pásové pile stejné z první operace výrobního postupu. Dále následovalo obrábění na CNC frézce HAAS VF2, kde jsem nejprve strojně s využitím externího programu naprogramoval obrábění spodní normalizované strany a poté po otočení dílu ve svěráku na stroji následovalo zarovnání strany druhé. Výsledek tohoto frézování je patrný na Obr. 18.



Obrázek 18 - Vlastní mezi obrobená fáze dělených měkkých čelistí

Pro dosažení vyšší přesnosti upnutí jsem následně usadil společně tyto čelisti do sklíčidla na stroji pro další obrábění požadovaných tvarových ploch. Ze stejného důvodu jako u obrábění měkkých čelistí pro upnutí třetí operace bylo nutné čelisti před samotným obráběním předeprnout.

Na Obr. 21 uvádím vytvořený návrh sestavy upnutí se znázorněnou mezerou mezi čelistmi a vnější spodní hranou dílu, na Obr. 20 výsledek obrábění s upnutím na stroji a na Obr. 19 reálné upnutí dílu.



Obrázek 21 - Návrh upnutí na frézce



Obrázek 20 - Obrobené dělené měkké čelisti



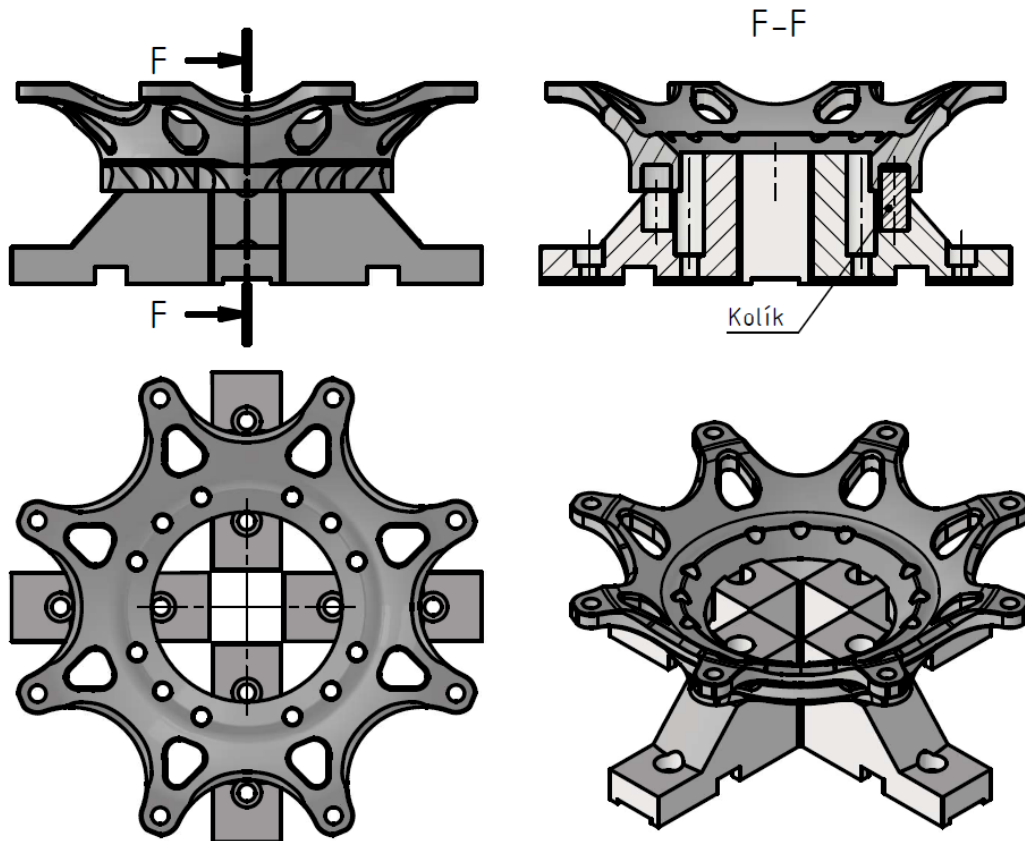
Obrázek 19 - Upnutí čtvrté operace

#### 5.6.4 Upnutí 5. operace

Tato operace je upnuta do stejných čelistí jako předchozí čtvrtá operace. Díl je pouze otočen o 180°. Na rozdíl od předchozí operace, kde nebylo třeba vystředění polohy dílu, zde je přidán externí vysoustružený kolíček patrný na Obr.22, který je usazený s malou vůlí v jedné z čelistí a zapadá do dílu patrného na schéma Obr. 23.



Obrázek 22 - Kolík v díře  $\varnothing 10,7$



Obrázek 23 - Návrh upnutí páté operace na frézce

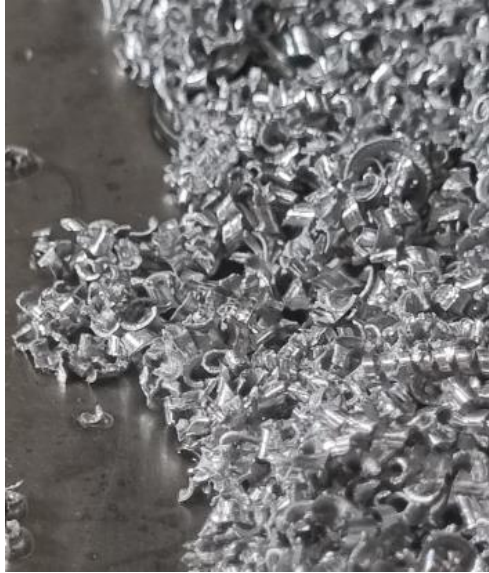
## 5.7 Volba nástrojů a upínačů

Optimální délky a vyložení nástrojů jsem volil tak, aby byly co možná nejmenší. Kratší délka tak eliminovala průhyby a chvění nástroje, která pak měla výrazný vliv na obrobený povrch. Nástroj tak mohl být mnohem tužší, tišší, lépe na něj působily řezné síly, nerezonoval, což výrazně ovlivňovalo přesnost obrábění. Po ustavení všech nástrojů do revolverové hlavy soustruhu a zásobníku na frézce bylo nutno zaměřit seřizovací body nástrojů. Toto seřízení bodů nástrojů je nezbytné, jelikož stroj s tímto bodem počítá a projíždí jím po vygenerovaných drahách v NC programu. Bylo tak provedeno za pomoci nástrojové měřicí sondy na soustruhu s přidavným ramenem a na frézce již upevněným na pracovní desce stolu stroje. Měřidlo na svém konci disponovalo přesně zaměřeným karbidovým tělískem, o který byl nástroj doteky zaměřen. Nejprve však bylo nutné s nástrojem za pomoci ručního ovládání stroje dojet na co nejbližší místo k měřidlu a cestou nekolidovat. Po zadání potřebných hodnot do systému, stroj následně automaticky provedl zaměření. Řezné podmínky použití v programu byly voleny z doporučených hodnot, které výrobci uváděli v katalogích či přímo z obalu především u výměnných břitových destiček.

### 5.7.1 Nástroje použité na soustruhu Okuma Genos L200E-MY

Nástroje použité na soustruhu jsem volil z výběru, který škola nabízí a břitové destičky jsem se snažil zvolit nejvhodnější pro obrábění hliníkových slitin. Ačkoli to vždy nebylo možné z hlediska dostupnosti, snažil jsem se vybrat tu nejlepší možnost. Proces obrábění jsem pak pečlivě sledoval a ve výsledku vše proběhlo tak, jak mělo. Na prvních kusech byly vyladěny tyto řezné podmínky pro dosažení dělené třísky znázorněné na Obr.24.





*Obrázek 24 - Dělená tříška při  
obrábění 2. a 3. operace*

Každý nástroj tak zde v následných tabulkách obsahuje držák a s ním i použité výměnné břitové destičky. Také zde bylo nutné dbát zvýšené pozornosti na rozestavení nástrojů v revolverové hlavě, jež by při obrábění mohly kolidovat se strojem, čelistmi či obrobkem.

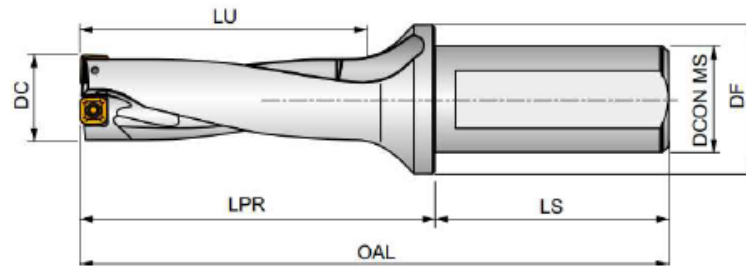
Tabulka 5 - Výpis nástroje č. 4 [10]

Pozice (číslo) nástroje: **4**

**803D-25-75-S32**

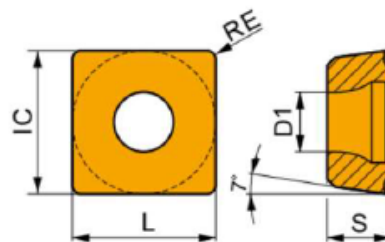


Vrták s destičkami a vnitřním chlazením



DC [mm]	OAL [mm]	LU [mm]	LPR [mm]	LS [mm]	DF [mm]	DCON MS [mm]
25	170	82	110	60	42	32

**SCET 070308-UD**



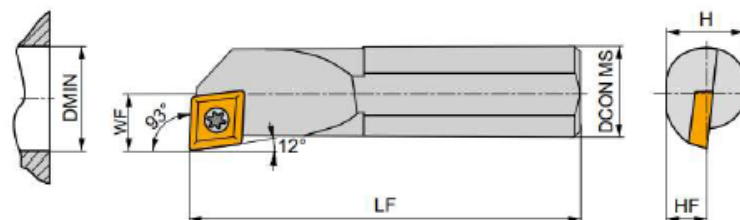
IC [mm]	D1 [mm]	L [mm]	S [mm]	RE [mm]	Vc [m·min <sup>-1</sup> ]	f [mm·ot <sup>-1</sup> ]
7,937	3,5	7,94	3,18	0,8	140-240	0,07-0,14

Pozice (číslo) nástroje: **8**

**S16R-SEUCR 08**

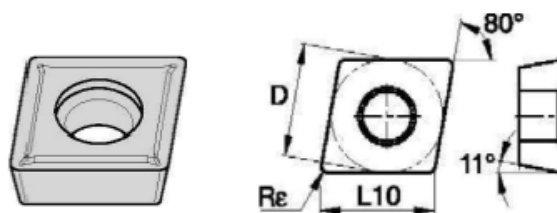


Vnitřní držák s upínáním šroubkem a úhlem nastavení 93°



DCON MS [mm]	DMIN [mm]	WF [mm]	LF [mm]	HF [mm]	H [mm]
16	20	11	200	7,5	15

**CPMT09T304LF**



D [mm]	Re [mm]	L10 [mm]	S [mm]
9,525	0,4	3,97	4,4

Pozice (číslo) nástroje: **10**

**A10H-SDUCR 07**

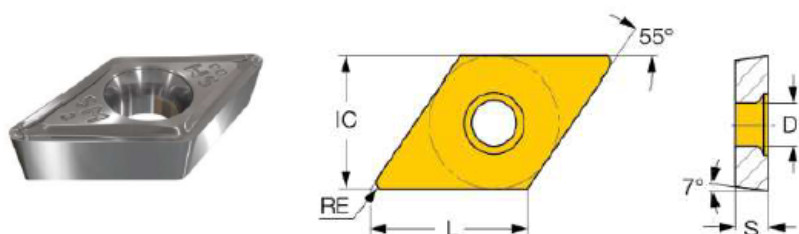


Vnitřní držák s upínáním šroubkem a úhlem nastavení 93° pro destičky DC..



DCON MS [mm]	DMIN [mm]	WF [mm]	LF [mm]	H [mm]	B [mm]
10	13	7	100	9	-

**DCMT 070204-SM**



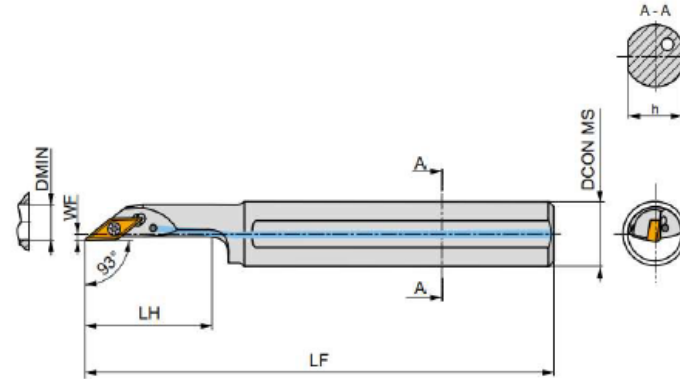
IC [mm]	D1 [mm]	L [mm]	S [mm]	RE [mm]	Vc [m·min <sup>-1</sup> ]	f [mm·ot <sup>-1</sup> ]
6,35	2,8	7,7	2,38	0,4	200-300	0,05-0,25

Pozice (číslo) nástroje: **6**

**A20R-SVJBR 11**

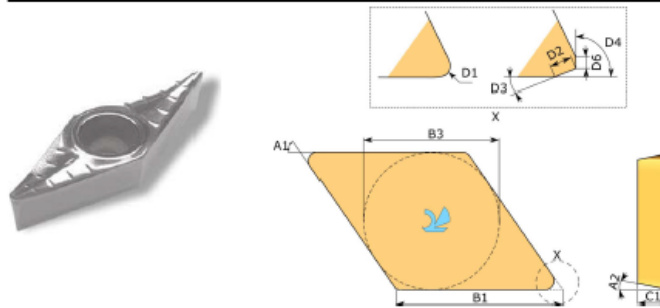


Vnitřní držák s upínáním šroubkem a úhlem nastavení 93° pro destičky VB/VC..



DCON MS [mm]	DMIN [mm]	WF [mm]	LF [mm]	h [mm]
20	25	2	200	18

**VCGT 110304FN-25P**


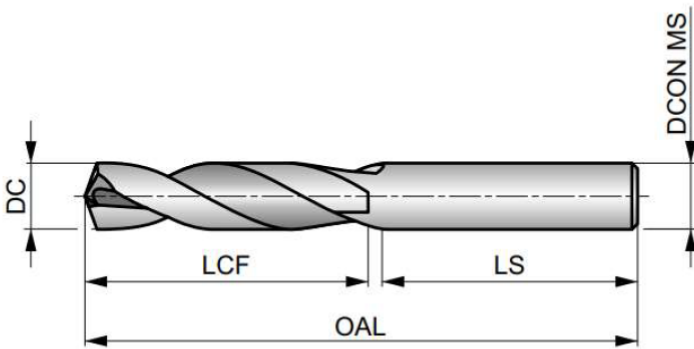


B3 [mm]	D1 [mm]	A1 [°]	B1 [mm]	C1 [mm]	Vc [m·min <sup>-1</sup> ]	f [mm·ot <sup>-1</sup> ]
6,35	0,4	30	11,1	3,18	140-200	max 1

## 5.7.2 Nástroje použité na frézce HAAS VF2

Pro tyto účely obrábění středu kola byly použity, následně uvedené nástroje v tabulkách. Nástroje jsou určeny pro obrábění hliníku a hliníkových slitin. Zakoupení těchto nástrojů bylo nezbytné, jelikož nebyly dostupné a potřebný tvar dílu to vyžadoval. Je zde však použita jedna fréza pozice (číslo) nástroj 14 která je univerzálně konstruovaná pro použití na více materiálu, jež byla jediná zvolená fréza, která byla již dostupná.

Tabulka 9 - Nástroj č. 10\* [10]

Pozice (číslo) nástroje: <b>10*</b>						
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <span><b>R4586.4</b></span>  </div> <p>FORCE X Monolitní karbidový vrták 3xD, Povlakovaný TiAlN</p>						
						
DC [mm]	OAL [mm]	LCF [mm]	LS [mm]	DCON MS [mm]	f [mm·ot-1]	Vc [m·min-1]
6,4	79	34	36	8	0,092 (+25%)	100-298

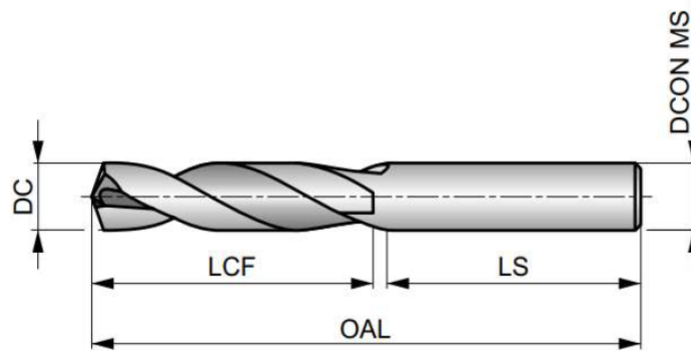
Tabulka 10 - Nástroj č. 11 [10]

Pozice (číslo) nástroje: **11**

**R4586.0**

**DORMER**

FORCE X Monolitní karbidový vrták 3xD, Povlakovaný TiAlN



DC [mm]	OAL [mm]	LCF [mm]	LS [mm]	DCON MS [mm]	f [mm·ot-1]	Vc [m·min-1]
6	66	28	36	6	0,092 (+25%)	100-298

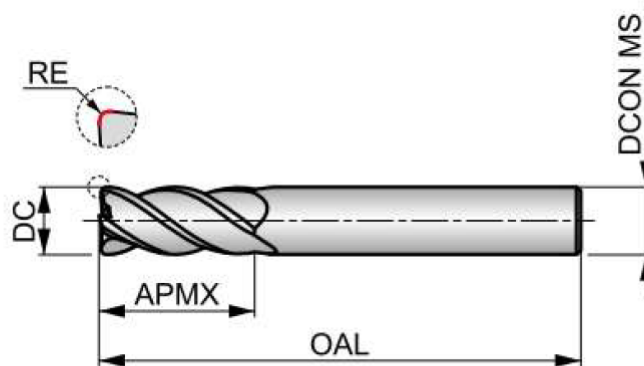
Tabulka 11 - Nástroj č. 12 [10]

Pozice (číslo) nástroje: **12**

**S6625.0XR0.5**

**DORMER**

Stopkové karbidové frézy čtyřbřité s radiusem v rohu



DC [mm]	OAL [mm]	APMX [mm]	RE [mm]	DCON MS [mm]	f [mm·ot-1]	Vc [m·min-1]
5	57	15	0,5	6	0,058 (+25%)	112-373

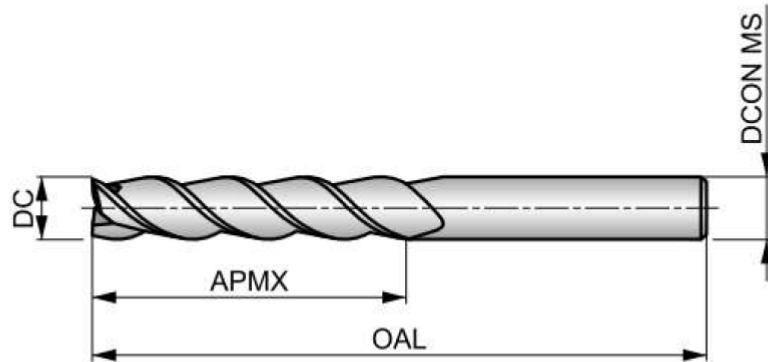
Tabulka 12 - Nástroj č. 13 [10]

Pozice (číslo) nástroje: **13**

**S6146.0**

**DORMER**

Stopkové karbidové frézy tříbřité, Extra dlouhé



DC [mm]	OAL [mm]	APMX [mm]	DCON MS [mm]	f [mm·ot-1]	Vc [m·min-1]
6	75	31	6	0,058 (+25%)	101-336

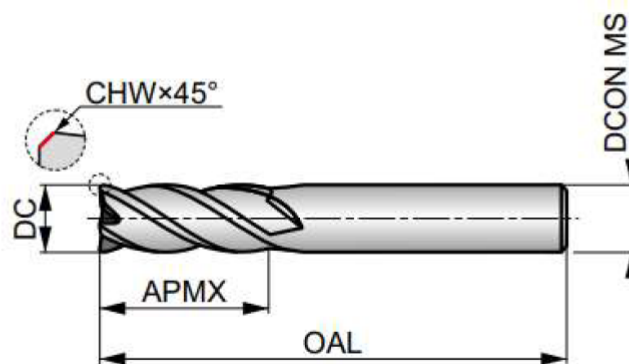
Tabulka 13 - Nástroj č. 14 [10]

Pozice (číslo) nástroje: **14**

**S814HA10.0**

**DORMER**

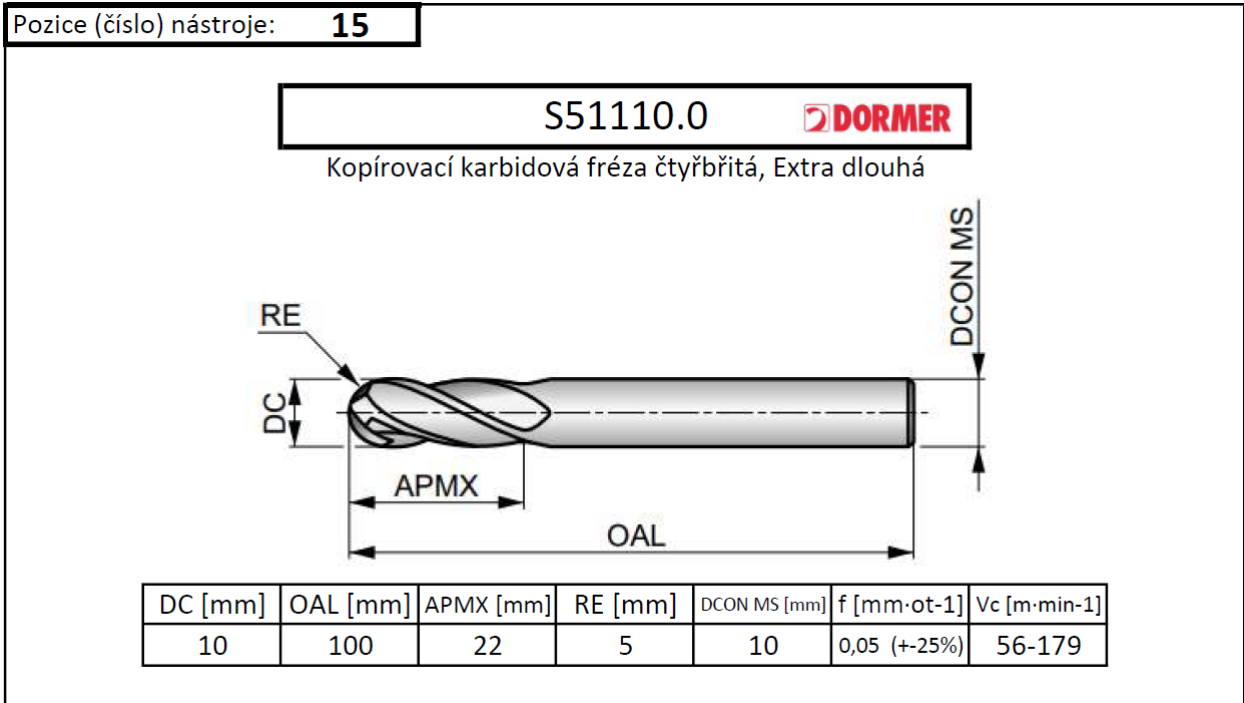
Stopkové karbidové frézy čtyřbřité se stopkou dle DIN 6535 HA



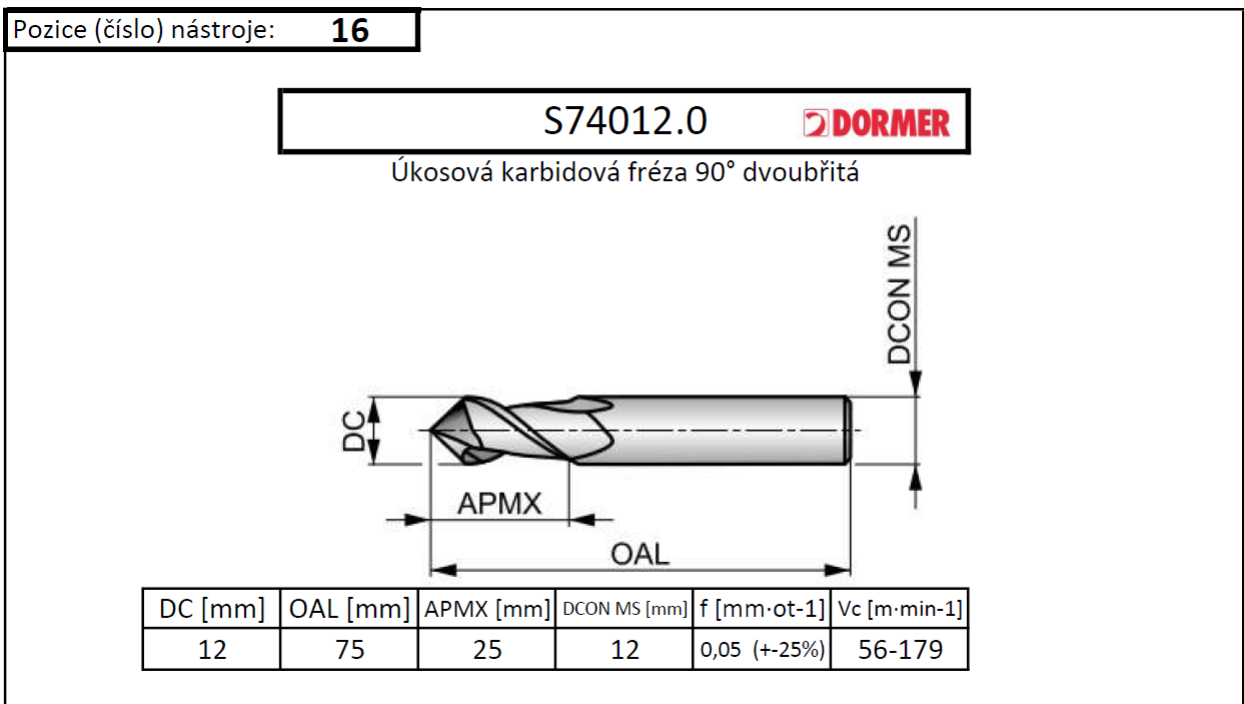
DC [mm]	OAL [mm]	APMX [mm]	DCON MS [mm]	CHW [mm]	f [mm·ot-1]	Vc [m·min-1]
10	72	22	10	0,2	0,08 (+25%)	52-173



Tabulka 14 - Nástroj č. 15 [10]



Tabulka 15 - Nástroj č. 16 [10]



## 5.8 Použité výrobní a měřicí stroje

### 5.8.1 CNC soustruh Okuma Genos L200E-MY

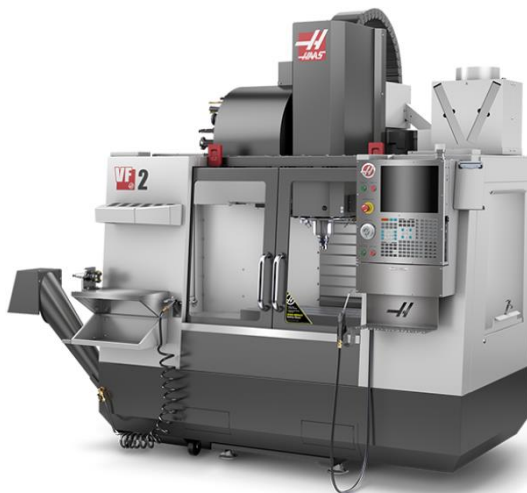


Obrázek 25 - Okuma Genos L200E-MY

Tabulka 16 - Technické parametry soustruhu [14]

Technická data OKUMA Genos L200E-MY			
<b>Pracovní prostor:</b>		<b>Rychloposuvy:</b>	
Velikost sklíčidla	8"	Osa X	20 m/min
Max. oběžný průměr	450 mm	Osa Y	10 m/min
Max obráběný průměr	200 mm	Osa Z	25 m/min
Max. obráběná délka	380 mm	Osa W	-
		Osa C	200 ot·min <sup>-1</sup>
<b>Vřeteno:</b>		<b>Pojezdy:</b>	
Otáčky	107 ÷ 4500 ot·min <sup>-1</sup>	Osa X	165 mm
Zakončení vřetene	JIS A2-6	Osa Y	80 mm
Vrtání vřetene (průměr)	66 mm	Osa Z	400 mm
Výkon	11,0/7,5 kW		
<b>NC koník:</b>		<b>Ostatní:</b>	
Upnutí hrotu	4 MK	Motor čerpadla	250 W
Pojezd	80 mm		
<b>Revolverová hlava:</b>		<b>Strojní data:</b>	
Počet nástrojových míst	12	Šířka	2118 mm
Upnutí: vnější obrábění	20 x 20 mm	Hloubka	1748 mm
Upnutí: vnitřní obrábění (průměr)	32 mm	Výška	2040 mm
Indexace: 1 poloha / 6 poloh	0,1 s	Zastavěná plocha	3,70 m <sup>2</sup>
Otáčky hnaného nástroje	50 ÷ 6000 ot·min <sup>-1</sup>	Hmotnost stroje	4600 kg
Výkon	4,0/1,8 kW		

## 5.8.2 CNC frézka HAAS-VF2



Obrázek 26 - HAAS VF-2 [15]

Tabulka 17 - Technické parametry frézky [15]

Technická data HAAS VF-2			
<b>Dráhy pojezdů:</b>		<b>Zásobník nástrojů:</b>	
Osa X	762 mm	Typ	Carousel
Osa Y	406 mm	Kapacita	20
Osa Z	508 mm	Max. průměr nástroje (plný)	89 mm
		Max. hmotnost nástroje	5.4 kg
		Nástroj k nástroji (prům.)	4.2 s
<b>Vřeteno:</b>		<b>Ostatní:</b>	
Max. výkon	22.4 kW	Objem chladicí kapaliny	208 l
Max. rychlost	8100 rpm	Pož. tlak vzduchu	6.9 bar
Max. krouticí moment	122.0 Nm	Hmotnost	3539 kg
Mazání ložisek	Air / Oil Inje	Rozměry	249 cm x 232 cm x 254 cm
Chlazení	Liquid Coole		
<b>Stůl:</b>			
Délka	914 mm		
Šířka	356 mm		
Max. zatížení stolu	1361 kg		
<b>Posuvy:</b>			
Max. obrábění	16.5 m/min		
Rychloposuv na X	25.4 m/min		
Rychloposuv na Y	25.4 m/min		
Rychloposuv na Z	25.4 m/min		

### 5.8.3 Pásová pila Bomar practix 285.230 G



Obrázek 27 - Pásová pila Bomar practix 285.230 G a Já

Tabulka 18 - Technické parametry pásové pily [16]

<b>Technická data Bomar practix 285.230 G</b>	
Nejmenší řezaný průměr	5 mm
Délka nejkratšího zbytku	40 mm
Ložná výška materiálu	1000 mm
Rozměry pilového pásu (D x V x Š)	2720 x 27 x 0,9 mm
Výkon pohonu pilového pásu	0,7 / 1,1 kW
Rychlost pilového pásu	35 / 72 m*min <sup>-1</sup>
Celkový instalovaný výkon	1,1 kVA
Rozměry stroje (Š x D x V)	915 x 1410 x 1520 mm
Hmotnost	225 kg

#### 5.8.4 Souřadnicový měřicí stroj ZEISS UCM 1000



Obrázek 28 - Souřadnicový měřicí stroj ZEISS UCM 1000

Třiosý souřadnicový měřicí stroj Carl Zeiss UCM 1000 Carat má maximální chybu indikace měření ve 3D  $2,4 + L/300 \mu\text{m}$ . Stroj disponuje velkým pracovním prostorem o velikosti 1000x3000x900 mm. Stroj pracuje v místnost s udržovanou konstantní teplotou 21°C. Tímto se zabráňuje tepelné roztažnosti stroje a zaručuje to tak vyšší přesnost naměřených hodnot.[17]

## 5.9 Využití materiálu

$$U_m = \frac{G_v}{G_p} * 100$$

Kde:  $U_m$  [%] ..... Ukazatel využití materiálu

$G_v$  [kg] ..... Hmotnost výrobku

$G_p$  [kg] ..... Hmotnost polotovaru

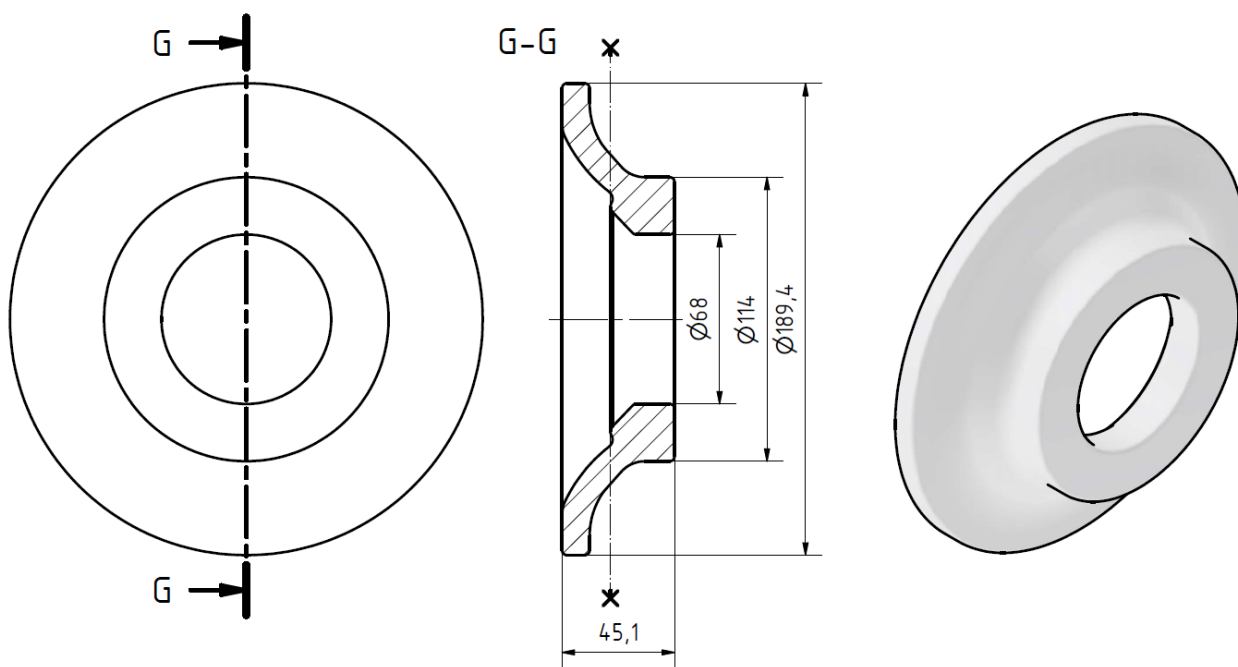
$$G_v = 365 \text{ g} = 0,365 \text{ kg}$$

$$G_p = 4176 \text{ g} = 4,176 \text{ kg}$$

$$U_m = \frac{G_v}{G_p} * 100 = \frac{0,365}{4,176} * 100 = 0,0874 * 100 = 8,74\%$$

Z uvedeného výpočtu je jasné, že materiálová ztráta je obrovská. Nejvíce odebraného materiálu je ve druhé a poté ve třetí operaci. Nebylo by zde špatné zmínit se o zamyšlení a ekonomickém zhodnocení možnosti použití výkovku. Z hlediska úspory materiálu by byl výkovek nejlepší možností, ovšem o použití výkovku je vhodné uvažovat až s většími sériemi výroby. S mým počtem deseti kusů by náklady na výrobu vlastního výkovku extrémně přesahovaly rozpočet. Výroba by byla z finančního hlediska neúměrně příliš drahá a v mém případě volby standartního hutního polotovaru tak byla tou nejlepší volbou, ukazatel využití materiálu je tak přijatelný.

Pro názornost úspory materiálu jsem navrhl vlastní polotovar s přídávkem dvou milimetrů na obrysových stranách znázorněného na Obr.29. S použitím stejné hustoty materiálu hliníkové slitiny mi dle programu Autodesk Inventor profesional 2022 vychází hmotnost 1060 g. Tuto hmotnost jsem ještě zvětšil o 15 % na 1219 g. Toto přibližné procento zahrnuje, v modelu neuvažované technologické přídávky, výronky, úkosy, zaoblení, případně blánu v díře. Ukazatel využití materiálu pak vychází  $U_m = 30 \%$ . U výkrovku by však bylo ještě vhodné zařadit tepelné zpracování pro vyšší statickou pevnost a pro snížení vnitřního pnutí. Jedná se tak o možnost mnohem přívětivějšího řešení při velkosériových výrobách.



Obrázek 29 - Návrh polotovaru

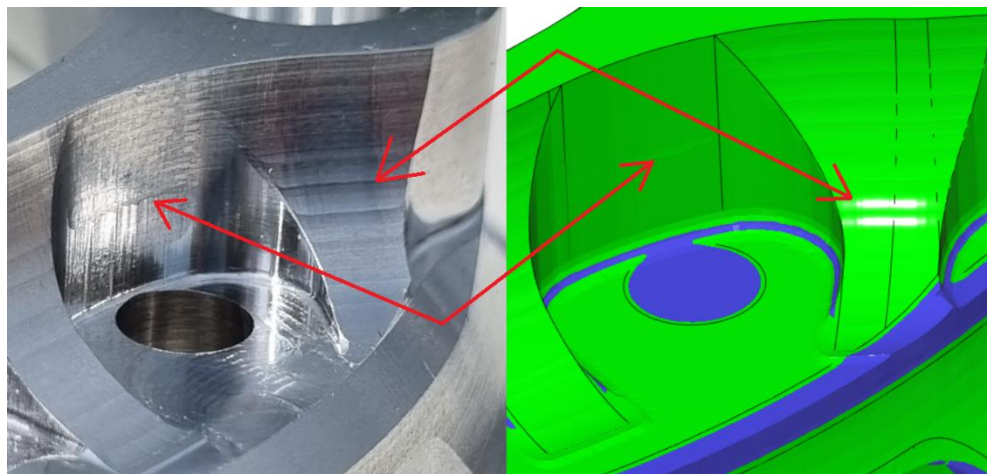
Také by zde bylo vhodné uvést možnost použití odlitku. Procento využití materiálu by tak mohlo být ještě mnohem vyšší. Muselo by se však jednat o přesné lití a bez obrábění, pro dosažení předepsaných tolerancí, by se tato možnost neobešla. Ovšem tento tip použité slitiny hliníku není vhodný pro odlévání z hlediska dosažení požadovaných mechanických vlastností. Standartně se odlévají slitiny se zhruba poloviční pevností, tudíž by díl musel být těžší, a proto není vhodné ho odlévat.

## 6 Tvorba NC programu

Pro programování CNC strojů jsou charakteristické především tři způsoby tvorby NC kódu. Jedná se zde o ruční, dílenské a strojní programování. Ruční programování je založené na postupném psaní “vět” (bloků) jež se dále skládají ze slov, které se zapisují do jednoduchého editoru s grafickým rozhraním, případně jej lze psát pouze v digitálním poznámkovém bloku. Program se skládá nejčastěji z M a G funkcí. Gxx funkce (pohybové) definují pohyby nástroje či obráběcího stroje. Mxx funkce (pomocné) určují činnosti, ne pohyby, při nichž dochází například k spuštění otáček vřetene, příkaz pro výměnu nástroje, spouštění chlazení a další. Toto leč jednoduché psaní programu se v praxi někdy považuje za vrcholné schopnosti zvládnutí tvorby NC kódu. Zásahy a změny do složitých a dlouhých NC programů nejsou leckdy vůbec jednoduché. Dalším způsobem tvorby NC programu je dílenské programování, jež probíhá přímo na stroji a je to i zároveň součástí řídicího systému. Tento způsob je někde na pomezí ručního a strojního programování. Zde programátor z grafického rozhraní vybírá přednastavené funkce, jímž pouze zadává a upravuje parametry. Výhodou tohoto způsobu je především rychlost přípravy, přesnost a relativní jednoduchost tvorby programu, na druhou stranu je zde pouze omezený počet jednoduchých a základních tvarů. Tou poslední základní možností tvorby NC programu je strojní programování. Zde se již programátor neobejde bez externího CAD/CAM softwaru. Programování se skládá z postupného způsobu tvorby NC programu. Prvním krokem je zadání partprogramu, který se skládá ze dvou částí. Tou první je část geometrická, ve které uživatel nejprve zadá, co chce obrábět, nejčastěji 3D model, poté nastaví polotovar a nadefinuje souřadný systém. Ta druhá část je technologická, kdy je specifikováno jak a čím se bude obrábět a při jakých podmínkách. Následuje procesor dle technologie, který zpracuje nadefinovaná data a vytvoří CL data (Cutter Location). Jsou to dráhy virtuálního nástroje někdy i s možností zobrazením pohybu stroje. Dalším krokem strojního programování je postprocesor, kdy CAM software přizpůsobí vytvořený program stroji, na který bude následně nahrán. Výsledkem tohoto strojního programování je vygenerovaný NC kód aplikovatelný na CNC stroji. Volba způsobu tvorby NC programu závisí především na oblasti použití. [7]



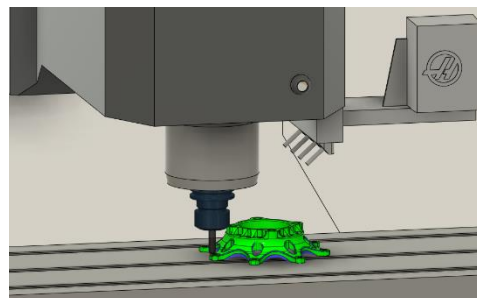
Z hlediska složitosti tvaru dílu jsem tak přistoupil k tvorbě NC programu strojním způsobem s využitím externího programu. Potřebný 3D model středu kola jsem obdržel ve formátu souboru spustitelném pouze v CAD/CAM softwaru CATIA V5. Proto jsem byl nejprve nucen převést formát souboru na mnou zvolený CAD/CAM software Autodesk Fusion 360 na kterém proběhla celá tvorba NC kódu. Po seznámení práce v CATIi jsem odstranil části (prvky) v modelu a přizpůsobil si tak model jednotlivým operacím. Fusion 360 nepodporoval práci s živým modelem (historie tvorby prvků) z modelu jiného výrobce softwaru. Zde bylo již nutné mít jasno nad postupem jaké tvary budu obrábět v jakých operacích s docílením jednoduchosti a přesnosti. Po nahrání těchto modelů do Fusionu 360 jsem nastavil velikost polotovaru průměru 200 mm tloušťky 47 mm a souřadný systém. Dále jsem nadefinoval zakoupené nástroje a následně přistoupil k tvorbě jednotlivých strategií obrábění v daných operacích. Nejprve jsem vytvářel dráhy nástroje pro soustružení a následně pro frézování. Pro dříve již zmiňovaný nešikovní tvar zkosení hran vytvářející tvarové plochy v prostoru jsem musel v nastavení ve Fusionu 360 odemknout nestandardně předvolenou strategii Blend jež vytvářela nejprívětivější dráhy. Tvorba těchto strategií trvala z celého procesu přípravy asi nejdéle. Po vytvoření těchto drah bylo možné v simulaci pozorovat předpokládané zanechané stopy obráběcím nástrojem na povrchu, program tak uvažoval mnou předvolené a vybrané nástroje. Tyto zanechané stopy po nástroji v simulaci ve srovnání s realitou lze vidět na Obr. 30. A na Obr. 31, 32 je možné vidět provedenou simulaci i s celým strojem, při které bylo možné předcházet případným kolizím.



*Obrázek 30 - Porovnání obrobeneho reálného povrchu se simulací*



Obrázek 32 - Simulace stroje



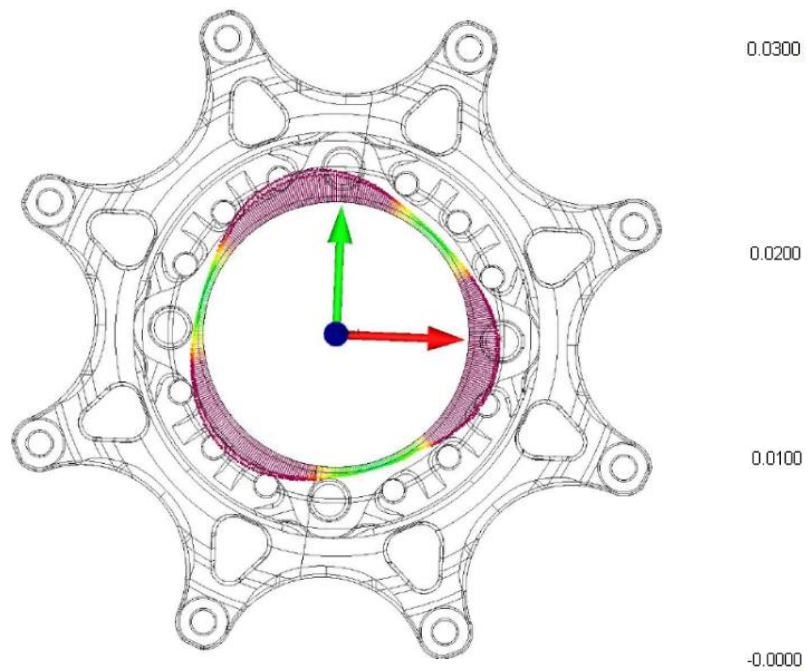
Obrázek 31 - Detail simulace stroje

Pro frézku byl použit postprocesor s názvem HAAS Automation – Next Generation Control, dostupný z knihovny v programu Fusion 360. Po vytvoření a nahrání NC programu do stroje bylo dílenským programováním vloženo zaměření souřadného systému polohy dílu měřicí sondou. Vygenerovaný program se z počítače na stroj přenášel pomocí USB flash disku. Velkou nevýhodou, především na frézce, bylo zdlouhavé přenášení NC programu, jež bylo nutné při potřebě změny sebemenšího parametru.

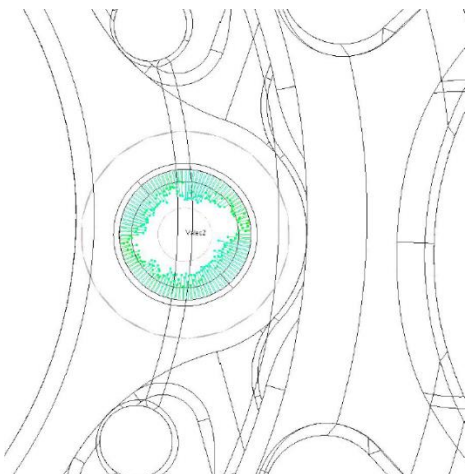
## 7 Měření na CMM

Měření bylo provedeno na CMM souřadnicovém měřícím stroji ZEISS UCM 1000 pro vyhodnocení požadovaných rozměrů předepsaných na výkrese. Na měření byl použit snímač s rubínovou kuličkou průměru 3 mm. Charakteristiky pro měření, které jsou po měření následně vyhodnoceny se zadávají do programu CALYPSO 2020. V tomto programu jsem na vloženém 3D modelu nadeřinoval veškeré zakótované a tolerované rozměry z výkresové dokumentace, tím jsem tak vytvořil plán měření. Následně bylo nutné ručně zaměřit polohu dílu na pracovní desce a poté jsem spustil vytvořený program a stroj automaticky naměřil zapsaná data. Měření proběhlo z obou stran dílu. Pro představu, první měření s nejvíce parametry trvalo zhruba necelých 7 minut. Zde bych nyní vyhodnotil naměřená data.

Jako první asi nejzajímavější měření bych zmínil měření průměru 72 mm. Na grafickém znázornění, které program vytvořil z naměřených dat, je krásně viditelný vliv upnutí mezi třemi čelistmi. Obr. 33. Připasováním největší možné vepsané kružnice a její hodnotě tak díl vyhovuje toleranci průměru. Pro eliminaci tohoto efektu by bylo možné použít menší utahovací sílu, nebo by bylo vhodné použít více čelistové sklíčidlo a díl tak upnout na více místech pro lepší a rovnoměrnější rozložení sil.











Obrázek 33 - Vliv upnutí



Obrázek 34 - Průměr 10,7 mm

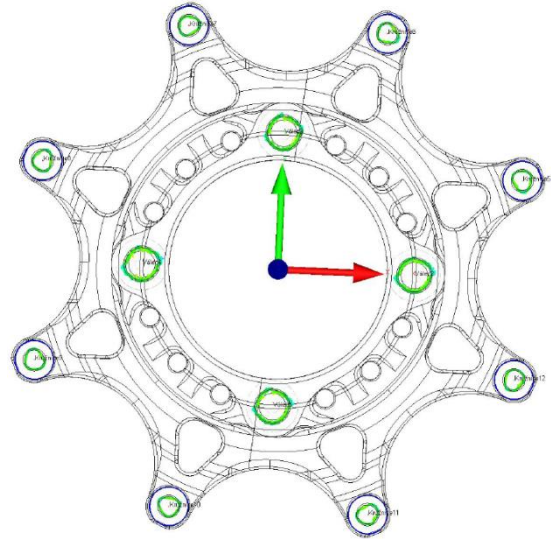
Na průměru 10,7 mm jsem našel možnou chybu obráběcího stroje. Všechny změřené průměry vykazovaly tu samou chybu. Tato chyba je patrná na Obr. 34, kde je znázorněn tento průměr, na kterém je ve vodorovné poloze více protáhlý kraj do stran. S největší pravděpodobností to je způsobeno vůlí v pohybovém šroubu, bylo by dobré zmínit, že tento stroj je skoro nový. I přes tuto chybu však rozměr vyhovuje.

Tabulka 19 - Naměřené reálné průměry 10,7 mm

Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Odchylka +/-
Ø Prumer1	10,6748	10,7000	0,0500	-0,0500	-0,0252  
Ø Prumer2	10,6745	10,7000	0,0500	-0,0500	-0,0255  
Ø Prumer3	10,6746	10,7000	0,0500	-0,0500	-0,0254  
Ø Prumer4	10,6745	10,7000	0,0500	-0,0500	-0,0255  

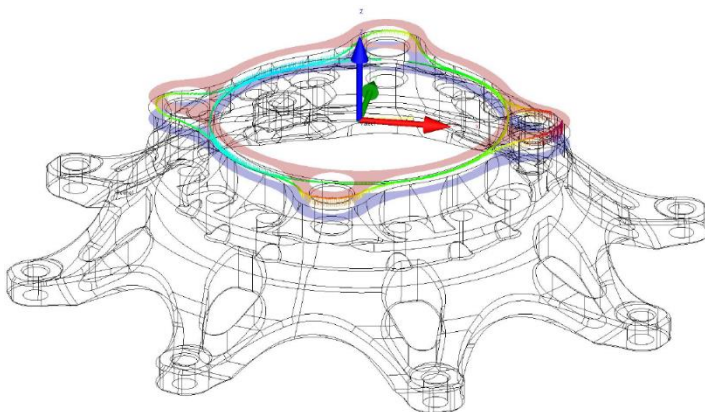
Dalším vyhodnocovaným rozměrem byla hloubka děr průměru 10,7, jež bohužel nevyhověla předepsaným tolerancím. Nepovšimnul jsem si, že 3D model dílu nebyl vymodelován na středu tolerančního pole a ve výsledku došlo k přehlédnutí této skutečnosti. Tato hodnota na modelu byla 10 mm a dle výkresu měla být 10,1 až 10,2 mm, ideální by tak bylo, kdyby na 3D modelu byla hodnota 10,15 mm. Po konzultaci tak bylo rozhodnuto, že opravným zafrézováním do větší hloubky by mohlo být do dílu vneseno mnohem více jiných nepřesností. Zapadající čep do této díry není navržen, tak aby na tuto plochu dosedal a na funkčnost dílu to ve výsledku nemá žádný vliv.

Dalším nepovedeným rozměrem byla tolerance polohy jen některých obvodových osmi děr. U děr bylo patrné posunutí směrem od středu dílu ven. Toto posunutí bylo nejspíše zapříčiněno velkým množstvím odebraného materiálu. Polotovár byl vyroben válcováním, tudíž je pravděpodobné vzhledem k velkému rozměru, že uvnitř polotovaru bylo vneseno vnitřní napětí. Po odebrání tohoto materiálu se napětí uvolnilo a díl se roztáhl. Předejít by tomu šlo zařazením vrtání



Obrázek 35 - Poloha děr

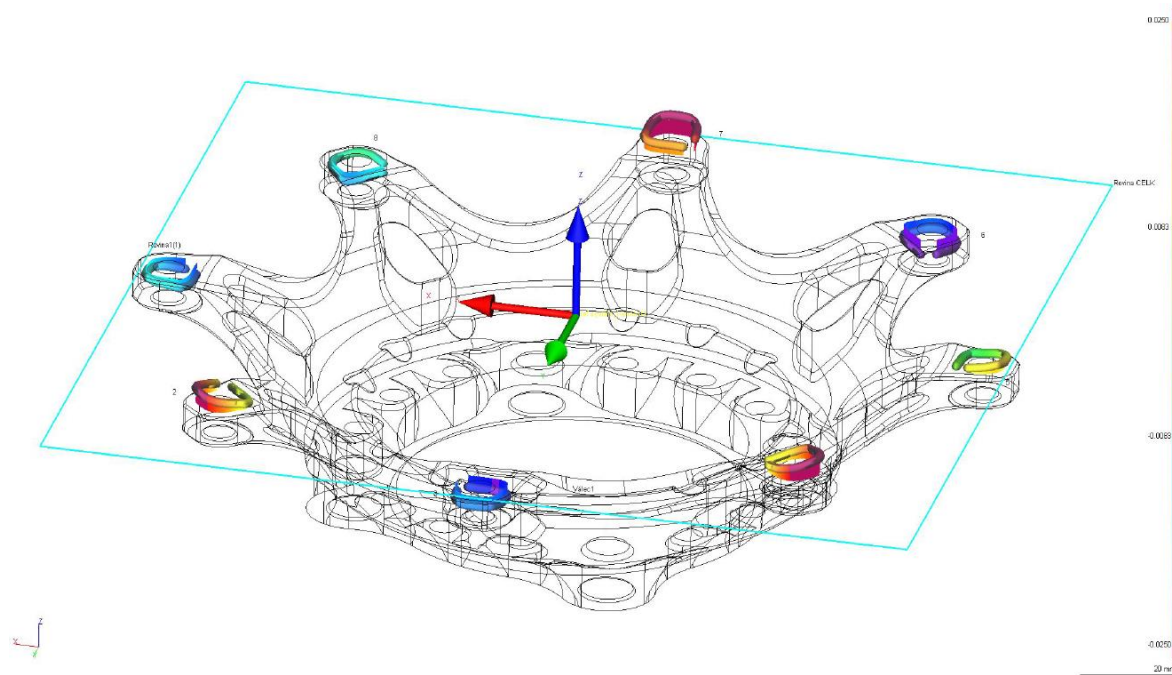
těchto děr průměru 6,4 mm až na konec výrobní operace, až poté, co by byla obrobena velká masa materiálu a díl by byl již roztažený. Jedná se zde o díry navržené pro průchozí šroub, kdy je mezi těmito prvky navržena vůle, proto jsem taktéž nepřistoupil k opravě, je zde však dobré odnést si z této skutečnosti zkušenosti do budoucna. Další možnou vnesenou chybou do měření mohlo být při zaměřování souřadného systému sejmutí referenčního již zdeformovaného průměru 72 mm od tříčelistového upnutí. Svou roli při měření sehrálo i posunutí sondy o 0,06 mm, které bylo zjištěno později.



Obrázek 36 - Geometrická tolerance kolmosti

Další velice hezky znázorněnou hodnotou je tolerance kolmosti, kdy červená barva plochy na Obr. 36 představuje horní toleranční mez a modrá dolní toleranční mez. Naměřené hodnoty zde leží mezi vyznačenými plochami a díl tak této geometrické toleranci vyhovuje.

Na tomto dalším obrázku (Obr.37) je dalším grafickým způsobem znázorněná kolmost ploch druhé strany dílu. Zde je možné pozorovat jisté trojúhelníkové souměrnosti, která může být dána již znázorněným tříčelistovým upnutím a napružením dílu.



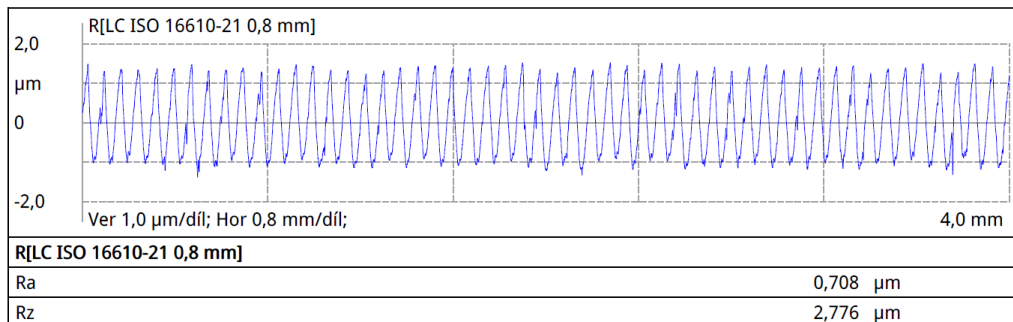
Obrázek 37 - Kolmost druhé strany dílu

## 7.1 Kontrola drsnosti povrchu

Předepsanou drsnost jsem zkontroloval na přenosném dílenském drsnoměru MarSurf PS10 od výrobce MAHR se snímačem PHT 350. Po každém měření přístroj vytvořil protokol o měření. Z tohoto protokolu bylo možné vyčíst reálné hodnoty povrchu. V tabulkách na grafech je viditelný reálný průběh drsnosti povrchu. Ve výkrese je předepsán pouze parametr Ra, jež na měřených dílech s velkou rezervou vyhovuje.

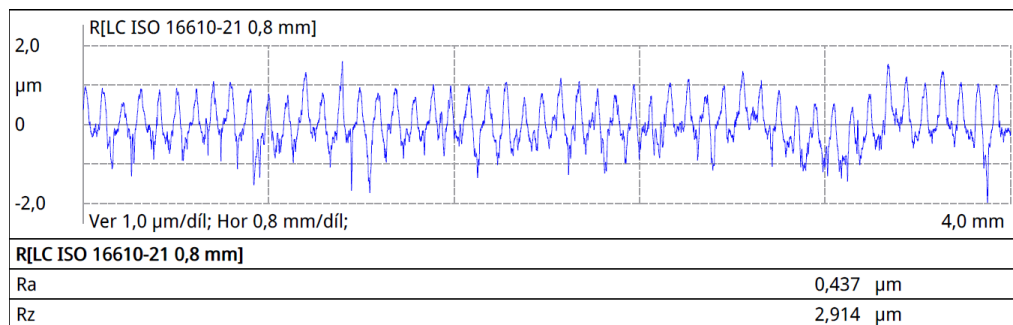
Naměřená drsnost na vnější dosedací ploše u osmi obvodových děr. Předepsané  $R_a=1,6\mu\text{m}$ , dosažené  $R_a=0,708\mu\text{m}$ .

Tabulka 20 - Drsnost na vnější dosedací ploše u osmi obvodových děr



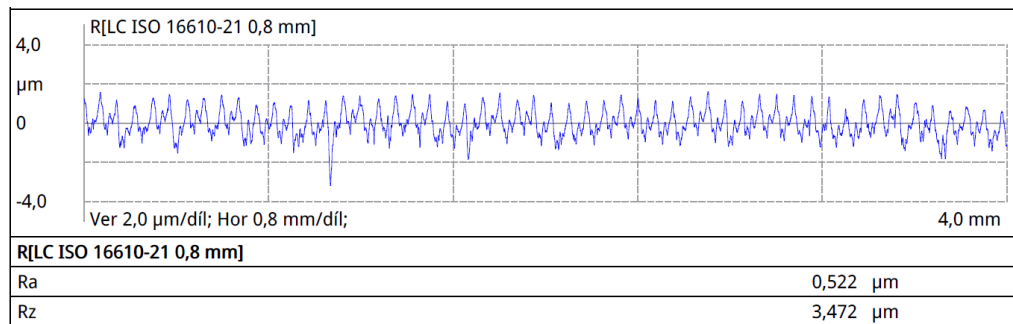
Naměřená drsnost na vnitřní dosedací ploše u čtyř děr průměru 10,7 mm. Předepsané  $R_a=1,6\mu\text{m}$ , dosažené  $R_a=0,437\mu\text{m}$ .

Tabulka 21 - Drsnost na vnitřní dosedací ploše u čtyř děr průměru 10,7 mm



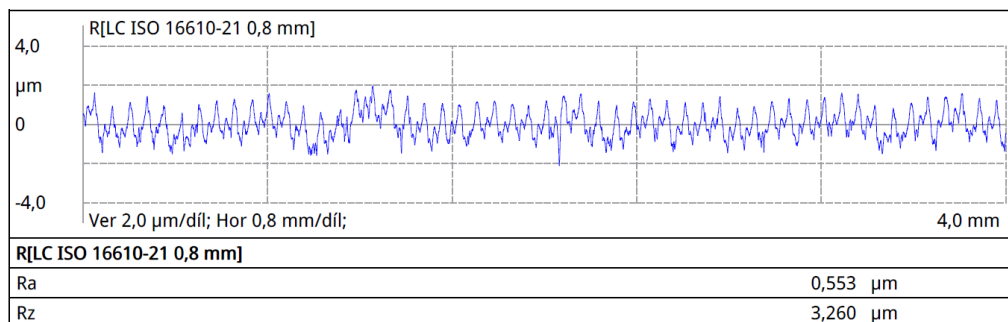
Naměřená drsnost na dosedacím kuželu. Předepsané  $R_a=1,6\mu\text{m}$ , dosažené  $R_a=0,522\mu\text{m}$ .

Tabulka 22 - Drsnost na dosedacím kuželu



Naměřená drsnost na průměru 72 mm. Předepsané  $Ra=1,6\mu\text{m}$ , dosažené  $Ra=0,553\mu\text{m}$ .

Tabulka 23 - Drsnost na průměru 72 mm



## 8 Diskuse

Výrobu komplikovala vysoká teplota prostředí v halových laboratořích, kdy CNC soustruh Okuma Genos L200E-MY hlásil chybu výpadku spojky po delší době práce a nebyl tak schopný vyrábět a proces tím byl pozdržen. Tato vysoká teplota také jistě měla neblahý vliv na tepelnou roztažnost strojů a přesnost obrábění mohla být ovlivněna i z tohoto důvodu.

Řezné podmínky byly vyladěny tak, že například dlouhé vyložení soustružnického nástroje u dokončování ploch bylo bez známek vibrace.

V průběhu návrhů výroby jsem taktéž komunikoval se studentským týmem CarTech CTU ohledně konstrukčních změn v rozměrech dílu.

Z vyráběných deseti kusů jsem po kontrole a konzultaci vyhodnotil jeden kus, ten první, na kterém byl celý proces vyladěn jako nepoužitelný z důvodu nepřesného rozměru průměru 72 mm, jenž je velice důležitý.

Program by bylo možné více optimalizovat pro zkrácení strojního času výroby. Například úpravami drah nástroje, především těch přejezdových, kdy není nástroj v řezu. Dalším prostorem pro zlepšení by jistě mohla být optimalizace řezných podmínek za účelem nejlepšího ekonomického využití životnosti nástroje. Ovšem tyto úpravy by již přesahovaly rozsah práce. Tyto optimalizace by bylo vhodné řešit u velkosériových výrob, a ne při množství deseti kusů.



## 9 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout a realizovat výrobní postup pro osm funkčních dílů středu kola pro studentskou formuli s použitím dostupných výrobních prostředků ve škole a projít si tak procesem z pozice technologa.

Nejprve byla osoustružena najednou jedna strana všech dílů (2. Operace) a až poté byly díly osoustruženy z druhé strany. Mělo to dva zásadní důvody, ten první byl urychlení výroby, kdy se nemusely vyměňovat po každém díle čelisti, a ten druhý byl, že po vyndání měkkých obrobených čelistí by se vnášela do upnutí jistá nepřesnost.

Dle zadání jsem provedl návrh výrobního postupu středu kola formule a následně ho i úspěšně realizoval. Výsledkem tak je 8 funkčních použitelných dílů a jeden rezervní, které byly již odzkoušeny nasazením na formuli. Tento výrobní postup obsahoval vhodně zvolené obráběcí nástroje a návrh upnutí. Pro naprogramování pohybů strojů jsem použil externí CAM software.

Také bych rád zdůraznil, že práce byla velice časově náročná. Mohl jsem zde však uplatnit všech svých nabitých teoretických znalostí dosažených při studiu na ČVUT, ale také i ze střední průmyslové školy strojnické, kde jsem již šel cestou v zaměření CAD/CAM technologií. Práce mě bavila a jsem rád, že nalezne i praktické využití.

Po naskenování tohoto QR kódu nebo přepsáním adresy uvedené pod ním je možné dostat se do sdíleného disku. Do tohoto disku příkládám vytvořené NC programy jednotlivých operací. S foto i video dokumentaci z procesu výroby.



<https://drive.google.com/drive/folders/1QA2ZnpY9SE-SkNaNpSyfo05eIzz6KmZD?usp=sharing>

## 10 Seznam obrázků

Obrázek 1 - CNC stroj na děrné pásy [1] .....	12
Obrázek 2 - Patrick J. Hanratty Ph.D [18] .....	13
Obrázek 3 - Výrobní výkres středu kola [19].....	20
Obrázek 4 - 3D model středu kola .....	21
Obrázek 5 - Kolová soustava [19] .....	22
Obrázek 6 - Schéma polotovaru .....	23
Obrázek 7 - Hotový díl z nylonu .....	24
Obrázek 8 - Upnutí na pásové pile.....	25
Obrázek 9 - Schéma upnutí na pásové pile.....	25
Obrázek 10 - Schéma upnutí 2. operace.....	26
Obrázek 11 - Schéma upnutí 3. operace.....	28
Obrázek 12 - Schéma upnutí 4. operace.....	30
Obrázek 13 - Schéma upnutí 5. operace.....	33
Obrázek 14 - Výsledky jednotlivých operací .....	34
Obrázek 15 - Upnutí druhé operace .....	35
Obrázek 16 - Upnutí třetí operace .....	35
Obrázek 17 - Vlastní návrh přípravku .....	36
Obrázek 18 - Vlastní mezi obrobená fáze dělených měkkých čelistí.....	37
Obrázek 19 - Upnutí čtvrté operace .....	38
Obrázek 20 - Obrobené dělené měkké čelisti.....	38
Obrázek 21 - Návrh upnutí na frézce.....	38
Obrázek 22 - Kolík v díře $\varnothing 10,7$ .....	39
Obrázek 23 - Návrh upnutí páté operace na frézce.....	39
Obrázek 24 - Dělená tříska při obrábění 2. a 3. operace .....	41
Obrázek 25 - Okuma Genos L200E-MY .....	50
Obrázek 26 - HAAS VF-2 [15] .....	51
Obrázek 27 - Pásová pila Bomar practix 285.230 G a Já.....	52
Obrázek 28 - Souřadnicový měřicí stroj ZEISS UCM 1000 .....	53

Obrázek 29 - Návrh polotovaru .....	55
Obrázek 30 - Porovnání obrobeneho reálného povrchu se simulací .....	57
Obrázek 32 - Detail simulace stroje .....	58
Obrázek 31 - Simulace stroje .....	58
Obrázek 33 - Vliv upnutí .....	59
Obrázek 34 - Průměr 10,7 mm.....	60
Obrázek 35 - Poloha děr .....	61
Obrázek 36 - Geometrická tolerance kolmosti.....	61
Obrázek 37 - Kolmost druhé strany dílu .....	62

## 11 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Druhá operace [9] [10] .....	27
Tabulka 2 - Třetí operace [9] [10] .....	29
Tabulka 3 - Čtvrtá operace [9] [10] .....	31
Tabulka 4 - Pátá operace [9] [10] .....	34
Tabulka 5 - Výpis nástroje č. 4 [10] .....	42
Tabulka 6 - Výpis nástroje č. 8 [10] [11] .....	43
Tabulka 7 - Výpis nástroje č. 10 [10] [12] .....	44
Tabulka 8 - Výpis nástroje č. 6 [10] [13] .....	45
Tabulka 9 - Nástroj č. 10* [10] .....	46
Tabulka 10 - Nástroj č. 11 [10] .....	47
Tabulka 11 - Nástroj č. 12 [10] .....	47
Tabulka 12 - Nástroj č. 13 [10] .....	48
Tabulka 13 - Nástroj č. 14 [10] .....	48
Tabulka 14 - Nástroj č. 15 [10] .....	49
Tabulka 15 - Nástroj č. 16 [10] .....	49
Tabulka 16 - Technické parametry soustruhu [14] .....	50
Tabulka 17 - Technické parametry frézky [15] .....	51
Tabulka 18 - Technické parametry pásové pily [16] .....	52
Tabulka 19 - Naměřené reálné průměry 10,7 mm .....	60
Tabulka 20 - Drsnost na vnější došedací ploše u osmi obvodových děr .....	63
Tabulka 21 - Drsnost na vnitřní došedací ploše u čtyř děr průměru 10,7 mm .....	63
Tabulka 22 - Drsnost na došedacím kuželu .....	63
Tabulka 23 - Drsnost na průměru 72 mm .....	64

## 12 Zdroje

- [1] The History of CAM-Past, Present and Future. *Scan2CAD* [online]. 27.1.2018 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.scan2cad.com/blog/cad/history-of-cam/>
- [2] GEDDES, Duncan. The history of computer-aided design and computer-aided manufacturing (CAD/CAM). *Technicalfoamservices* [online]. 5.5.2020 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.technicalfoamservices.co.uk/blog/blog-history-of-cad-cam/>
- [3] HISTORY OF CAD/CAM SOFTWARE. *Duckiearmy* [online]. 26.7.2021 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.duckiearmy.com/history-of-cad-cam-software.html>
- [4] BI, Zhuming a Xiaoqin WANG. *Computer aided design and manufacturing*. Hoboken, NJ: John Wiley, 2020. ISBN 978-1-119-53421-1.
- [5] 60 Years of CAD Infographic: The History of CAD since 1957. *CADENAS PARTsolution* [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://partsolutions.com/60-years-of-cad-infographic-the-history-of-cad-since-1957/>
- [6] MARCEL DASSAULT, Avions. 1977 CATIA. *History of Innovation* [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://aehistory.wordpress.com/1977/01/01/1977-catia/>
- [7] Ing. Jan Tomíček, Ph.D. APOS Presentace 1. a 8. In: *Automatizace programování obráběcích strojů*. Praha.
- [8] *PRIMAPOL* [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: [https://www.primapol.cz/produkty/hlinik/#EN\\_AW-7075](https://www.primapol.cz/produkty/hlinik/#EN_AW-7075)
- [9] SVOBODA, Jiří. *Prototypová výroba a její realizace*. Praha, 2019. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Jan Tomíček Ph.D.
- [10] *DORMER PRAMET: Katalogy* [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://dormerpramet.com/cz/cs/downloads-catalogs>
- [11] *KENNAMETAL* [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.kennametal.com/cz/cs/products/fam.cpmt-lf.100002900.html#tad>
- [12] *ISCAR: ISO turning* [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Family.aspx?fnum=868&mapp=IS&GFSTYP=M>
- [13] *ToolsUnited: CERATIZIT* [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.toolsunited.com/App/EN/Article/ArticleDetailsPage/2469640013087901>

- [14] MIKEŠ, Miroslav. *Ověření postprocesoru pro SW FeatureCAM a stroj OKUMA Genos L200E-MY*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Pavel Novák, Ph.D.
- [15] HAAS/HAAS F1 team: VF-2 [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.haascnc.com/cs/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2.html>
- [16] K&K SERVIS: *Univerzální pásová pila Practix pulldown 285.230 G* [online]. [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <http://www.kkservis.cz/univerzalni-pasova-pila-practix-pulldown-285230-g>
- [17] Bc. Josef Vacík. *VÝVOJ A VÝROBA FREEFORM ETALONU PRO PERIODICKÉ ZKOUŠKY CMM*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Libor Beránek, Ph.D.
- [18] WAURZYNIAK, Patrick. Masters of Manufacturing: Patrick J. Hanratty. *SME* [online]. 1.7.2010 [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.sme.org/technologies/articles/2010/masters-of-manufacturing-patrick-j.-hanratty/>
- [19] CarTech CTU. *Poskytnutá výrobní dokumentace od studentského týmu* [online]. In: . Praha [cit. 2022-07-25].
- [20] ŠTULPA, Miloslav. *CNC: programování obráběcích strojů*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-5269-3.