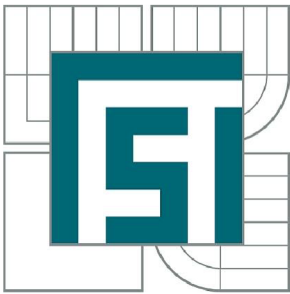


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# **NÁVRH A VÝROBA PŘÍRUBY NÁBOJE ZADNÍHO KOLA FORMULE POMOCÍ TECHNOLOGIE CAD/CAM A DÍLENSKÉHO CNC PROGRAMOVÁNÍ**

DESIGN AND MACHINING OF THE FLANGE HUB REAR WHEEL OF THE FORMULA BY USING  
CAD/CAM TECHNOLOGY AND CNC WORKSHOP PROGRAMMING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. ALEŠ LUČANÍK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. JOSEF SEDLÁK, Ph.D.**

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Aleš Lučaník

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

**Návrh a výroba příruby náboje zadního kola formule pomocí technologie CAD/CAM a dílenského CNC programování**

v anglickém jazyce:

**Design and machining of the flange hub rear wheel of the formula by using CAD/CAM technology and CNC workshop programming**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Úvod
2. Charakteristika a popis technologie frézování a soustružení
3. Rozbor obráběného materiálu
4. Konstrukce prototypu příruby náboje zadního kola Formule Student v programu Autodesk Inventor. Návrh obráběcích strategií v CAM softwaru PowerMILL a tvorba CNC programu pomocí dílenského programování
5. Výroba prototypu příruby náboje zadního kola na obráběcím centru MCV 754 s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530 a CNC soustruhu Gildemeister CTX 210 s řídicím systémem Sinumerik 840D
6. Technicko-ekonomické zhodnocení
7. Závěr

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce bude návrh a výroba prototypu příruby náboje zadního kola Formule Student s využitím moderní CAD/CAM a CNC technologie. Teoretická část práce se bude zabývat charakteristikou technologie třískového obrábění (technologie soustružení, frézování) a volbou obráběného materiálu včetně aplikovaných rezných nástrojů. Prototyp příruby náboje zadního kola bude navržen a zkonstruován v CAD aplikaci Autodesk Inventor. Pro vytvoření frézovacích drah bude využit CAM software PowerMILL a pro soustružnické operace bude aplikován moderní dílenský systém ShopTurn. Výroba prototypu příruby náboje zadního kola bude provedena na obráběcím centru MCV 754 s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530 a CNC soustruhu Gildemeister CTX 210 s řídicím systémem Sinumerik 840D. Práce bude ukončena technicko-ekonomickým zhodnocením a rozbohem navržené varianty výroby.



Seznam odborné literatury:

1. PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1.vyd. 246s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vydání. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. HEIDENHAIN: Příručka pro uživatele DIN/ISO. Programování iTNC 530. 533 188–Co-SW01.1.5/2005, Německo, Traunreut, 1.vyd., 576 s.
4. KOČMAN, K, PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vydání. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
5. Delcam plc. PowerMILL Training Course. Birmingham, c2005. 266 s.
6. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 22.11.2012

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a výrobou příruby náboje zadního kola formulového vozu s využitím moderní CAD/CAM technologie a CNC dílenského programování. Úvodní část této práce uvádí teoretický popis a charakteristiku technologie soustružení a frézování. Dále je zde uveden rozbor hliníkových slitin směřující k popisu a začlenění materiálu, z kterého je obráběná součást vyrobena. Praktická část práce popisuje konstrukci příruby náboje v CAD programu Autodesk Inventor, dále návrh soustružnických drah v systému ShopTurn a poté návrh frézovacích strategií v programu PowerMILL. K závěru práce mapuje samotnou realizaci výroby součásti na CNC soustruhu a CNC obráběcím centru ve firmě BOSCH DIESEL s.r.o. v Jihlavě. Poslední kapitola je věnována technicko-ekonomickému vyhodnocení výroby.

### Klíčová slova

Frézování, soustružení, CAD/CAM, CNC, ShopTurn, PowerMILL, slitiny hliníku, formule.

## ABSTRACT

This master's thesis deals with design and machining of the flange hub rear wheel of the formula by using CAD/CAM technology and CNC workshop programming. The introductory part provides theoretical description and characteristic of turning and milling technology. Further work describes aluminium alloys with focus on material which was used as a blank for machined workpiece. The practical part deals with design of flange in CAD software Autodesk Inventor, design of turning strategies in system ShopTurn and design of milling strategies in software PowerMILL. The final part of this thesis specifies realization of manufacturing on CNC lathe and CNC machining center in company BOSCH DIESEL s.r.o. in Jihlava. Last chapter is focused on techno-economic aspects of manufacturing.

### Key words

Milling, turning, CAD/CAM, CNC, ShopTurn, PowerMILL, aluminium alloys, formula.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LUČANÍK, A. *Návrh a výroba příruby náboje zadního kola formule pomocí technologie CAD/CAM a dílenského CNC programování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 103 s. 3 přílohy. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma ***Návrh a výroba příruby náboje zadního kola formule pomocí technologie CAD/CAM a dílenského CNC programování*** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

-----  
Datum

-----  
Bc. Lučaník Aleš

## **Poděkování**

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi pomohly při vypracovávání diplomové práce. Dále děkuji členům týmu TU Brno Racing za jejich ochotu a dobrou spolupráci. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat panu Tesařovi, panu Křivánkovi a panu Pavlíčkovi za mnoho užitečných praktických rad a také za to, že mi bylo umožněno realizovat praktickou část mé diplomové práce v prostorách školicího střediska firmy BOSCH DIESEL s.r.o. v Jihlavě, ve kterém jsou všichni zaměstnání.

**OBSAH**

<b>Abstrakt .....</b>	<b>4</b>
<b>Prohlášení.....</b>	<b>5</b>
<b>Poděkování.....</b>	<b>6</b>
<b>Obsah.....</b>	<b>7</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>9</b>
<b>1 Charakteristika obráběcích technologií.....</b>	<b>10</b>
1.1 Charakteristika technologie soustružení.....	10
1.1.1 Kinematika soustružení.....	10
1.1.2 Řezné síly .....	12
1.1.3 Jednotkový strojní čas.....	14
1.1.4 Soustružnické nože.....	15
1.1.5 Soustruhy.....	18
1.1.6 Upínání nástrojů.....	20
1.1.7 Upínání obrobků.....	21
1.2 Charakteristika technologie frézování.....	22
1.2.1 Kinematika frézování.....	22
1.2.2 Řezné síly .....	25
1.2.3 Jednotkový strojní čas.....	27
1.2.4 Frézovací nástroje.....	28
1.2.5 Frézovací stroje.....	31
1.2.6 Upínání nástrojů a obrobků.....	32
<b>2 Rozbor obráběného materiálu.....</b>	<b>36</b>
2.1 Hliník .....	36
2.2 Slitiny hliníku.....	36
2.2.1 Slitiny hliníku pro odlitky.....	37
2.2.2 Slitiny hliníku pro tváření .....	39
2.2.3 Označování slitin hliníku .....	42
2.2.4 Tepelné zpracování hliníkových slitin.....	43
2.2.5 Obrobitelnost hliníkových slitin .....	44
2.2.6 Certal .....	46
<b>3 Konstrukce prototypu příruby náboje zadního kola Formule a návrh obráběcích strategií.....</b>	<b>47</b>
3.1 Konstrukce příruby náboje zadního kola .....	48
3.2 Návrh obráběcích strategií.....	52
3.2.1 Návrh soustružnických strategií .....	52

3.2.1.1	System ShopTurn .....	53
3.2.1.2	Tvorba NC programu v systému ShopTurn.....	54
3.2.2	Návrh frézovacích strategií .....	61
3.2.2.1	System PowerMILL .....	63
3.2.2.2	Návrh frézovacích strategií v systému PowerMILL .....	64
<b>4</b>	<b>Výroba příruby náboje zadního kola formule .....</b>	<b>75</b>
4.1	Popis strojů.....	75
4.2	Popis výroby příruby náboje zadního kola formulového vozu.....	77
4.2.1	Popis výroby na CNC soustruhu .....	77
4.2.2	Popis výroby na CNC obráběcím centru .....	81
<b>5</b>	<b>Technicko-ekonomické zhodnocení .....</b>	<b>87</b>
5.1	Jednotkový čas CNC stroje .....	87
5.2	Výrobní náklady.....	88
<b>Závěr</b>	.....	<b>93</b>
<b>Seznam použitých zdrojů</b>	.....	<b>95</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	.....	<b>100</b>
<b>Seznam příloh</b>	.....	<b>103</b>

## ÚVOD

Hlavním účelem této diplomové práce je tvorba NC programů spojená s návrhem technologie výroby reálné součásti náboje příruby zadního kola formulového vozu. Při zpracovávání práce byly aplikovány moderní CAD/CAM technologie, přičemž počítačová podpora doprovázela celý proces od návrhu součásti až po samotnou realizaci výroby.

Toto téma bylo zvoleno na základě projektu Formula Student, kterého se účastní tým TU Brno Racing, jehož členskou základnu tvoří zejména studenti z Ústavu automobilního a dopravního inženýrství Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Cílem tohoto projektu je konstrukce jednomístného závodního vozidla, které musí splňovat podmínky zahrnující dobrou ovladatelnost, výkonnost, spolehlivost a bezpečnost. Hodnotí se také estetická, ekonomická a ekologická stránka vozu. Po zkonstruování se formulový vůz účastní mezinárodních soutěží, kde soupeří s ostatními univerzitními týmy z celé Evropy<sup>1,2</sup>.

Tým TU Brno Racing reprezentuje VUT v Brně ve vrcholové úrovni soutěže Formula Student, kterou je Třída 1. Účast v této třídě je podmíněná zkonstruováním závodního vozu (od návrhu až po realizaci výroby) během časového horizontu jednoho roku. Vůz je podroben široké škále předepsaných testů a následně se účastní všech vypsanych soutěžních disciplín<sup>2</sup>.

Vzhledem k velkému množství součástí, ze kterých je formulový vůz zkonstruován a také kvůli velkému časovému presu při návrhu a výrobě jednotlivých dílů, vzešel nápad na navázání spolupráce s Ústavem strojírenské technologie. Tato spolupráce spočívala v řešení návrhu a výroby určitých součástek formule v rámci diplomové práce, čímž se mimo jiného dosáhlo i ušetření finančních prostředků týmu, které by musely být vydány na návrh obráběcích strategií a zhotovení NC programů v externích společnostech. Po vzájemné dohodě byla pro tuto diplomovou práci zvolena realizace výroby příruby náboje zadního kola, která vyžadovala aplikaci více obráběcích technologií, a proto bylo zapotřebí využít znalosti z širšího spektra technologie obrábění.

## 1 CHARAKTERISTIKA OBRÁBĚCÍCH TECHNOLOGIÍ

Technologie obrábění se řadí mezi jednu z nejdůležitějších výrobních metod strojírenské technologie. Proces obrábění je založen na specifickém silovém působení nástroje ve tvaru klínu na obráběný materiál, přičemž dochází k oddělování částic obráběného materiálu ve formě třísek. Rozmach technologie obrábění, jakožto produktivní metody výroby, nastal v období průmyslové revoluce, která probíhala v 18. a 19. století. Bez ohledu na produktivitu sahají počátky této technologie ještě daleko před průmyslovou revolucí, kdy byla využívána u mnoha řemeslnických operací. S technickým pokrokem se její vývoj stále zrychluje a technologie obrábění je stále nejrozšířenější metodou zpracování hutních polotovarů. Mezi nejfrekventovanější operace technologie obrábění patří soustružení a frézování, které budou podrobněji rozebrány v následujících kapitolách<sup>3,4</sup>.

### 1.1 Charakteristika technologie soustružení

Soustružení je obráběcí technologie, kterou se vyhotovují součásti rotačních tvarů. Nástroj je ve většině případů jednobřítý a označuje se jako soustružnický nůž. Jedná se o nejjednodušší ale zároveň i nejpoužívanější formu obrábění kovových i nekovových materiálů. Obecně lze rozdělit soustružení na vnější a vnitřní podle toho, zda se obrábějí vnější rotační plochy anebo se jedná o soustružení děr neboli vnitřních rotačních ploch. Dále existuje mnoho dalších variant soustružnických operací, jako jsou např. soustružení závitů a zápichů, upichování, tvarové soustružení a mimo vlastní soustružnické metody se v této technologii uplatňují i operace jako vrtání, vyvrtávání, vystružování, vyhrubování, vroubkování atd<sup>4,5</sup>.

#### 1.1.1 Kinematika soustružení

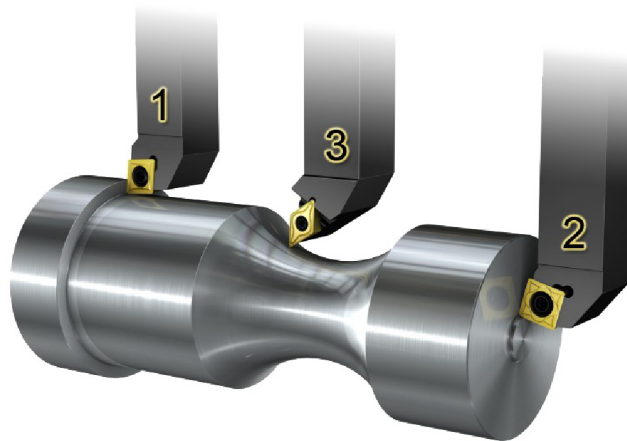
Hlavní pohyb koná obrobek a jedná se o pohyb rotační, který je charakterizován řeznou rychlostí vyjádřenou vztahem (1.1).

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [m \cdot \min^{-1}] \quad (1.1)$$

kde:  $v_c$  [ $m \cdot \min^{-1}$ ] - řezná rychlost,  
D [mm] - průměr obrobku,  
n [ $\min^{-1}$ ] - otáčky obrobku.

Vedlejší pohyb je posuvný přímočarý (popř. obecný) a je vykonáván nástrojem. Jestliže se nástroj pohybuje v axiálním směru tj. ve směru osy obrobku, jedná se o podélný posuv a naopak v radiálním směru jde o posuv příčný. Podle směru a charakteru posuvu nástroje je vhodné rozlišovat tři hlavní způsoby soustružení, jimiž jsou podélné soustružení, čelní soustružení a kopírovací (tvarové) soustružení (obr. 1.1)<sup>6</sup>.



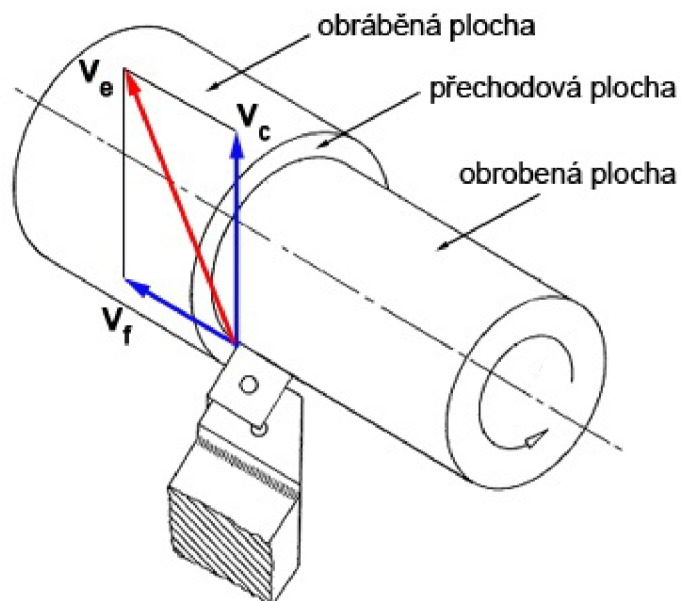


Obr 1.1 Soustružení 1) podélné, 2) čelní, 3) kopírovací<sup>6</sup>.

Posuvová rychlost je určena vztahem (1.2). Po součtu vektorů řezné rychlosti  $v_c$  a posuvové rychlosti  $v_f$  lze stanovit výslednou rychlost řezného pohybu  $v_e$ . Schéma kinematiky obráběcího procesu při podélném soustružení je znázorněno na obr. 1.2<sup>5</sup>.

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} \quad [m \cdot \min^{-1}] \quad (1.2)$$

kde:  $v_f$  [ $m \cdot \min^{-1}$ ] - posuvová rychlost,  
 $f$  [mm] - posuv na otáčku obrobku,  
 $n$  [ $\min^{-1}$ ] - otáčky obrobku.



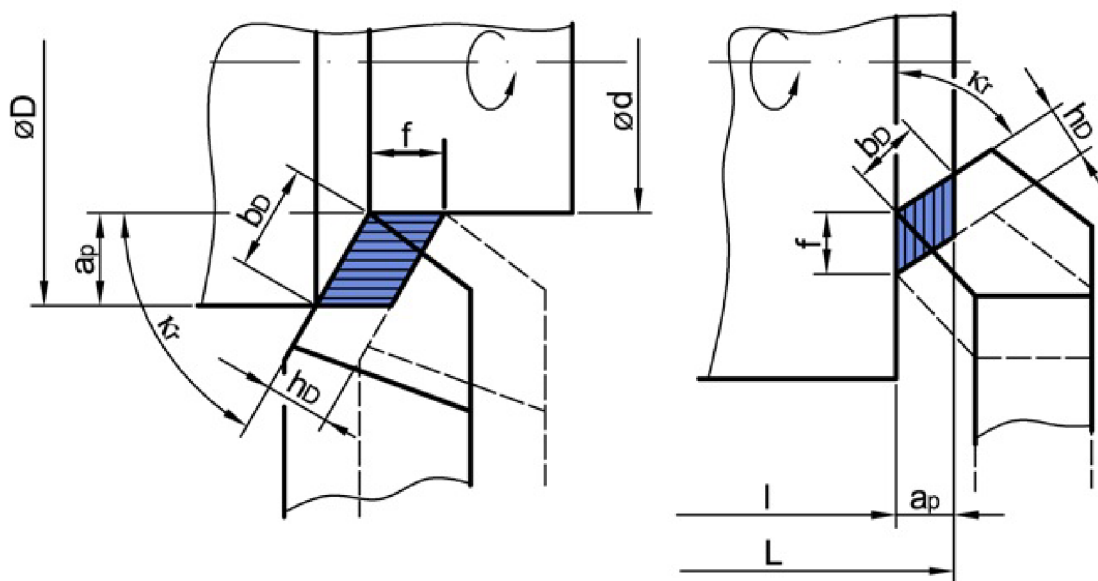
Obr 1.2 Kinematické schéma podélného soustružení<sup>7</sup>.

Celkový řezný pohyb je v případě soustružení válcové plochy realizován po šroubovici. Při čelním soustružení řezný pohyb kopíruje Archimédovu spirálu a při soustružení obecného tvaru se jedná o trajektorii obecné prostorové křivky<sup>5</sup>.

Odřezávaná vrstva materiálu v procesu obrábění se nazývá třísky. Pro optimalizaci obrábění je důležité znát její rozměry a zejména průřez, díky kterému lze vypočítat výsledné silové zatížení nástroje. Jmenovitý průřez třísky  $A_D$  se stanoví podle vztahu (1.3)<sup>8</sup>. Identifikace rozměrů průřezu třísky pro podélné a čelní soustružení je uvedena na obr. 1.3.

$$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot f \quad [mm^2] \quad (1.3)$$

- kde:  $A_D$  [ $mm^2$ ] - jmenovitý průřez třísky,  
 $b_D$  [mm] - jmenovitá šířka třísky,  
 $h_D$  [mm] - jmenovitá tloušťka třísky,  
 $a_p$  [mm] - šířka záběru hlavního ostří,  
 $f$  [mm] - posuv na otáčku obrobku.



Obr 1.3 Identifikace průřezu třísky při soustružení<sup>8</sup>.  
a) válcová plocha, b) čelní plocha.

### 1.1.2 Řezné síly

Řezné síly uskutečňují separaci třísek z obráběného materiálu a jejich následné odstranění a lámání<sup>7</sup>. V obráběcím procesu jsou řezné síly limitujícím prvkem, protože ovlivňují spotřebu energie. S rostoucí řeznou silou roste i řezný výkon a použitelný výkon obráběcího stroje je vždy omezen. Vysoké řezné síly dále způsobují větší deformace řezných nástrojů a obrobků, což má za následek vznik vibrací,

pokles výrobní přesnosti a v neposlední řadě zkrácení životnosti nástroje (lom břitu). Je tedy důležité najít optimální podmínky obráběcího procesu, které udrží rovnováhu mezi hospodárností výroby a nízkými řeznými silami<sup>9</sup>.

Nástroj působí na obrobek tzv. celkovou řeznou silou  $F$ , která se skládá ze tří složek - řezná síla  $F_c$ , posuvová síla  $F_f$  a pasivní síla  $F_p$  (viz obr. 1.4). Tyto síly vyvolávají zákonitě reakci, čímž vznikají řezné odpory neboli síly, jimiž zpětně působí obrobek na nástroj. Při obrábění musí být řezné odpory menší než řezné síly. Celková řezná síla a její jednotlivé složky se stanoví pomocí následujících vztahů<sup>8</sup>:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [N] \quad (1.4)$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [N] \quad (1.5)$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad [N] \quad (1.6)$$

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [N] \quad (1.7)$$

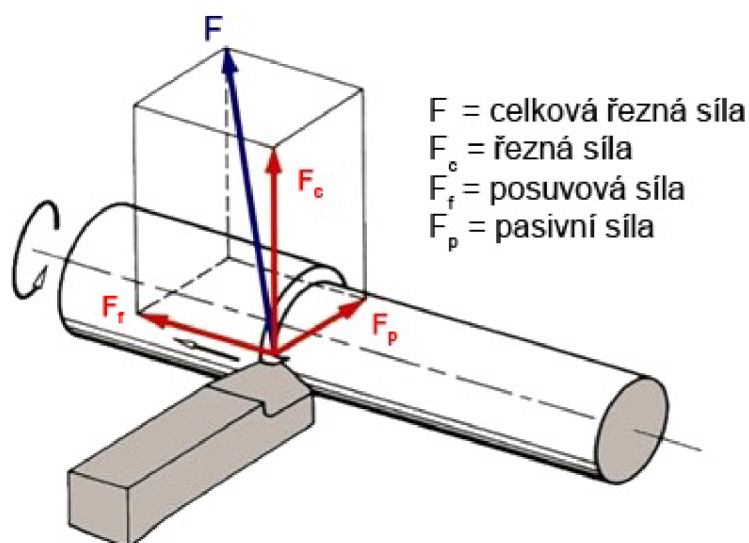
kde:  $C_{Fc}$ ,  $C_{Ff}$ ,  $C_{Fp}$  [-] - konstanty vyjadřující vliv obráběného materiálu,

$x_{Fc}$ ,  $x_{Ff}$ ,  $x_{Fp}$  [-] - exponenty vlivu  $a_p$ ,

$y_{Fc}$ ,  $y_{Ff}$ ,  $y_{Fp}$  [-] - exponenty vlivu  $f$ ,

$a_p$  [mm] - šířka záběru hlavního ostří,

$f$  [mm] - posuv na otáčku obrobku.



Obr. 1.4 Řezné síly<sup>9</sup>.

Řezná sílu lze dále stanovit pomocí měrné řezné síly  $k_c$  a ostatní složky celkové řezné síly se následně určí ve vhodném poměru k  $F_c$ . Měrná řezná síla je definovaná jako poměr řezné síly  $F_c$  a plochy jmenovitého průřezu třísky  $A_D$ <sup>8</sup>:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad [MPa] \quad (1.8)$$

kde:  $F_c$  [N] - řezná síla,  
 $A_D$  [mm<sup>2</sup>] - jmenovitý průřez třísky.

Hodnota Měrné řezné síly je závislá na mnoha technologických faktorech, jako jsou pevnost a tvrdost obráběného materiálu, jmenovitá tloušťka třísky, geometrie břitu atd.<sup>5</sup>.

Řezná síla společně s řeznou rychlostí určují řezný výkon  $P_c$  určený vztahem (1.9). Řezný výkon vyjadřuje výkon na vřetenu stroje (někdy označovaný jako efektivní či užitečný výkon). Výkon elektromotoru obráběcího stroje  $P_m$  musí být vyšší než řezný výkon, protože mezi elektromotorem a vřetenem stroje vznikají mechanické ztráty, které zohledňuje veličina  $\eta_m$ , tj. mechanická účinnost obráběcího stroje (viz vztah 1.10)<sup>5</sup>.

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60} \quad [W] \quad (1.9)$$

$$P_m = \frac{P_c}{\eta_m} \quad [W] \quad (1.10)$$

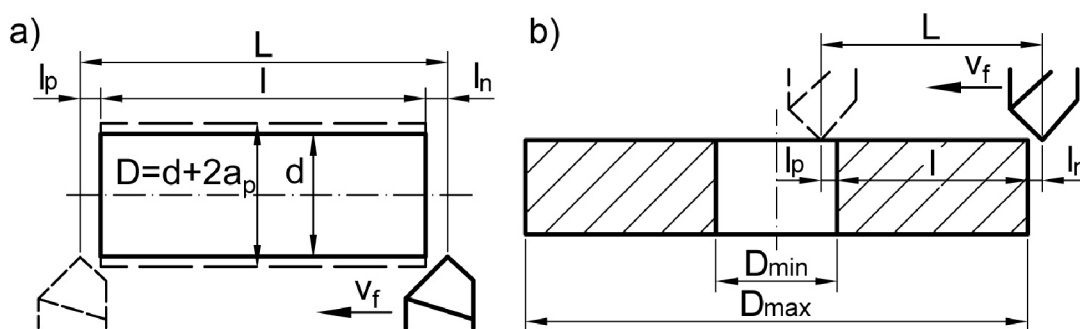
kde:  $F_c$  [N] - řezná síla,  
 $v_c$  [m.min<sup>-1</sup>] - řezná rychlost,  
 $\eta_m$  [-] - mechanická účinnost obráběcího stroje.

### 1.1.3 Jednotkový strojní čas

Jednotkový strojní čas je jedna z nejdůležitějších veličin při optimalizaci obráběcího procesu, která má přímý vliv na hospodárnost výroby. K určení hodnoty jednotkového strojního času  $t_{AS}$  se vychází z charakteristických rozměrů zobrazených na obr. 1.5<sup>10</sup>. Pro podélné soustružení čelní plochy platí vztah<sup>10</sup>:

$$t_{AS} = \frac{L}{n \cdot f} \quad [min] \quad (1.11)$$

kde:  $L$  [mm] - dráha nástroje ve směru posuvu,  
 $n$  [min<sup>-1</sup>] - otáčky obrobku,  
 $f$  [mm] - posuv na otáčku obrobku.



Obr. 1.5 Určení jednotkového strojního času<sup>10</sup>.  
a) podélné soustružení, b) čelní soustružení.

Dráha nástroje ve směru posuvu  $L$  je určena součtem dílčích složek<sup>10</sup>:

$$L = l + l_n + l_p \text{ [mm]} \quad (1.12)$$

kde:  $l$  [mm] - délka soustružené plochy,  
 $l_n$  [mm] - délka náběhu,  
 $l_p$  [mm] - délka přeběhu.

V případě soustružení čelní plochy mohou nastat dva případy, kdy se rozlišuje jednotkový strojní čas obrábění při konstantních otáčkách obrobku  $t_{ASn}$  a při konstantní řezné rychlosti  $t_{ASv}$ <sup>10</sup>. V praxi je využívanější varianta obrábění s konstantní řeznou rychlostí a to z toho důvodu, aby byly zaručeny stejné řezné podmínky po celé dráze soustružení čelní plochy. Hodnota  $t_{ASv}$  se stanoví podle vzorce<sup>10</sup>:

$$t_{ASv} = \frac{\pi \cdot [(D_{max} + 2l_n)^2 - (D_{min} - 2l_p)^2]}{4 \cdot 10^3 \cdot v_c \cdot f} \text{ [min]} \quad (1.13)$$

kde:  $D_{max}$  [mm] - maximální průměr soustružené čelní plochy,  
 $D_{min}$  [mm] - minimální průměr soustružené čelní plochy.

#### 1.1.4 Soustružnické nože

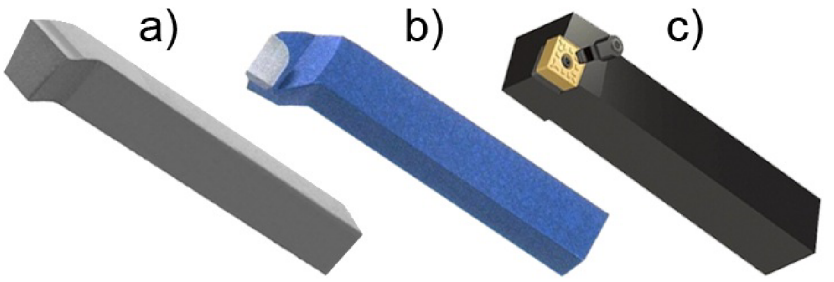
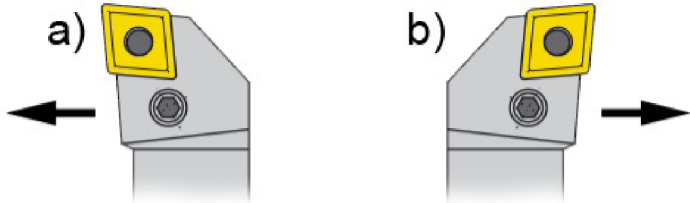
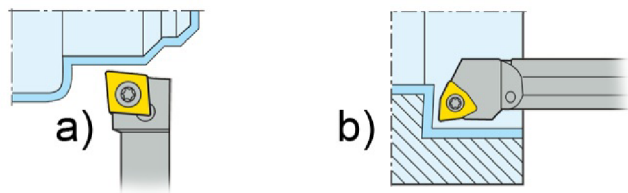
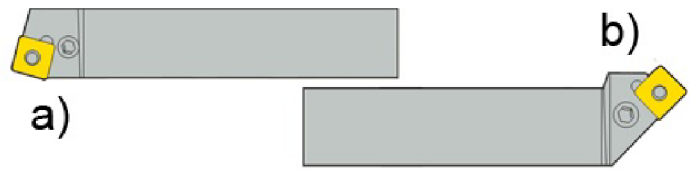
Nejčastěji používaným soustružnickým nástrojem jsou soustružnické nože. Kromě nožů lze na soustruhu aplikovat i jiné řezné nástroje jako jsou vrtáky, výstružníky, výhružníky, závitníky, vyvrtávací tyče atd. Existuje mnoho druhů soustružnických nožů, které jsou děleny podle různých hledisek a aspektů. Podle nástrojového materiálu se rozlišují nože z nástrojové oceli, slinutých karbidů, cermetů, řezné keramiky, PKNB a PKD. Z nástrojové oceli se vyrábějí nože celistvé. Ostatní modernější a výkonnější řezné materiály jsou aplikovány ve formě vyměnitelných břitových destiček (VBD), zatímco tělo nože je z konstrukční oceli.

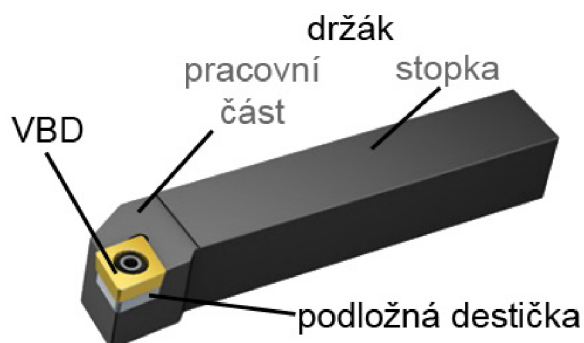
Dle technologického hlediska se nože dělí na<sup>11</sup>:

- radiální,
- prizmatické,
- kotoučové,
- tangenciální.

Nejfrekventovanější skupinou jsou radiální nože, které lze dělit podle konstrukce, směru posuvového pohybu, způsobu obrábění, tvaru tělesa nože a charakteru soustružnické operace (viz tabulka 1.1). Prizmatické, kotoučové a tangenciální nože se používají nejčastěji jako nože tvarové. Požadovaného tvaru je dosaženo pomocí specifického výbrusu na hřbetu řezné části nástroje.

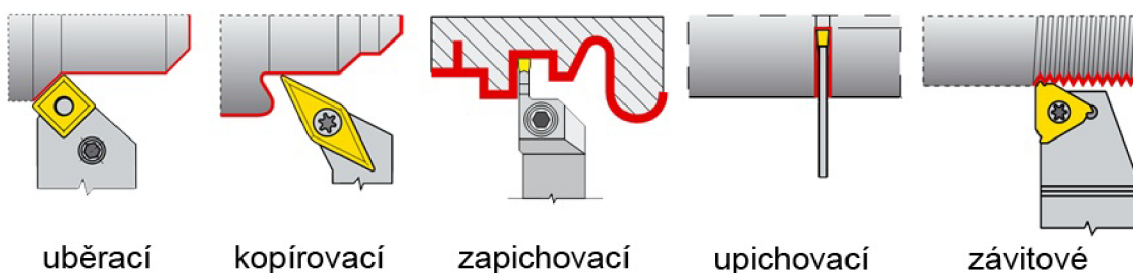
Tab. 1.1 Základní rozdělení radiálních soustružnických nožů<sup>11, 5, 12, 13, 14</sup>.

<b>Rozdělení radiálních nožů</b>	
podle konstrukce	
a) celistvé	
b) s pájenými břity	
c) s VBD	
podle směru posuvového pohybu	
a) pravé	
b) levé	
podle způsobu obrábění	
a) vnější	
b) vnitřní	
podle tvaru tělesa nože	
a) přímé	
b) ohnuté	



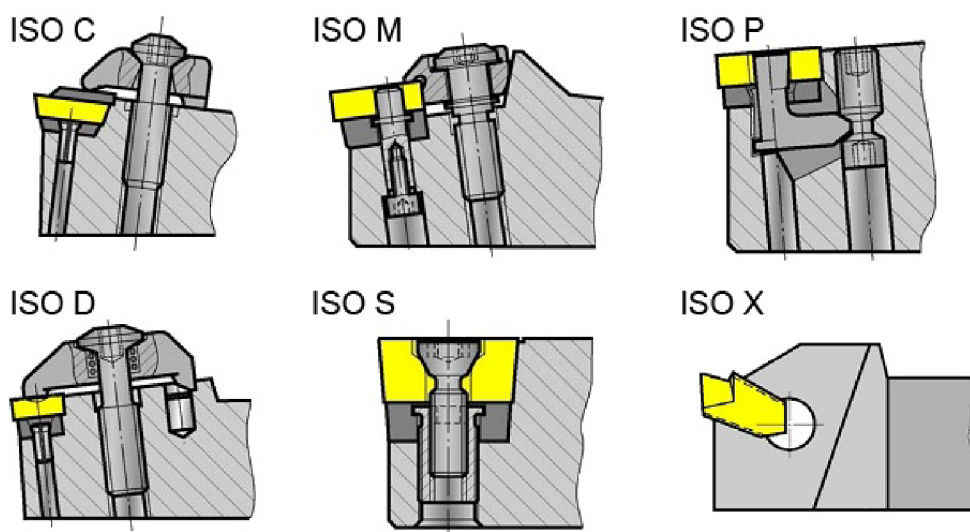
Obr. 1.6 Konstrukce radiálního soustružnického nože<sup>5,13</sup>.

Popis konstrukce radiálního nože je popsán na obr. 1.6. Podle charakteru soustružnické operace můžeme vnější a vnitřní soustružnické nože dále dělit na uběrací, zapichovací, upichovací, kopírovací, závitové a tvarové (viz obr. 1.7)<sup>11</sup>.



Obr. 1.7 Druhy soustružnických nožů<sup>12</sup>.

Na obrázku 1.8 jsou uvedeny různé systémy upínání vyměnitelných břitových destiček (VBD) k soustružnickému noži.



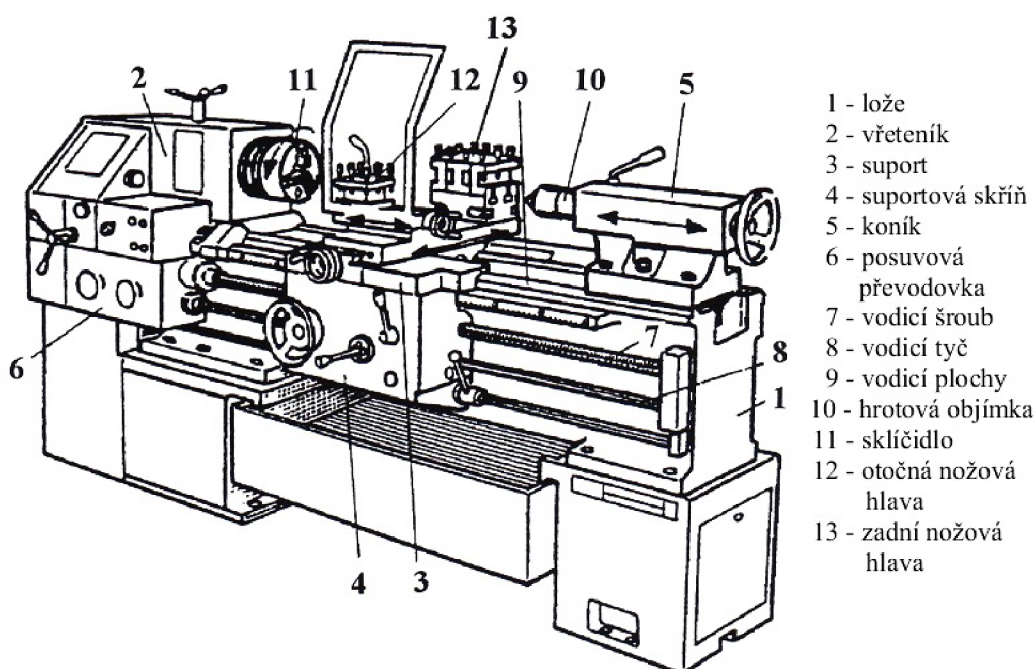
Obr 1.8 Systémy upínání vyměnitelných břitových destiček<sup>8</sup>.



### 1.1.5 Soustruhy

Soustružnické stroje mají v rámci obráběcích strojů nejširší zastoupení v obráběcích provozech strojírenských podniků. Podle konstrukčního hlediska je lze dělit na hrotové, revolverové, svislé a speciální. Další rozdělení může být podle stupně automatizace, kde se rozlišují soustruhy ručně ovládané, poloautomatické a automatické<sup>5</sup>.

Hrotové soustruhy mohou být univerzální (obr. 1.9) a jednoduché. Používají se v kusové a malosériové výrobě. Lze na nich obrábět vnější a vnitřní rotační plochy, rovinné plochy čelní, řezat závit, soustružit kuželové, popř. tvarové plochy. Soustružnické nože bývají nejčastěji upnuty v rotačních nástrojových hlavách, kde lze upnout až 4 nože<sup>5,11</sup>.



Obr. 1.9 Univerzální hrotový soustruh<sup>11</sup>.

Revolverové soustruhy jsou určeny pro výrobu dílců středních sérií, kdy je zapotřebí využít větší počet nástrojů k obrobení jednoho dílu. Nástroje jsou uloženy v držácích a upnuty do upínacích otvorů revolverové hlavy. Oproti hrotovým mají revolverové soustruhy výhodu rychlejšího a přesnějšího polohování nástroje vůči obrobku a mohou obrábět několika nástroji najednou. Nástrojové revolverové hlavy mohou rotovat podle horizontální či vodorovné osy<sup>5</sup>.

Svislé soustruhy se používají pro různě velké série středních a velkých rotačních součástí. Svislé soustruhy pro rozměrné rotační součásti se nazývají karusely. Hlavní částí těchto strojů je otočný stůl, stojany a příčníky se suporty. Karusely bývají dvoustožanové, což umožňuje obrábět několika nástroji najednou<sup>5</sup>.

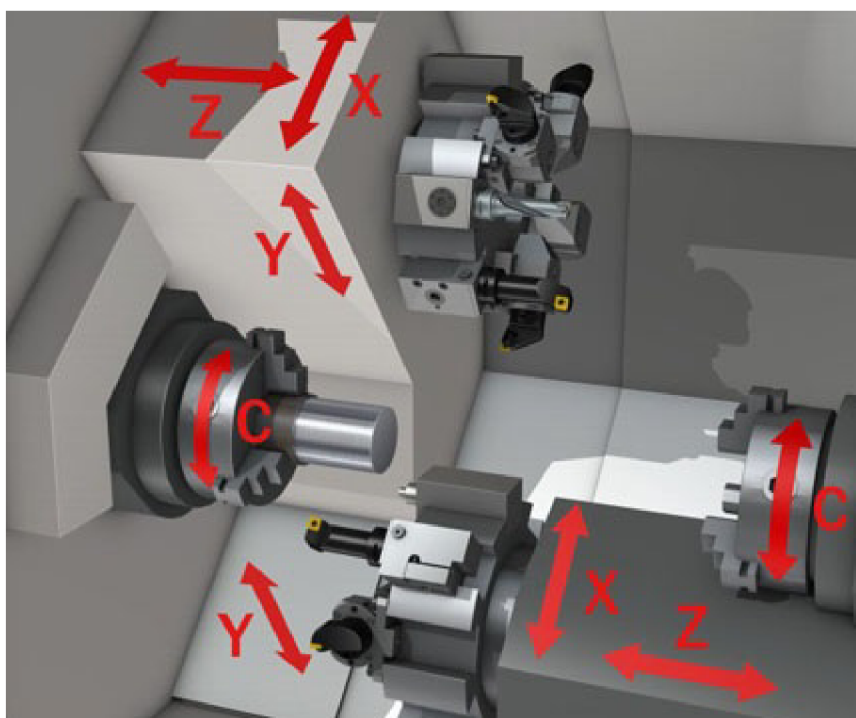
Další skupinou jsou poloautomatické a automatické soustruhy s tvrdou či pružnou automatizací pracovního cyklu. Tvrdá automatizace představuje např. programování pomocí děrných štítků, které se již v současné době době CNC programování (pružná automatizace) nepoužívá. Poloautomatické soustruhy mají automatizova-



ný pracovní cyklus, ale k opakování cyklu je nutný ruční zásah obsluhy. U automatických soustruhů probíhá i výměna obrobků automaticky. Automatické a poloautomatické soustruhy lze rozdělit podle<sup>5</sup>:

- aplikovaného řízení (křivkové, bezkřivkové, CNC),
- konstrukčního uspořádání (revolverové, podélné, tvarové),
- počtu vřeten (jednovřetenové, několikavřetenové).

Navíc jsou vybaveny širokou škálou příslušenství umožňující obrobení součástí včetně nesoustružnických operací (frézování drážek, radiální vrtání apod.) Soustruh vybavený několika vřeteny a suporty s možností aplikace poháněných nástrojů, primárně určený k provádění různých operací na jedno upnutí, se nazývá soustružnické obráběcí centrum (obr. 1.10)<sup>5,8</sup>.

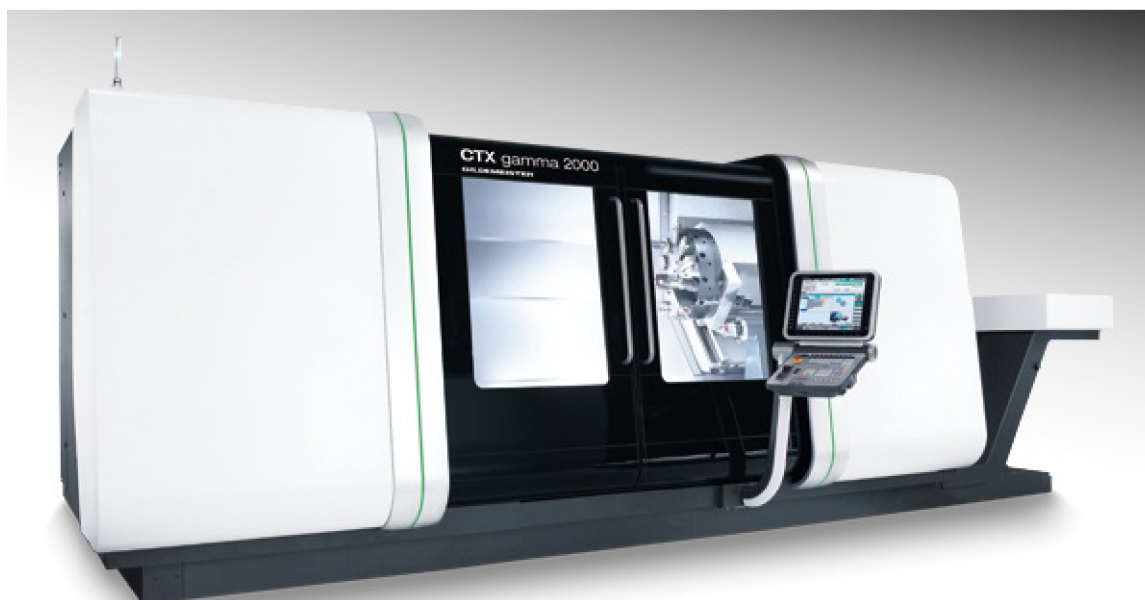


Obr. 1.10 Soustružnické obráběcí centrum s vyznačenými pracovními osami<sup>13</sup>.

Základní technické parametry soustružnického stroje jsou<sup>15</sup>:

- pracovní oblast (max. rozměry obrobku, rozsahy posuvů),
- vřetena (počet, rozsah otáček, výkon, krouticí moment),
- suporty (počet, posuvový rozsah, posuvová rychlost),
- nástrojová hlava (typ, počet pozic statických / hnaných, max. zdvih),
- koník (délka posuvu, přítlačná síla),
- obecné (příkon, rozměry a hmotnost stroje).

V současné době je kromě technických parametrů kladen důraz i na estetickou stránku tj. na design stroje. Dobře je to patrné např. u CNC obráběcích strojů firmy DMG Mori Seiki (obr. 1.11), kde se už jen velice obtížně hledá podobnost se staršími typy strojů, jako je např. hrotový soustruh (obr. 1.9).

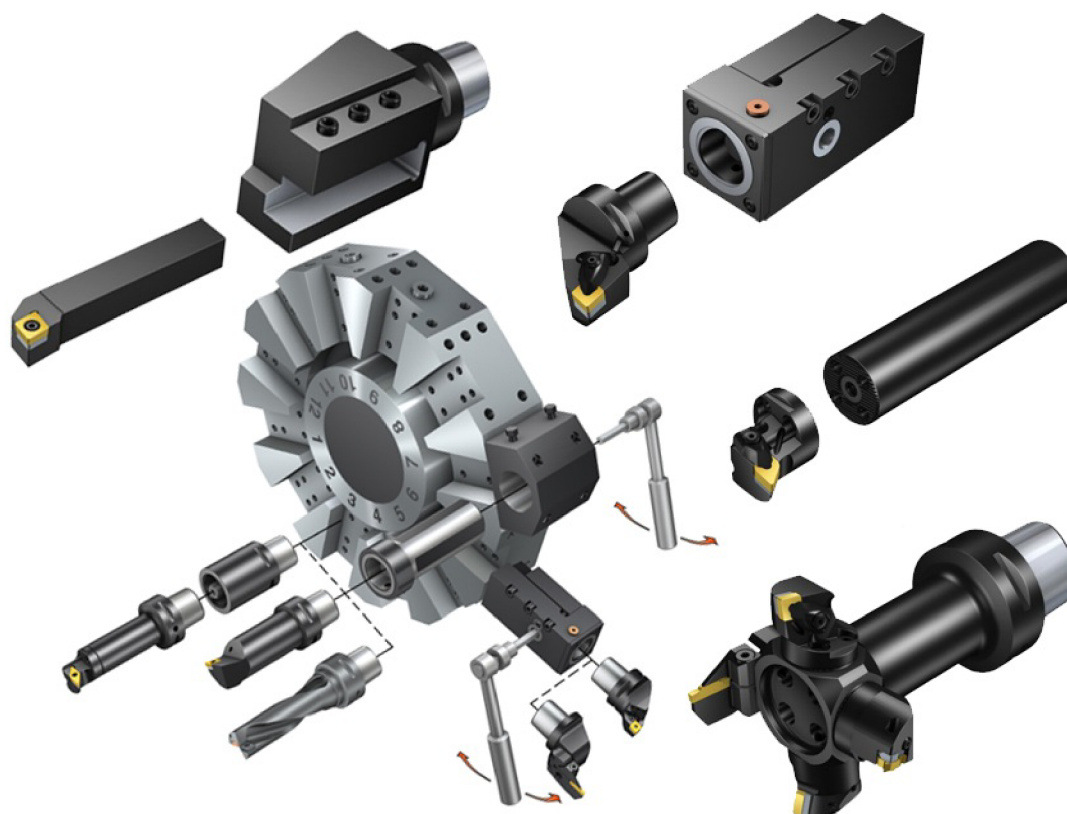


Obr. 1.11 CNC soustružnické centrum firmy DMG Mori Seiki<sup>15</sup>.

### 1.1.6 Upínání nástrojů

Upnutí soustružnických nástrojů musí být jednoznačné a spolehlivé. Kvůli namáhání nástroje by mělo být vyložení co nejmenší. Soustružnické nože se upínají do různých upínek nebo otočných nožových hlav, které se využívají spíše u konvenčních strojů, jako jsou univerzální hrotové soustruhy. U revolverových a automatických soustruhů se aplikuje upnutí do speciálních držáků umístěných v revolverových hlavách. CNC soustruhy a soustružnická obráběcí centra mají nástroje upnuté ve speciálních držácích řešených tak, že seřízení nástroje proběhne mimo stroj v seřizovacím přístroji a předseřazený nástroj se následně vkládá do zásobníku nástrojů, odkud se aplikuje pro obráběcí proces<sup>5,8</sup>.

Kromě klasických stopkových soustružnických nožů výrobci nástrojů postupně vyvíjí různá vylepšující řešení pro zajištění snadnějšího, rychlejšího a přesnějšího upnutí nástroje. Jedná se např. o modulární nástrojové systémy, kdy jsou menší nástrojové hlavice upnuty v upínací jednotce, která je vyměnitelně uložena v revolverové nástrojové hlavě. Tento systém se využívá u CNC soustruhů a zejména u CNC obráběcích center. Existují i adaptéry, které umožňují upnutí konvenčních stopkových soustružnických nožů do těchto modulárních systémů. Na obrázku 1.12 je zobrazena ukázka modulárního nástrojového systému Coromant Capto firmy Sandvik Coromant, kde jsou znázorněny i různá řešení upnutí nástrojových hlavic.



Obr. 1.12 Modulární systém Coromant Capto firmy Sandvik Coromant<sup>13</sup>.

### 1.1.7 Upínání obrobků

Zásady pro upínání obrobku jsou spolehlivost upnutí, tuhost a zajištění jednoznačné polohy obrobku vzhledem k funkčním částem obráběcího stroje. Způsob upnutí obrobku závisí na jeho tvaru, hmotnosti, požadované tvarové přesnosti a také na druhu stroje tj. soustruhu. Nejpoužívanější upínací zařízení pro soustružnické operace je univerzální sklíčidlo, jehož 3 (popř. 4) upínací čelisti se současně soustředně posouvají k ose sklíčidla<sup>5,8,11</sup>.

Obrobky s poměrem délky ku průměru větším než 2 až 3 jsou upínány mezi hroty, které jsou zasazeny na čele obrobku do předvrtaných středících důlků. Ve vřetenu bývá pevný hrot a na druhé straně v koníku se používá hrot otočný. Krouticí moment se přenáší na obrobek unášecí deskou a srdcem, popř. unášecím hrotem. Delší obrobky se dále mohou upínat tak, že se opírají jedním koncem o hrot koníku a druhým koncem jsou upnuty ve sklíčidle. Aby se zabránilo prohnutí, je možné upnutou štíhlou tyč podepřít ještě pevnou či posuvnou lunetou<sup>5,8</sup>.

Obrobky nepravidelných či komplikovaných tvarů se mohou upínat na univerzální upínací desku se samostatně stavitelnými upínacími čelistmi. Tyče malých průměrů se upínají do kleštin, kde je materiál upnut díky vtahování podélně dělené vnitřní části kleštiny do kuželové dutiny pouzdra<sup>5</sup>.

Upínací síla obecně všech upínacích prvků, které se vyskytují na obráběcích strojích je vyvinuta buď ručně, pneumaticky, hydraulicky nebo elektricky<sup>5</sup>.

## 1.2 Charakteristika technologie frézování

Frézování je metoda obrábění, při níž je materiál obrobku odebrán vícebřitým nástrojem označovaným jako fréza. Frézovací proces je přerušovaný, tj. každý zub frézy odebrává krátké třísky proměnné tloušťky. Jedná se o velice univerzální metodu obrábění, kterou lze zhotovovat jak rovinné, tak i tvarově velice komplikované plochy (lopatky turbín, vstřikovací formy, atd.)<sup>4,5</sup>.

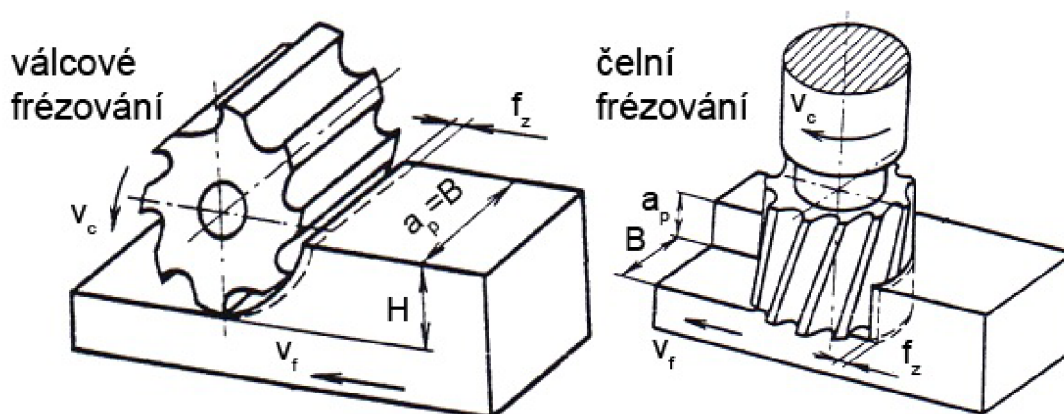
### 1.2.1 Kinematika frézování

Hlavní řezný pohyb koná nástroj rotující kolem své osy. Vedlejší neboli posuvový pohyb koná obrobek. Dříve se posuvový pohyb realizoval jen jako posloupnost přímočarých pohybů většinou kolmých k ose nástroje. U moderních obráběcích strojů jsou posuvové pohyby realizovatelné ve všech možných směrech a jsou plynule měnitelné. Hlavní řezný pohyb je definován řeznou rychlostí, zatímco vedlejší pohyb charakterizuje posuvová rychlost (vztahy 1.14, 1.15)<sup>3,4,5,10</sup>.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [m \cdot \min^{-1}] \quad (1.14)$$

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad [mm \cdot \min^{-1}] \quad (1.15)$$

- kde:  $v_c$  [ $m \cdot \min^{-1}$ ] - řezná rychlost,  
 $v_f$  [ $mm \cdot \min^{-1}$ ] - posuvová rychlost,  
 $D$  [mm] - průměr frézy,  
 $n$  [ $\min^{-1}$ ] - otáčky obrobku,  
 $f_z$  [mm] - posuv na zub,  
 $z$  [-] - počet zubů frézy.

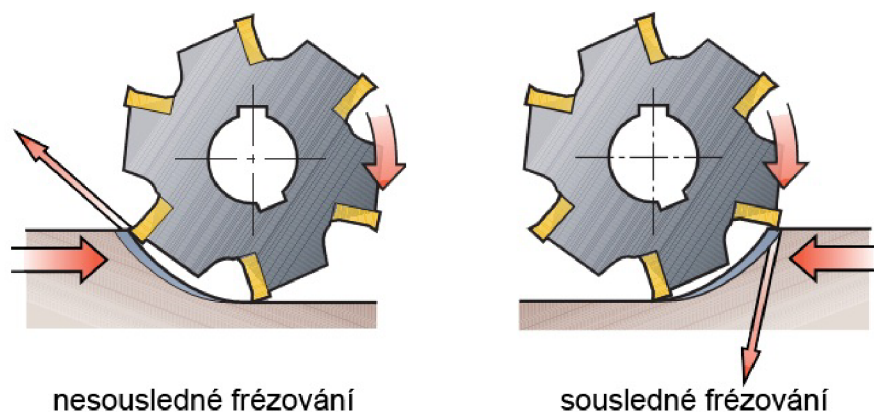


Obr 1.13 Základní způsoby frézování<sup>11</sup>.

H - hloubka odebrávané vrstvy, B - šířka frézované plochy (někdy značená  $a_e$ ).



Na obr. 1.13 jsou uvedeny dva základní způsoby frézování, kterými jsou frézování válcové (obvodem frézy) a frézování čelní (čelem frézy). U válcového frézování jsou zuby nástroje pouze na obvodu a obrobená plocha je rovnoběžná s osou rotace frézy. Vzhledem ke kinematice obráběcího procesu lze válcové frézování dále dělit na sousledné a nesousledné (viz obr. 1.14)<sup>16</sup>.



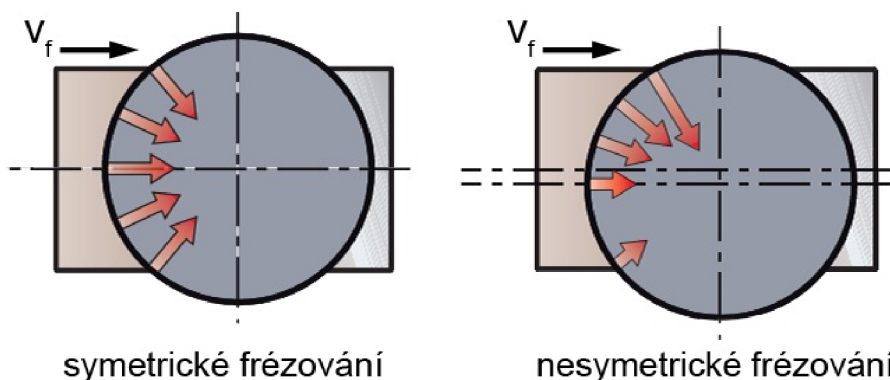
Obr. 1.14 Sousledné a nesousledné válcové frézování<sup>17</sup>.

U nesousledného frézování je směr posuvu obrobku opačný než smysl rotace nástroje. Tloušťka třísky je v počátku nulová a směrem ke konci řezu se zvyšuje až na maximum. Obrobená plocha vniká hned na začátku při vnikání zuby do obrobku. Tříška se neoddělí hned, ale až po určitém skluzu břitu po mechanicky zpevněné ploše vytvořené předchozím zubem. Kromě zvýšení řezných odporů, může tento jev vést i k tvorbě nárůstku a k zvýšenému opotřebením břitu, což má za následek snížení trvanlivosti nástroje. Navíc je obrobek řeznými silami odtahován od stolu stroje, a proto jsou zvýšeny nároky na upínací přípravek<sup>5,17</sup>.

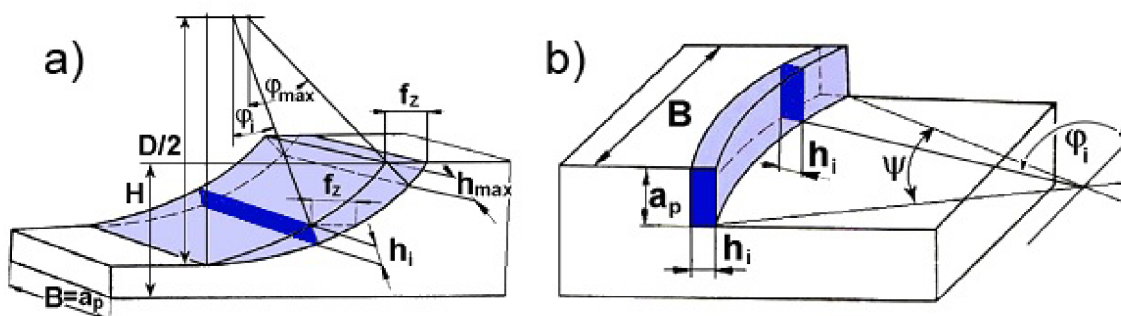
Při sousledném frézování je smysl rotace nástroje totožný s posuvem obrobku. Tloušťka třísky je v počátku řezu maximální a postupně se snižuje až na nulovou hodnotu. Obrobená plocha se vytváří při východu zuby ze záběru, aniž by docházelo ke vzájemnému tření zuby s obrobeným povrchem. To má kladný vliv na drsnost obrobeného povrchu a životnost nástroje. Řezná síla přitlačuje obrobek směrem ke stolu, a proto nejsou nutné velké upínací síly. Fréza má tendenci se nechat vtahovat do obrobku, a proto musí stroj umožňovat vymezení vůle posuvového mechanismu stolu, aby byly eliminovány zpětné pohyby. Všechny moderní obráběcí stroje jsou ale vybaveny kuličkovými posuvovými šrouby, které zvládají sousledné frézování bez problému<sup>5,17</sup>.

Z výše uvedených faktů je zřejmé, že souslednému frézování je v praxi dáována přednost všude tam, kde to stroj, přípravek a obrobek umožňují. Nesousledné frézování může být ale vhodné např. pokud se podstatně liší velikosti přídavků na obrábění (výkovky, odlitky) anebo také při aplikaci břitových destiček z keramiky, které jsou citlivé na rázy při vnikání břitu do řezu<sup>4,17</sup>.

U čelního frézování se používají zejména čelní válcové frézy, které mají břity na obvodě i čele nástroje. Proces frézování je současně sousledný i nesousledný a podle polohy osy nástroje vzhledem k obráběné ploše se rozlišuje frézování symetrické a nesymetrické (obr. 1.15)<sup>8</sup>.

Obr. 1.15 Symetrické a nesymetrické čelní frézování<sup>16</sup>.

Výpočet jmenovitého průřezu třísky je u obou způsobů frézování (válcové a čelní) komplikovanější než tomu bylo u soustružení. Jak již bylo řečeno, tloušťka třísky  $h_i$  není v průběhu řezu konstantní a je závislá na tzv. úhlu posuvového pohybu  $\varphi_i$ . Tento úhel navíc není závislý pouze na poloze řezného zubu, ale u fréz s šikmými zuby nebo zuby ve šroubovici se jeho hodnota mění i podél daného ostří. Na obrázku 1.16 jsou schematicky zobrazeny průřezy třísky u obou metod frézování. Vztah (1.16) definuje jmenovitý průřez třísky  $A_{Di}$  pro válcové frézování a vztah (1.17) pro čelní frézování. Oba vztahy platí pro frézy s přímými zuby<sup>5</sup>.

Obr. 1.16 Průřez třísky a) válcové frézování, b) čelní frézování<sup>8</sup>.

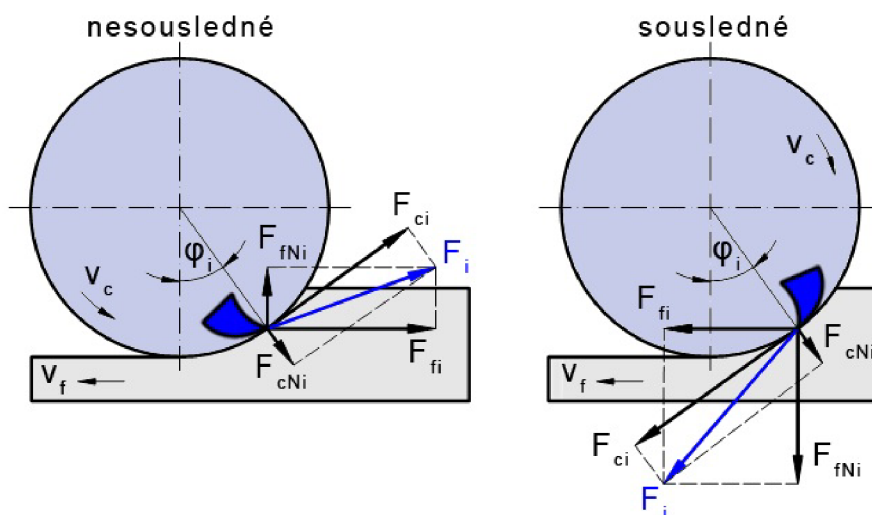
$$A_{Di} = h_i \cdot a_p = f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1.16)$$

$$A_{Di} = h_i \cdot \frac{a_p}{\sin \kappa_r} = f_z \cdot a_p \cdot \sin \varphi_i \text{ [mm}^2\text{]} \quad (1.17)$$

- kde:  $h_i$  [mm] - jmenovitá tloušťka třísky,  
 $a_p$  [mm] - šířka záběru hlavního ostří,  
 $f_z$  [mm] - posuv na zub,  
 $\varphi_i$  [°] - úhel posuvového pohybu,  
 $\kappa_r$  [°] - úhel nastavení hlavního ostří.

### 1.2.2 Řezné síly

Definice řezných sil u frézování vychází ze silových poměrů na jednom zubu nacházejícím se v poloze určené úhlem  $\varphi_i$  (viz obr. 1.17). Protože je ale při frézování v záběru několik zubů současně, je celková řezná síla  $F_c$  dána sumou dílčích celkových řezných sil  $F_{ci}$  na každém zubu v záběru<sup>5</sup>.



Obr. 1.17 Řezné síly na zubu při válcovém frézování<sup>8</sup>.

$F_i$  - celková řezná síla,  $F_{ci}$  - řezná síla,  $F_{cNi}$  - kolmá řezná síla,  
 $F_{fi}$  - posuvová síla,  $F_{fNi}$  - kolmá posuvová síla.

Celková řezná síla  $F_c$  pro válcové soustružení je definována vztahem (1.18). V případě čelního frézování přibude i závislost na úhlu nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  a poté platí vztah (1.19)<sup>5,8</sup>.

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i [N] \quad (1.18)$$

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{Fc} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{x-1} \kappa_r \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i [N] \quad (1.19)$$

kde:  $C_{Fc}$  [-] - konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu,

$x$  [-] - exponent vlivu tloušťky třísky.

Počet zubů v záběru  $n_z$  se pro válcové frézování vypočte dle vztahu<sup>5,8</sup>:

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{360} \cdot z [-] \quad (1.20)$$

kde:  $\varphi_{max}$  [°] - maximální úhel posuvového pohybu,

$z$  [-] - počet zubů (břitů) frézy.

U čelního frézování platí pro výpočet počtu zubů v záběru následující vztah<sup>5,8</sup>:

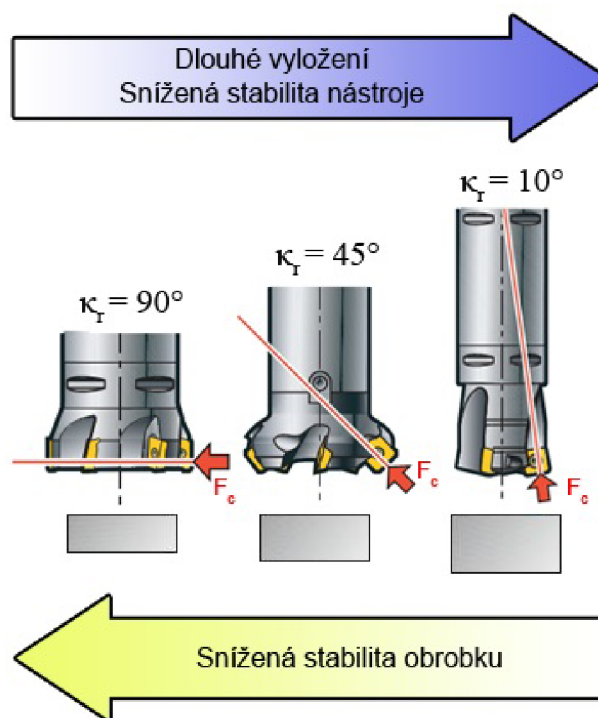
$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z [-] \quad (1.21)$$

kde:  $\psi$  [°] - úhel záběru frézy (viz obr. 1.16),

$z$  [-] - počet zubů (břitů) frézy.

Řezný výkon je možné stanovit pro známou velikost celkové řezné síly a řezné rychlosti podle vztahu (1.9), který byl zmíněn již u soustružení.

Kromě velikosti výslednice řezných sil je pro frézovací proces důležitý i její směr, na který má největší vliv úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  břitů nástroje. U fréz s  $\kappa_r = 90^\circ$  má vektor celkové řezné síly  $F_c$  radiální směr, což snižuje stabilitu obrobku a jsou potřebné vyšší upínací síly. Dále nastává problém při použití nástroje s dlouhým vyložení, protože vlivem velkých radiálních sil, dochází k jeho průhybu a ke vzniku vibrací. Pro aplikaci nástroje s dlouhým vyložení, je třeba zvolit takovou frézu, která má minimální úhel nastavení hlavního ostří. Pro stabilní řezný proces je tedy ideální, když je radiální složka co nejmenší a vektor celkové řezné síly je nasměrován proti vřetenu stroje. Nicméně frézy s  $\kappa_r = 90^\circ$  se s výhodou používají při frézování tenkostěnných součástí, které jsou choulostivé na vibrace nástroje v axiálním směru. Na obr. 1.18 je názorně zobrazen vliv úhlu nastavení hlavního ostří frézy na směr výslednice řezných sil<sup>18</sup>.

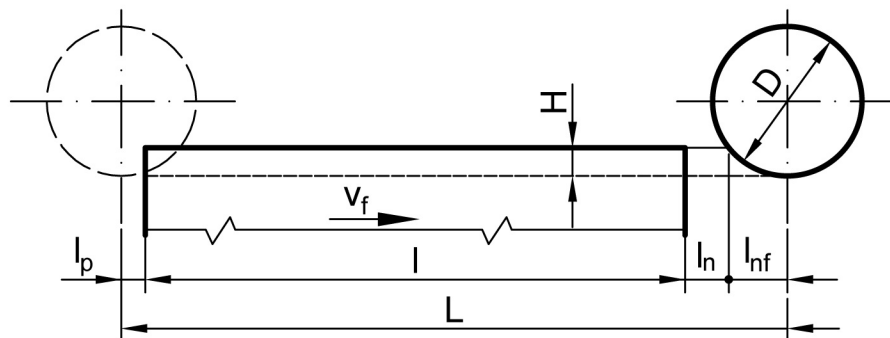


Obr. 1.18 Vliv  $\kappa_r$  na směr výslednice řezných sil<sup>18</sup>.

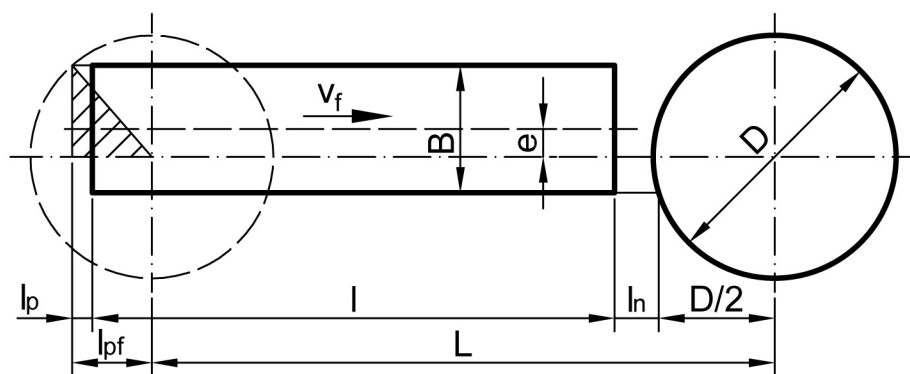


### 1.2.3 Jednotkový strojní čas

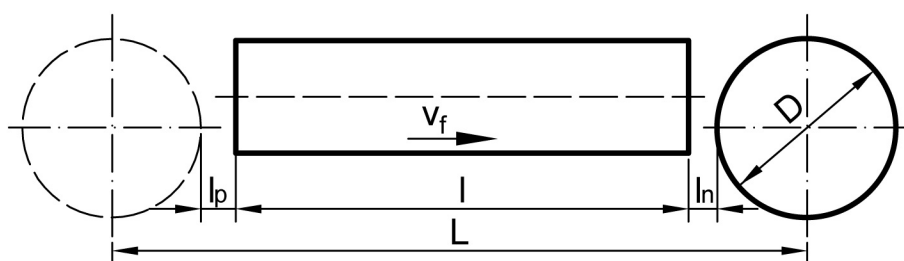
Při určení jednotkového strojního času  $t_{AS}$  pro základní typy frézování se vychází z charakteristických rozměrů definovaných na obr. 1.19<sup>5,8</sup>.



a) válcové frézování



b) čelní hrubé frézování asymetrické



c) čelní frézování načisto asymetrické

Obr. 1.19 Vyjádření dráhy frézy ve směru posuvového pohybu<sup>8</sup>.

Pro všechny typy frézování platí pro výpočet jednotkového strojního času  $t_{AS}$  vztah<sup>10</sup>:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} \quad [min] \quad (1.22)$$

kde:  $L$  [mm] - dráha nástroje ve směru posuvu,

$v_f$  [mm.min<sup>-1</sup>] - posuvová rychlost.

Hodnoty dráhy nástroje L jsou definovány pro<sup>5</sup>:

- válcové frézování (obr. 1.18a):

$$L = l + l_n + l_p + l_{nf} [mm] \quad (1.23)$$

$$l_{nf} = \sqrt{H(D - H)} [mm] \quad (1.24)$$

- čelní hrubé frézování asymetrické (obr. 1.18b):

$$L = l + l_n + l_p + \frac{D}{2} - l_{pf} [mm] \quad (1.25)$$

$$l_{pf} = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{B}{2} + e\right)^2} [mm] \quad (1.26)$$

- čelní hrubé frézování asymetrické (obr. 1.18c):

$$L = l + l_n + l_p + D [mm] \quad (1.27)$$

Význam jednotlivých členů je definován na obr. 1.18. V případě čelního symetrického frézování se do vztahu (1.26) dosadí  $e=0$ <sup>5,8</sup>.

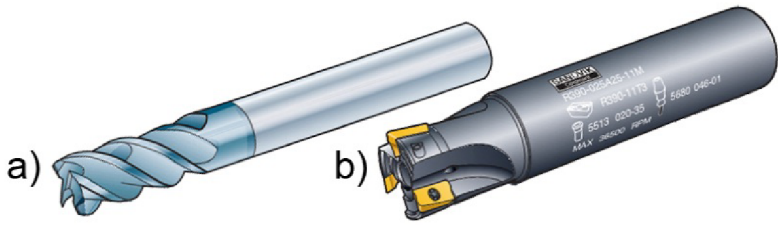
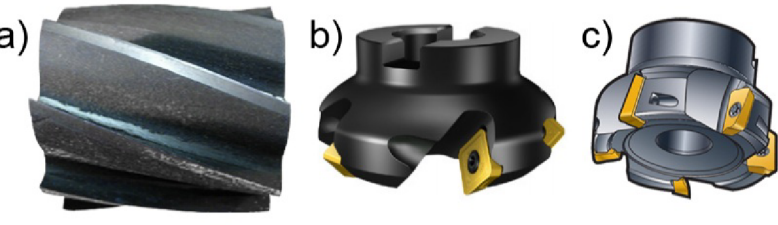

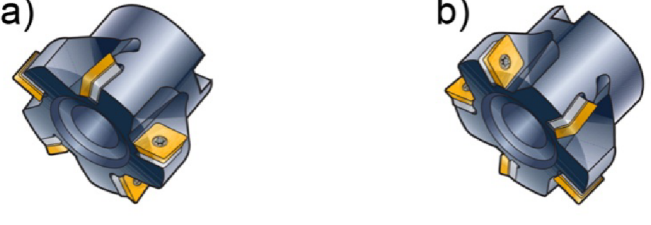
#### 1.2.4 Frézovací nástroje

Jak již bylo uvedeno, frézovací nástroje se nazývají frézy. Jsou to vícebřité nástroje, které mají břity uspořádané na válcové ploše (válcové frézy), čelní ploše (čelní frézy) nebo na válcové i čelní ploše (čelní válcové frézy). Podle nástrojového materiálu břitů lze rozlišovat mezi frézami z nástrojové oceli, slinutých karbidů, cermetů, rezné keramiky, KNB a PKD. Dalším aspektem, podle kterého lze dělit frézy je počet zubů vzhledem k průměru frézy. Podle tohoto kritéria se frézy dělí na jemnozubé, polohrubozubé a hrubozubé. Klidného chodu frézy je dosaženo za předpokladu, že jsou v řezu minimálně dva zuby současně. Na obrázku 1.20 je pro ukázkou popsána základní konstrukce stopkové frézy<sup>5,8</sup>.



Obr. 1.20 Konstrukce stopkové frézy<sup>13</sup>.

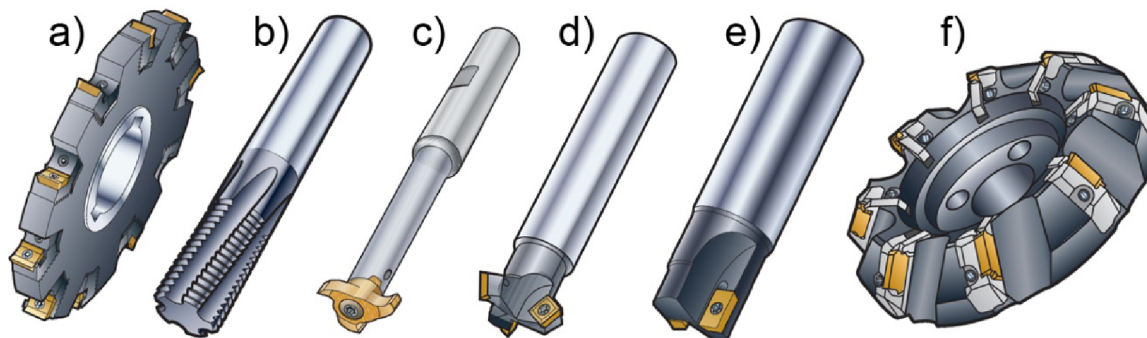
Tab. 1.2 Základní rozdělení frézovacích nástrojů<sup>5,11,13,19</sup>.

Rozdělení frézovacích nástrojů	
podle konstrukce	
a) celistvé	
b) s VBD	
podle umístění zubů	
a) válcové	
b) čelní	
c) čelní válcové	
podle způsobu upnutí	
a) nástrčné	
b) stopkové	
podle smyslu otáčení	
a) pravořezné	
b) levořezné	

V tabulce 1.2 je uvedeno základní rozdělení frézovacích nástrojů. Dále se rozlišují frézy s přímými zuby nebo se zuby ve šroubovici. Podle tvaru zubu se frézy člení na frézy s frézovanými zuby, kde čelo i hřbet tvoří rovinné plochy, a frézy s podsoustruženými zuby, u kterých hřbetní plocha tvoří část Archimédovy spirály<sup>5</sup>.

Dalším rozlišovacím prvkem je geometrický tvar pracovní části frézy. Podle tohoto aspektu se rozlišují frézy válcové, kotoučové, úhlové, drážkovací, kopírovací, rádiusové, tvarové, atd. Další skupinou jsou např. frézy závitorezné, frézy na výro-

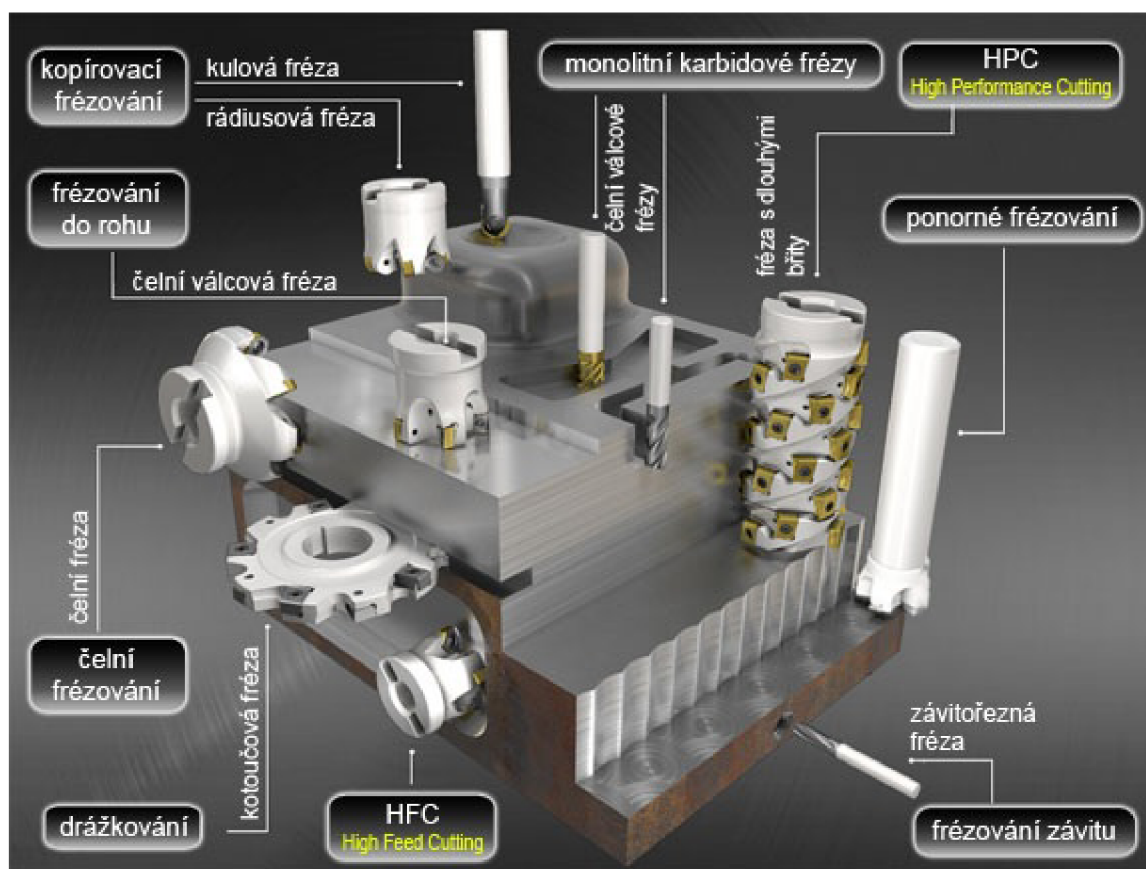
bu ozubení, frézy pro sražení hran a vrtací frézy. Frézovací hlavy jsou speciální skupinou čelních fréz, které mají vsazené a mechanicky připevněné segmenty se zuby (viz obr. 1.21)<sup>5,8</sup>.



Obr. 1.21 Ukázky frézovacích nástrojů firmy Sandvik Coromant<sup>13</sup>.

a) kotoučová, b) závitorezná, c) drážkovací, d) na sražení hran, e) vrtací, f) frézovací hlava.

Na obr. 1.22 je zobrazeno široké spektrum frézovacích nástrojů firmy ISCAR s.r.o. spolu s ukázkou jejich technologického využití.



Obr. 1.22 Frézovací nástroje firmy ISCAR s.r.o.<sup>20</sup>.

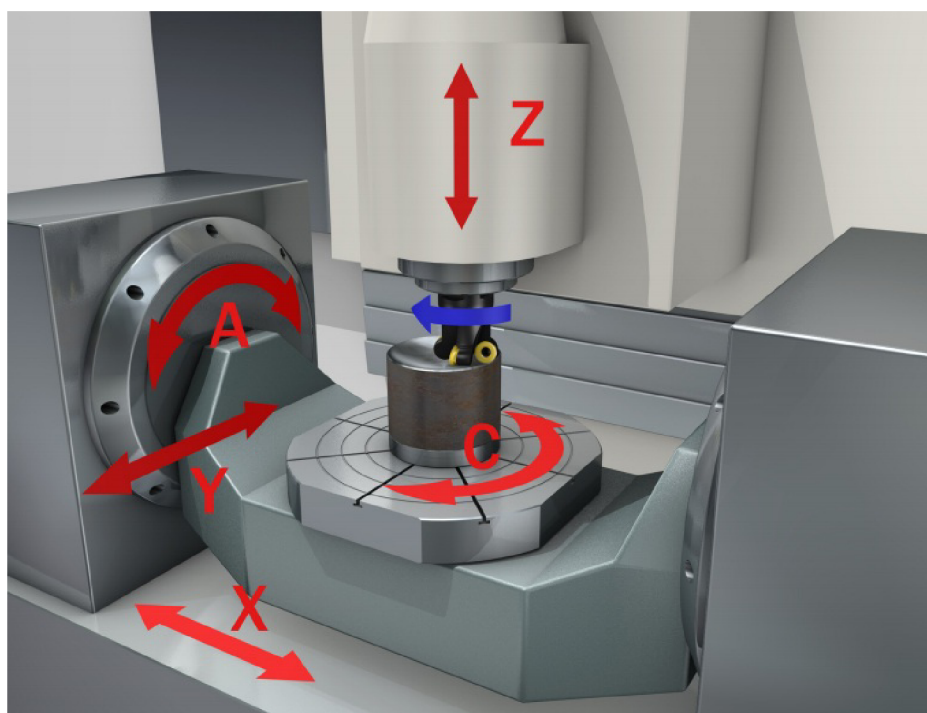
### 1.2.5 Frézovací stroje

Frézovací stroje se také označují jako frézky. Existuje mnoho druhů frézek a často jsou vybaveny rozsáhlým příslušenstvím. Podle stupně automatizace se rozlišují frézky ovládané ručně a řízené programově (tvrdá automatizace, pružná automatizace). Podle orientace osy pracovního vřetena se dále člení na svislé (vertikální) a vodorovné (horizontální). V závislosti na typu konstrukce se rozdělují do čtyř základních skupin<sup>5,8</sup>:

- konzolové,
- stolové,
- rovinné,
- speciální.

Konzolové frézky jsou charakteristické výškově přestavitelnou konzolou, která je vedená ve stojanu. Stolové frézky mají vřeteník polohovatelný ve svislém směru a jsou obvykle vybaveny podélným stolem uloženým na příčných saních. U rovinných frézek má pracovní stůl pouze jeden stupeň volnosti. Mají robustní konstrukci a jsou určeny pro obrábění těžkých a rozměrných obrobků. Speciální frézovací stroje jsou určeny pro specifické frézovací operace, jako je frézování ozubených kol či závitů<sup>5,8,11</sup>.

V současnosti se pro frézovací operace využívají zejména CNC frézky nebo CNC frézovací centra. Na obrázku 1.23 je zobrazen pracovní prostor moderního pěti-osého vertikálního CNC obráběcího centra s popisem jednotlivých pracovních os.



Obr. 1.23 Obráběcí centrum s vyznačenými pracovními osami<sup>13</sup>.



Základní technické parametry frézovacího stroje jsou<sup>21</sup>:

- pracovní oblast (rozměry stolu, rozsahy posuvů, max. parametry obrobku),
- počet pracovních os,
- vřeteno (velikost kužele, rozsah otáček, výkon, krouticí moment),
- výměna nástroje (stupeň automatizace, nástrojový zásobník, atd.),
- obecné (příkon, rozměry a hmotnost stroje).

Kromě těchto základních parametrů lze ještě obecně u všech obráběcích strojů rozeznávat různé druhy třískového hospodářství, způsob hospodaření s procesní kapalinou, typ řídicího systému CNC stroje a mnoho dalších aspektů souvisejících se stupněm automatizace stroje. Na obr. 1.24 je pro ukázkou zobrazena moderní CNC frézka firmy DMG Mori Seiki.



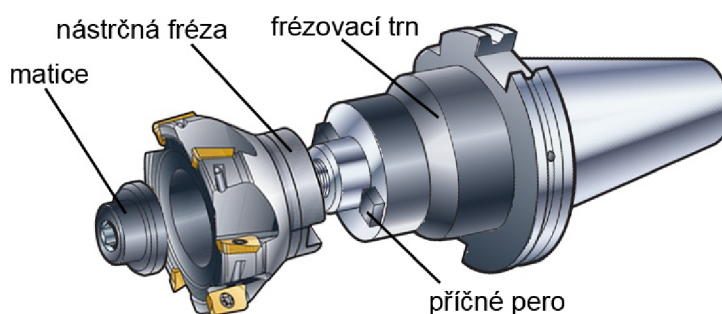
Obr. 1.24 CNC frézka firmy DMG Mori Seiki<sup>15</sup>.

### **1.2.6 Upínání nástrojů a obrobků**

Nástrojový upínač musí zajistit přesnou polohu nástroje vzhledem k souřadnému systému stroje. Dále musí i při vysokých otáčkách vřetene přenášet dostatečný krouticí moment na nástroj a překonávat tak řezné odpory. V optimálním případě má minimální rozměry, aby neomezoval přístup nástroje k obráběné ploše. Mo-

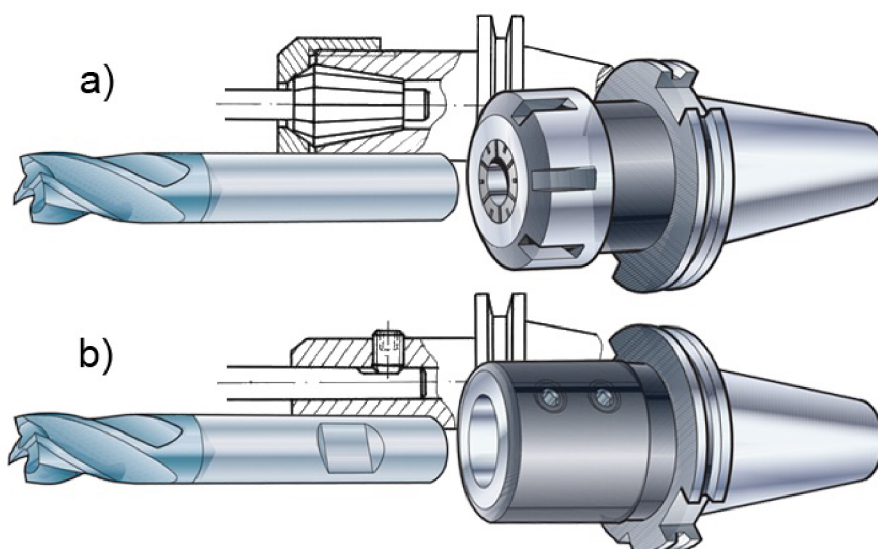
derní upínače poskytují přívod procesní kapaliny až do těla nástroje a také by měly umožňovat co nejrychlejší výměnu nástroje<sup>21</sup>.

K upínání nástrčných fréz se používají frézovací trny s upínacím kuželem Morse, metrickým nebo strmým (ISO). Morse a metrický kužel jsou samosvorné a přenášejí krouticí moment z vřetena na frézovací trn. Pro dokonalejší přenos krouticího momentu je na konci vřetena obdélníkové vybrání, do kterého zapadá nákrůžek na konci frézovacího trnu. Malé frézovací hlavy a nástrčné čelní a čelní válcové frézy se upínají většinou letmo na krátký frézovací trn (obr. 1.25), přičemž unášení frézy je zajištěno podélným či příčným perem. Pro axiální zajištění jsou nástrčné frézy ještě jedním nebo více šrouby (popř. maticemi) připevněny k trnu<sup>5,8,11</sup>.



Obr. 1.25 Krátký frézovací trn se strmým kuželem<sup>13</sup>.

Frézy s kuželovou upínací stopkou jsou upínány přes redukční pouzdra přímo do upínacího kužele ve vřetenu stroje. Redukční pouzdra se také využívají tehdy, když není shodný kužel na stopce či trnu frézky s kuželem vřetena. Pro upnutí fréz s válcovou stopkou se často využívá sklíčidlo s vyměnitelnou upínací kleštinou (obr. 1.26a). Další možností je využití upínačů typu Weldon, u kterých je nástroj upnut pomocí jednoho či více šroubů dosedajících na plošku, která je vyfrézovaná na stopce nástroje rovnoběžně s osou (1.26b)<sup>11,22</sup>.



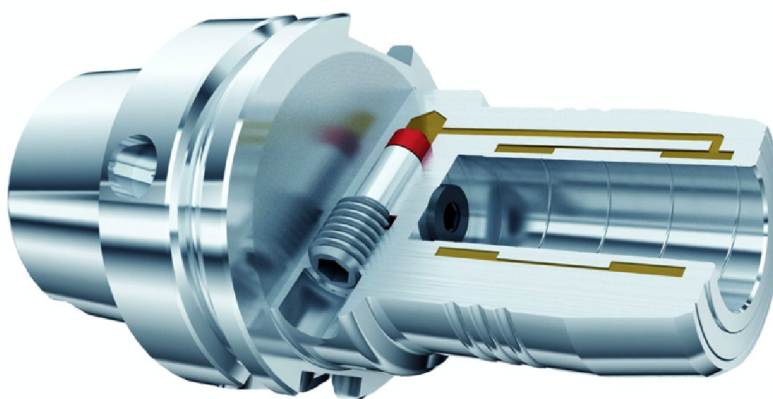
Obr. 1.26 Upínače fréz s válcovou stopkou<sup>13,22</sup>.

a) sklíčidlo s upínací kleštinou, b) upínač typu Weldon.

Pro zajištění velice přesného upnutí nástroje s válcovou stopkou a pro přenos velkých krouticích momentů lze aplikovat speciální upínače. Jedná se např. o tepelné upínače, hydraulické upínače a mechanicky deformovatelné (polygonální) upínače<sup>23</sup>.

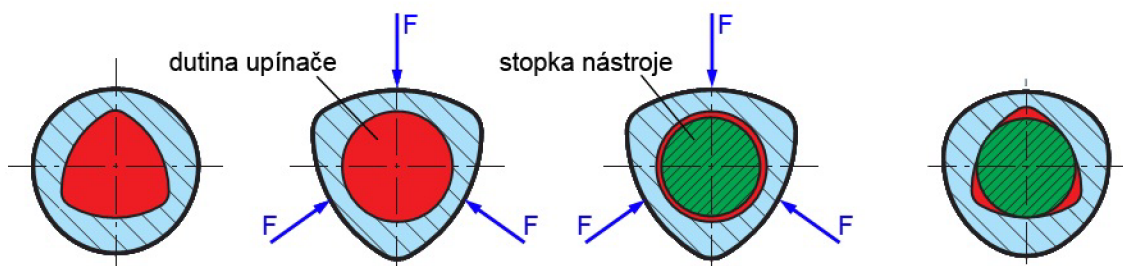
Tepelný upínač je ve speciálním zařízení zahříván indukční cívkou, přičemž dojde k rozšíření otvoru upínače, do kterého se následně vloží stopka nástroje. Poté je upínač s nástrojem ochlazen proudem vzduchu a díky smrštění materiálu upínače dojde ke spolehlivému upnutí nástroje<sup>8,11,22,23</sup>.

Princip hydraulického upínače spočívá v deformaci jeho vnitřního pouzdra, která je vyvolána navýšením tlaku hydraulického média (oleje). Deformované pouzdro obepne válcovou stopku nástroje a dojde k pevnému centrickému upnutí. Ke zvýšení tlaku média dochází díky pístu, který je posouván upínacím šroubem (obr. 1.27)<sup>2,18</sup>.



Obr. 1.27 Hydraulický upínač TENDO firmy SCHUNK GmbH<sup>25</sup>.

Dalším typem jsou mechanicky deformovatelné upínače, u kterých je upínací síla vyvozena změnou tvaru vnitřní dutiny. Upínač je umístěn ve speciálním přípravku, kde je zatížen vnější silou, která ho symetricky deformuje a umožňuje vložení válcové stopky nástroje. Po odlehčení vnější síly se tvar vnitřní dutiny vrátí do původního nekruhového tvaru a dojde k upnutí nástroje (obr. 1.28)<sup>22</sup>.



Obr. 1.28 Princip polygonálního upínače TRIBOS firmy SCHUNK GmbH<sup>25</sup>.

Stejně jako u soustružení existují i u frézování modulární nástrojové systémy, které jsou využívány zejména u obráběcích center. Nástroje ve formě krátkých řezných hlavic jsou přes universální adaptéry upínány do vřetena stroje, čímž je dosaženo určité standardizace nástrojů pro všechny obráběcí operace.



Při frézování vznikají velké řezné síly a je tedy nutné zajistit kromě přesného upnutí nástroje i dostatečné upnutí obrobku. Zásadou je, aby obrobek nebyl upínačem deformován a upínací i obráběná plocha obrobku by měla být co nejblíže vřetená stroje. Menší obrobky jsou obvykle upínány do svěráků, které mohou být různě uzpůsobeny ke správnému upnutí součásti konkrétního tvaru. K upínání rotačních dílů, je možné použít tříčelistové (nebo vícečelistové) sklíčidlo. Upínací síla může být vyvozena ručně, hydraulicky nebo pneumaticky. Obrobky větších rozměrů se upínají za pomoci upínek, které jsou pomocí speciálních šroubů upevněny do T-drážek na stole frézky. Další možností je upnutí na technologických paletách, které se spolu s obrobkem pohybují mezi jednotlivými obráběcími stroji výrobní linky<sup>8,11</sup>.

## 2 ROZBOR OBRÁBĚNÉHO MATERIÁLU

Praktická část této diplomové práce je zaměřena na návrh a výrobu příruby náboje zadního kola studentské formule Dragon 3, kterou vyvinul a zkonstruoval závodní tým TU Brno Racing, jenž je složen ze studentů oboru Automobilního a dopravního inženýrství na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Tato kapitola teoreticky začleňuje a popisuje materiál, ze kterého byla příruha vyrobena.

### 2.1 Hliník

Hliník je nepolymorfní lehký kov stříbrné barvy s kubickou plošně středěnou krystalovou mřížkou. Základní surovinou pro výrobu hliníku je hornina bauxit, která obsahuje velké množství oxidu hlinitého  $Al_2O_3$ . Aplikace hliníku v technické praxi je dána jeho nízkou měrnou hmotností (hustotou), dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí, korozivzdornými vlastnostmi a díky plošně středěné mřížce i jeho dobrými plastickými vlastnostmi. V tabulce 2.1 jsou uvedeny některé fyzikální a mechanické vlastnosti technicky čistého hliníku. Hodnoty jsou pouze orientační, protože zejména mechanické vlastnosti závisí na čistotě hliníku<sup>26,27,28</sup>.

Tab. 2.1 Fyzikální vlastnosti technicky čistého hliníku<sup>26,27,28</sup>.

Fyzikální vlastnosti		Mechanické vlastnosti (vyžíhaný stav)	
Hustota	2698 kg.m <sup>3</sup>	Mez pevnosti v tahu $R_m$	60 MPa
Teplota tání	660 °C	Tažnost A	25%
Tepelná vodivost	247 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>1</sup>	Modul pružnosti v tahu E	73000 MPa
Měrný elektrický odpor	26,2 nΩ.m	Tvrdost	20 HB

Tvářením za studena lze mez pevnosti v tahu čistého hliníku zvýšit až na 160 až 200 MPa. Obecně se technicky čistý hliník využívá zejména v elektrotechnice, chemickém a potravinářském průmyslu nebo se jako slabá vrstva aplikuje na povrchy jiných materiálů pro zvýšení jejich odolnosti proti korozi a tvorbě okují<sup>26,28</sup>.

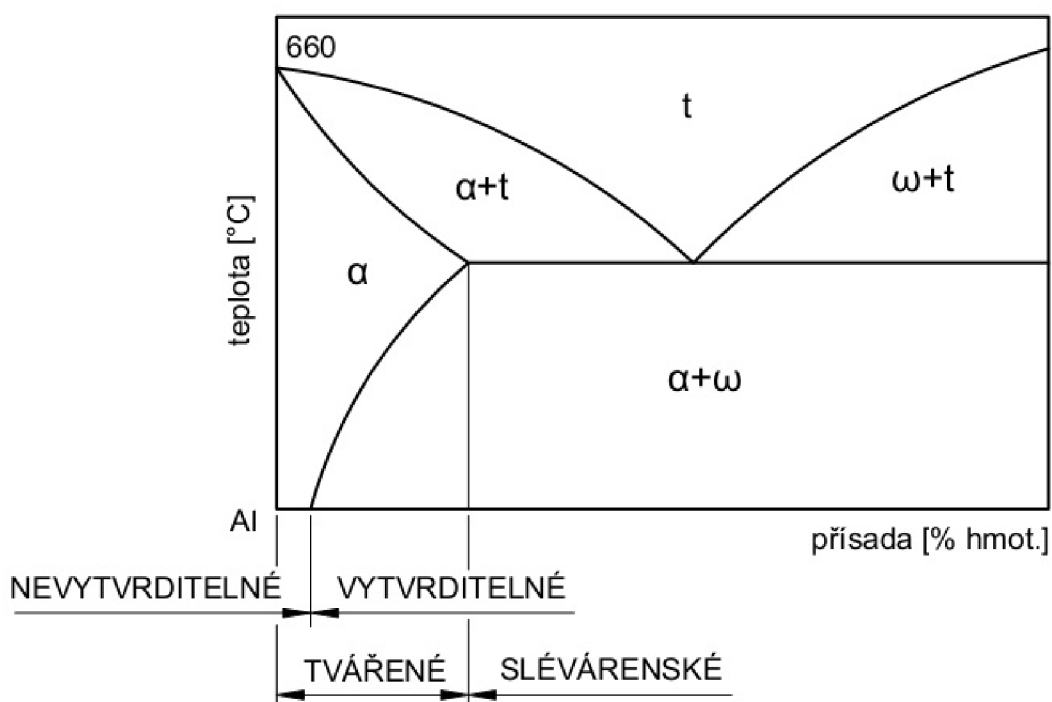
### 2.2 Slitiny hliníku

Vlastnosti hliníku je možné zlepšit přísadami dalších prvků. Z těch prvků, které se nejčastěji vyskytují ve slitinách hliníku, mají největší vliv na vlastnosti materiálu zejména Cu, Mg, Mn, Si a Zn. Slitiny hliníku vykazují oproti technicky čistému hliníku mimo jiné vyšší pevnost při současném zachování nízké měrné hmotnosti, díky čemuž se spolu s oceli řadí k nejpoužívanějším kovovým konstrukčním materiálům současnosti<sup>26,28</sup>.

Hlavními oblastmi využití hliníkových slitin jsou<sup>27</sup>:

- automobilní a letecký průmysl,
- stavebnictví,
- strojírenský a hutnický průmysl,
- potravinářský průmysl,
- chemický průmysl,
- ostatní oblasti použití (sport, klenotnictví,...).

Slitiny hliníku se rozdělují podle několika kritérií. Hlavní podskupinou jsou slitiny pro tváření a slitiny pro odlitky. Dále se rozlišují podle schopnosti zvýšit svou tvrdost a pevnost tepelným zpracováním, které se nazývá vytvrzování. Podle tohoto hlediska existují tedy slitiny vytvrditelné a nevytvrditelné. Klasifikace binárních slitin hliníku je schematicky vyjádřena v binárním diagramu na obr. 2.1<sup>26</sup>.



Obr. 2.1 Schéma obecného rovnovážného diagramu binárních slitin hliníku<sup>26</sup>.

### 2.2.1 Slitiny hliníku pro odlitky

Slévárenské slitiny hliníku se aplikují ve výrobě tvarových odlitků za využití technologie lití do písku, lití do kovových forem nebo tlakového lití. Nejjemnější struktury je dosaženo při lití do kovových forem nebo při tlakovém lití, kdy se pevnost odlitku pohybuje okolo 250 MPa<sup>26</sup>.

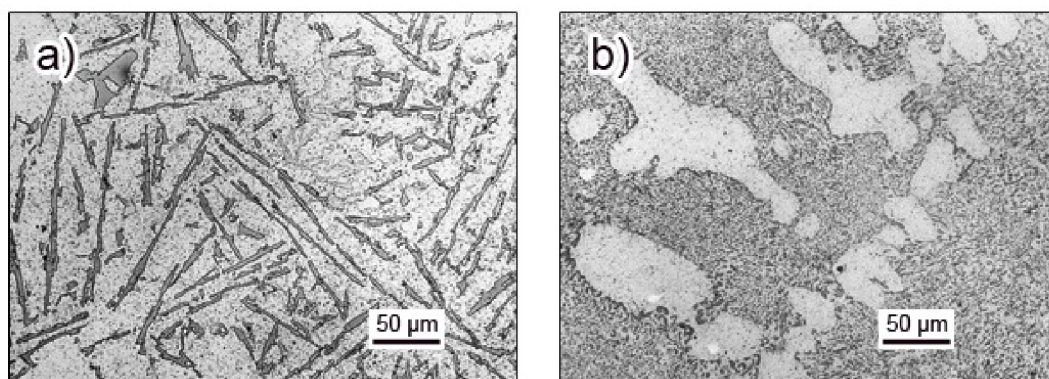
Oproti slévárenským slitinám z ostatních kovů mají slévárenské slitiny hliníku následující výhody<sup>27</sup>:

- dobrá slévatelnost,
- nízká teplota tavení,
- krátký interval krystalizace,
- obsah vodíku lze snadno minimalizovat vhodnými techno. podmínkami,
- odolnost vůči korozi,
- dobré povrchové vlastnosti odlitku,
- nízká náchylnost k tvorbě trhlin za tepla.

V současnosti jsou slévárenské slitiny hliníku dle ASM (American Society for Metals) děleny podle legujícího prvku do šesti základních skupin<sup>26,27,28</sup>:

a) Slitiny typu Al-Si,

Slitiny hliníku s křemíkem jsou nazývány siluminy. Dělí se na podeutektické (pod 11,7 hm. % Si), eutektické (kolem 11,7 hm. % Si) a nadeutektické (11,7 - 24 hm. % Si). S obsahem eutektika ve struktuře se zlepšuje zabíhavost siluminů. Binární siluminy se vyznačují dobrými korozivzdornými vlastnostmi, ale pro výrobu tvarových odlitků se využívají jen zřídka. Pevnost i plastické vlastnosti siluminů lze zlepšit modifikací, kdy se do taveniny přidává tzv. modifikátor (nejčastěji sodík), což má za následek zjemnění krystalů křemíku v eutektiku (viz obr. 2.2).



Obr. 2.2 Struktura siluminu (88% Al,12% Si)<sup>27</sup>.

a) nemodifikovaného, b) modifikovaného.

b) Slitiny typu Al-Si-Cu a Al-Si-Mg,

Označují se jako tzv. speciální siluminy. Příspěvky Cu nebo Mg mají vliv na zvýšení pevnosti a umožňují tyto speciální siluminy vytvrzovat. Tyto slitiny lze mechanicky zatěžovat za teplot až 275°C, avšak slévárenské vlastnosti

jsou horší než u binárních siluminů. Slouží k odlévání tvarově složitých a tenkostěnných odlitek jako jsou např. skříně spalovacích motorů, písky, disky kol a součásti letadel.

c) Slitiny typu Al-Cu,

Obsah Cu se pohybuje v rozmezí 4 - 11 hm. %. Vykazují dobré pevnostní charakteristiky za zvýšených teplot (až 450 °C) a mají vyšší odolnost vůči otěru. Nevýhodou je nízká odolnost proti korozi a horší slévárenské vlastnosti. V praxi mají tyto slitiny malé využití.

d) Slitiny typu Al-Mg,

Vykazují nejvyšší měrnou pevnost a rázovou houževnatost ze všech slitin hliníku na odlitky. Dále mají dobrou odolnost proti korozi a to především v mořské vodě. Jsou svařitelné a oproti siluminům jsou lépe obrobitelné. Naplynění a oxidace při tavení, lití a krystalizaci vedou k horším slévárenským vlastnostem a ke zvýšené pórovitosti. Zabíhavost lze zvýšit přísadou křemíku. Slitiny Al-Mg-Si se používají k výrobě odlitek namáhaných za vyšších teplot (hlavy válců, automobilové kování, fotopřístroje, atd.).

e) Slitiny typu Al-Zn-Mg,

Mají lepší zabíhavost než slitiny Al-Cu a Al-Mg. Dobrou odolnost proti korozi vykazují pouze bez zatížení. Jsou vytvrditelné a svařovatelné. Oproti ostatním slévárenským slitinám jsou méně citlivé na změnu tloušťky stěny odlitku.

f) Slitiny typu Al-Sn.

Tyto slitiny mají cca 6 hm. % Sn a kromě toho obsahují i malé množství Cu a Ni, což má za následek zvýšení pevnosti. Tyto slitiny jsou speciálně určeny k výrobě kluzných ložisek.

### **2.2.2 Slitiny hliníku pro tváření**

Mechanické vlastnosti tvářených slitin hliníku jsou oproti slévárenským slitinám obecně lepší. Od všech tvářených slitin hliníku je vyžadována dobrá tvařitelnost jak za tepla, tak za studena. Základní rozdělení slitin hliníku pro tváření rozlišuje dvě skupiny a to slitiny nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi a naopak slitiny vysokopevnostní s nízkou odolností proti korozi<sup>26,28</sup>.

a) *Slitiny nízkopevnostní s dobrou odolností proti korozi*

Technicky čistý hliník má celkem dobré korozivzdorné vlastnosti, ale jeho použitelnost je mnohdy omezena jeho nízkou pevností. Proto mají velký význam slitiny hliníku na bázi Al-Mg a Al-Mn. Tyto slitiny neobsahují měď, a proto mají dobré korozivzdorné vlastnosti, ale na druhé straně nemohou být vytvrzovány. Jejich pevnost tedy nedosahuje takových hodnot jako u vytvrditelných slitin hliníku. Hlavními přednostmi těchto slitin jsou dobrá svařitelnost, tvařitelnost, odolnost proti vibračnímu zatížení a dobrá houževnatost<sup>26,28</sup>.

Hlavními slitinami hliníku v této skupině jsou<sup>26,27,28</sup>:

- Slitiny Al-Mg,

Používají se pouze slitiny s obsahem hořčíku menším než 6 hm. %. Větší obsah hořčíku by měl za následek sklon slitiny ke korozi po hranicích zrn při mechanickém zatížení. Tyto slitiny odolávají atmosférické korozi i mořské vodě a jsou dobře leštitelné. Při vytvrzování se u nich snižují korozivzdorné vlastnosti, a proto se nevytvrzují a pro zvýšení mechanických vlastností se používá výhradně tváření za studena. Deformačním zpevněním lze zvýšit pevnost slitiny z  $R_m = 140$  MPa až na  $R_m = 420$  MPa, kdy už je ale značně snížena tvařitelnost. Tyto slitiny se používají na středně namáhané součásti při stavbě lodí či automobilů, dále v chemickém, potravinářském a stavebním průmyslu.

- Slitiny Al-Mg-Si,

Základní pevnost těchto slitin se pohybuje pouze okolo 150 MPa. Na rozdíl od slitin Al-Mg jsou ale vytvrditelné a lze je vytvrdit na pevnost až 350 MPa, přičemž při následné aplikaci tváření za studena dosahují pevnosti až 400 MPa. Mají dobrou houževnatost, korozivzdornost i tvařitelnost a jsou svařitelné. Aplikují se zejména v letectví a stavebnictví.

- Slitiny Al-Mn.

Obsah manganu je nižší než 1,5 hm. %. Tyto slitiny se nevytvrzují, protože malé přesycení tuhého roztoku neumožňuje výrazné zvýšení pevnosti. Má podobné vlastnosti a využití jako slitina Al-Mg. Základní pevnost 130 MPa lze zvýšit deformačním zpevněním na 220 MPa. V mnoha případech se používá jako pevnější náhrada místo technicky čistého hliníku.

#### *b) Slitiny vysokopevnostní s nízkou odolností proti korozi*

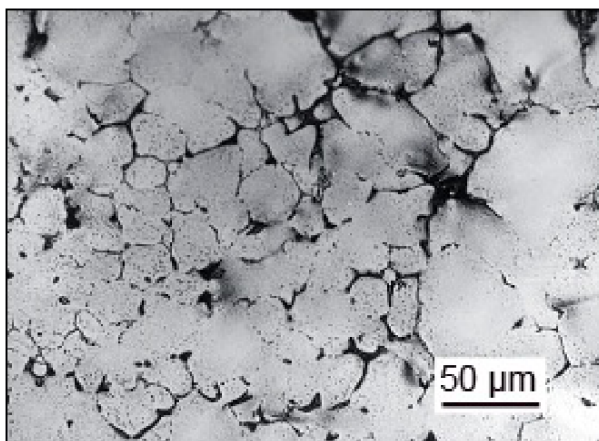
Vysokopevnostní tvářené slitiny hliníku zastávají pozici velmi využívaného a hodného konstrukčního materiálu. Vysokých hodnot pevnosti je dosaženo vytvrzováním popř. tvářením za studena. Kvůli relativně nízké odolnosti proti korozi se polotovary z těchto slitin často dodatečně plátují čistým hliníkem<sup>26,28</sup>.

Hlavními zástupci vysokopevnostních slitin hliníku jsou<sup>26,27,28</sup>:

- Slitiny Al-Cu-Mg,

Tyto hliníkové slitiny jsou známé pod označením dural a jedná se o nejpoužívanější slitiny této kategorie. Jednou z těchto slitin je např. AlCu4Mg, která po vytvrzení dosahuje pevnosti až 530 MPa. Slitina s vyšším obsahem hořčíku (0,9 - 1,5 hm. %) je označovaná jako superdural (AlCu4Mg1). Měď má vliv na zvýšení pevnosti a tvrdosti při současném snížení plastických vlastností a odolnosti proti korozi. Hořčík zajišťuje zvýšení pevnosti a tvrdosti po vytvrzení. Slitiny s vyšším obsahem hořčíku mohou pracovat za teplot až 200 °C. Duraly se používají pro výlisky a plechy, které jsou tenkou vrstvou hliníku povrchově chráněné proti korozi. Bývají využity na konstrukční části letadel, automobilů a v ostatních aplikacích, kde je vyžadována vysoká pevnost a nízká měrná hmotnost.

- Slitiny Al-Cu-Mg-Ni,  
Duraly obohacené o přísadu niklu mohou být dlouhodobě vystavovány teplotám až 300°C. Používají se k výrobě pístů, hlav válců spalovacích motorů, rotorů a lopatek kompresorů.
- Slitiny Al-Cu-Si-Mn,  
Určené pro volně i zápustkově kované výkovky.
- Slitiny Al-Cu-Fe-Si,  
Hliníkové slitiny užívané pro kovaná pouzdra a pánve kluzných ložisek.
- Slitiny Al-Cu-Bi-Pb,  
Na rozdíl od ostatních hliníkových slitin, tvoří tato slitina, díky přísadě bizmutu a olova, krátkou drobnou třísku. Využívá se pro součásti s menšími nároky na pevnostní charakteristiky, které jsou velkosériově vyráběné na obráběcích automatech. Označují se také jako automatové slitiny.
- Slitiny Al-Si-Ni-Mg,  
Jedná se o tvářený silumin, který je určený pro vysoce namáhané výlisky a výkovky, jakými jsou např. kované písty spalovacích motorů.
- Slitiny Al-Zn-Mg-Cu.  
Tyto slitiny jsou nejpevnější ze všech slitin hliníku. Po rozpouštěcím žíhání (okolo 470°C) se ochlazují do vody a dále se vytvrzují za zvýšených teplot (130 °C). Po vytvrzení dosahují pevnosti v tahu až 600 Mpa. K nedostatkům patří sklon ke korozi pod napětím a nižší houževnatost než u duralů. Na obr. 2.3 je pro ukázkou zobrazena struktura slitiny AlZn6MgCu.



Obr. 2.3 Struktura litého stavu slitiny AlZn6MgCu<sup>25</sup>.

Právě do skupiny slitin Al-Zn-Mg-Cu patří materiál, jenž bude obráběn v praktické části této diplomové práce. Tento konkrétní materiál je popsán v kapitole 2.2.6. Kromě uvedených slitin existují i slitiny speciální, mezi které patří např. slitiny Al-Li. Tyto slitiny jsou stále ve vývoji a jejich hlavní přínos spočívá v nižší měrné hmotnosti (o 5 - 10 %) oproti konvenčním slitinám hliníku. Problematická je jejich výro-



ba, protože lithium je vysoce reaktivní prvek, který snadno oxiduje na vzduchu. Proto jsou tyto slitiny taveny a odlévány pod ochrannou atmosférou<sup>26,27</sup>.

### 2.2.3 Označování slitin hliníku

Označování slitin hliníku a technicky čistého hliníku je popsáno technickými normami. V současné době je v České republice platné označení jak podle norem ČSN EN, tak i podle ČSN, přičemž normám ČSN EN se dává v praxi přednost. V tabulce 2.2 je označování dle obou norem popsáno<sup>27</sup>.

Tab. 2.2 Označování hliníku a slitin hliníku<sup>27,28</sup>.

Označování podle ČSN EN	Označování podle ČSN
<b>EN AW-5052</b> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px;"> <div style="text-align: center;">1</div> <div style="text-align: center;">2</div> </div>	<b>ČSN 42 4400</b> <div style="display: flex; justify-content: center; gap: 20px;"> <div style="text-align: center;">1</div> <div style="text-align: center;">2</div> </div>
<b>1</b> Druh slitiny	<b>1</b> Třída
AW - slitiny hliníku pro tváření AC - slitiny hliníku pro odlitky	42 - hutnictví
<b>2</b> Skupina slitin - hlavní přísadové prvky	<b>2</b> Skupina a podskupina
1XXX - Al technické čistoty (min. 99%) 2XXX - slitiny AlCu 3XXX - slitiny AlMg 4XXX - slitiny AlSi 5XXX - slitiny AlMg 6XXX - slitiny AlMgSi 7XXX - slitiny AlZn 8XXX - jiné slitiny, např. Li  - druhá až čtvrtá číslice upřesňuje chemické složení slitiny - slitiny pro odlitky mají navíc pátou číslici (nerovná se nule v případě slitin určených pro leteckou výrobu)	40XX - hliník tvářený 41XX - hliník na odlitky 42XX - slitiny hliníku tvářené 43XX - slitiny hliníku na odlitky 44XX - slitiny hliníku tvářené 45XX - slitiny hliníku na odlitky  - druhá číslice označuje podskupinu (sudá = slitiny tvářené, lichá = slitiny na odlitky) - třetí a čtvrtá číslice slouží jako pořadové číslo normy
Číselné označení lze u obou systémů značení doplnit i chemickým označením udávajícím směrný obsah chemických prvků v hmotnostních procentech, např. EN AW-5052 [AlMg2.5], EN AW-1050A [Al 99.5], ČSN 42 4400 [AlMg1Si1Mn].	

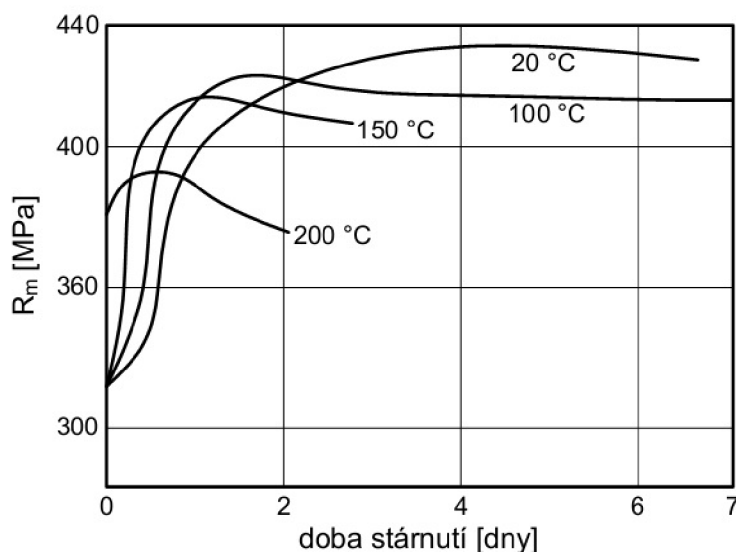


### 2.2.4 Tepelné zpracování hliníkových slitin

Tepelné zpracování tvářených a slévárenských slitin hliníku se nijak zásadně neliší. Hlavní operace jejich tepelného zpracování jsou žíhání a vytvrzování. Nejčastější způsoby žíhání hliníku a jeho slitin jsou<sup>26,27,28</sup>:

- Žíhání na odstranění pnutí,
  - pro tvarově složité součásti tvářené za tepla, odlitky a svařence,
  - teplota 300 - 400 °C.
- Žíhání rekrytalizační,
  - zařazuje se jako mezioperace po tvářením za studena pro znovuožnovení plasticity materiálu,
  - teplota 250 - 500 °C.
- Žíhání homogenizační.
  - snižuje chemickou heterogenitu materiálu,
  - vysoká teplota těsně pod teplotou solidu.

Druhým typem tepelného zpracování hliníkových slitin je precipitační zpevnění neboli vytvrzování. Aby se dala slitiny vytvrzovat, musí mít výraznou změnu rozpustnosti legujícího prvku v tuhém roztoku  $\alpha$ . Proces vytvrzování se skládá z rozpouštěcího ohřevu, následného ochlazení a stárnutí. Po ohřevu a výdrži na rozpouštěcí teplotě se uskutečňuje ochlazení nadkritickou rychlostí (nejčastěji ve vodě 20 - 40 °C), což vede k získání přesyceného tuhého roztoku  $\alpha$ . Konečným procesem vytvrzování je stárnutí, při kterém dochází v průběhu času k rozpadu přesyceného tuhého roztoku  $\alpha$ , který je doprovázen výrazným zvýšením pevnosti a tvrdosti za současného snížení plasticity materiálu. Stárnutí může probíhat za pokojové teploty (přirozené stárnutí), nebo za zvýšených teplot (umělé stárnutí)<sup>26,27,28</sup>.



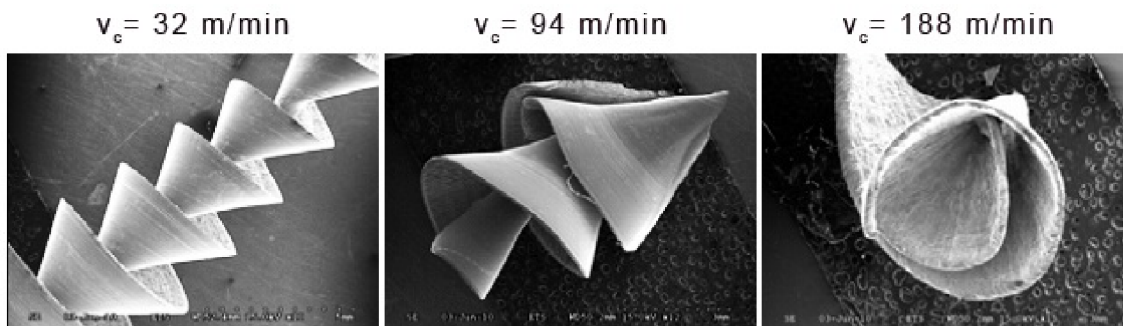
Obr. 2.4 Vliv teploty a doby stárnutí na pevnost v tahu slitiny AlCu4Mg1<sup>28</sup>.

Na obr. 2.4 je zobrazen průběh stárnutí slitiny AlCu4Mg1 při různých teplotách. Pro všechny hliníkové slitiny platí následující zákonitosti<sup>27</sup>:

- čím je vyšší teplota stárnutí, tím dříve lze dosáhnout maximálních pevnostních charakteristik,
- čím vyšší teplota stárnutí je, tím nižších maximálních pevnostních charakteristik lze dosáhnout.

### 2.2.5 Obrobitelnost hliníkových slitin

Obrobitelnost lze definovat jako schopnost materiálu nechat se obrábět. Mezi parametry hodnotící obrobitelnost konkrétního materiálu patří např. tvar třísky, dosažená kvalita a přesnost obrobeného povrchu, životnost nástroje či velikost řezných sil. Hliníkové slitiny lze v porovnání s ostatními kovovými konstrukčními materiály řadit mezi ty lépe obrobitelné. V souladu s normou ISO 513 se řadí do skupiny N - neželezné kovy (zelená barva). Řezné síly, tudíž i požadovaný řezný výkon, nejsou při obrábění hliníkových slitin vysoké, díky čemuž se prodlužuje i trvanlivost řezného nástroje. Obecně tvoří hliník a jeho slitiny při obrábění dlouhou třísku, ale pomocí volby vhodných řezných podmínek, řezného materiálu a nástrojové geometrie lze dosáhnout optimálnějšího tvaru třísky. Na obr. 2.5 jsou zobrazeny tvary třísek získané při vrtání hliníkové slitiny různými řeznými rychlostmi za konstantního posuvu. Je zřetelné, že při aplikaci vyšších řezných rychlostí lze dosáhnout krátké třísky, která je pro obráběcí proces vhodnější<sup>30,31,27</sup>.



Obr. 2.5 SEM snímky třísek získaných během vrtání hliníkové slitiny EN AW-7075 konstantním posuvem  $f = 0,15 \text{ mm}$  a různými řeznými rychlostmi<sup>30</sup>.

Hliník a jeho slitiny mají při obrábění, zejména zasucha, tendenci ulpívat na břitu nástroje, čímž dochází ke tvorbě nárůstku. Příčinou je vysoká tepelná vodivost hliníku, nízká teplota tání a výrazný sklon k adhezi na břit většiny řezných materiálů. Vysoká tepelná vodivost hliníku má dále za následek zvýšené množství odvedeného tepla z místa řezu do obrobku, což vede k deformacím obrobku. Aby se omezilo uplívání obráběného materiálu na břitu nástroje a zlepšila se kvalita obrobené plochy, je při obrábění hliníku a jeho slitin nutné použít procesní kapalinu, zvolit nástroj s pozitivní geometrií břitu a malým poloměrem zaoblení ostří. Dalším opatřením je zvýšení řezné rychlosti, které kromě již zmíněného vlivu na tvar třísky, vede k omezení tvorby nárůstku a ke zvýšení výkonnosti obrábění, aniž by docházelo ke snížení životnosti nástroje<sup>32,31,33</sup>.

Obrobitelnost slévárenských slitin hliníku je ovlivněná podmínkami krystalizace. Jemnozrnná homogenní struktura vykazuje při obrábění nižší opotřebení nástroje, nežli slitiny s hrubozrnnou heterogenní strukturou. Dalším faktorem, který má značný vliv na obrobitelnost, je obsah křemíku. S rostoucím obsahem křemíku ve struktuře stoupá i abrazivní opotřebení řezného nástroje a je nutné zredukovat řezné podmínky obráběcího procesu. Při obrábění siluminů se obvykle tvoří krátká lámavá tříška. Výjimkou v tomto ohledu jsou eutektické siluminy s obsahem křemíku okolo 12%, které utvářejí dlouhé smotané třísky, které mají negativní vliv na kvalitu obrobené plochy. Na druhou stranu mají tyto siluminy poměrně měkkou matici, do které se částice Si zatlačí a nezpůsobují poté tak velké abrazivní opotřebení nástroje<sup>27,31</sup>.

Tvářené slitiny hliníku, lze ve většině případů označit jako dobře obrobitelné. Kvalitní obrobené plochy vykazují vytvrditelné slitiny, které ve vytvrzeném stavu tvoří dlouhou a většinou snadno lamatelnou tříšku. V nevytvrzeném stavu mají tyto slitiny horší vlastnosti pro obrábění, podobně jako nevytvrzené slitiny. Zvláštním typem tvářených slitin hliníku jsou tzv. automatové slitiny, které byly vyvinuty s důrazem na dobrou obrobitelnost. Automatové slitiny jsou legovány prvky s nízkou teplotou tání, jako jsou Pb, Bi, Sn a Cd. Tyto prvky tvoří měkké částice a nerozpouštějí se v základní hliníkové matici. Vlivem vysokých teplot na břitu nástroje, které vznikají při obrábění, dochází k částečnému natavení těchto prvků, což má za důsledek tvorbu krátkých lámavých třísek. Z hlediska opotřebení řezného nástroje a kvality obrobeného povrchu dosahují automatové slitiny podobných parametrů jako vytvrditelné slitiny i při řezných rychlostech okolo 1000 m/min<sup>27</sup>.



Obr. 2.6 Frézy Quattromill-AL s PKD břity - firma Seco Tools s.r.o.<sup>34</sup>.

Jak již bylo zmíněno, je pro obrábění hliníkových slitin nutné volit nástroj s pozitivní geometrií a s ostrým břitem. Důležitým hlediskem je ale i volba řezného materiálu. Nejčastěji se aplikují nástroje z nepovlakovaného slinutého karbidu wolframu, přičemž zde platí pravidlo, že s rostoucí zrnitostí karbidů, drsností povrchu nástroje a s rostoucím obsahem kobaltu se zvyšuje tendence k adheznímu nalepování hliníku na břit nástroje. Optimální jsou tedy jemnozrnné slinuté karbidy s nízkým obsahem kobaltu ve struktuře. Povlakované slinuté karbidy mají v této

aplikaci omezené využití, protože povlak zvyšuje poloměr zaoblení ostří, zvyšuje drsnost povrchu bříty a v neposlední řadě obsahuje prvky, které jsou chemicky reaktivní s hliníkem (TiN, TiCN, TiAlN). Lze použít nástroje s ochrannými vrstvami (TiB<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub>, DLC), které snižujícími koeficient tření mezi obrobkem a nástrojem, čímž redukuje adhezní opotřebení nástroje. Stejného efektu je možné dosáhnout aplikací mikroleštěných slitných karbidů s velmi nízkou povrchovou drsností. Pro obrábění vysoce abrazivních slitin hliníku s obsahem křemíku vyšším než 12% se aplikují nástroje s bříty osazenými segmenty z PKD (polykrystalického diamantu, viz obr. 2.6)<sup>35,32,33</sup>.

### 2.2.6 Certal

Certal je obchodní označení hliníkové slitiny EN AW-7022 / AlZn5Mg3Cu. Z této slitiny byla vyráběna příruba náboje zadního kola formule, která je předmětem praktické části této diplomové práce. Certal se vyznačuje pevnostními vlastnostmi porovnatelnými s tepelně nezpracovanou konstrukční nízkolegovanou ocelí. Má vysokou pevnost, tvarovou stálost, dobrou obrobiteľnosť i svařitelnost. Oblastmi použití jsou vodící a upínací desky postupových lisovadel, vstřikovací formy a vysoce mechanicky zatěžované strojní součásti. V příloze 1 je uveden technický list slitiny s podrobnými informacemi o tomto materiálu. Polotovary ze slitiny Certal jsou tepelně zpracovány na stav s označením T6, což reprezentuje stav materiálu po aplikaci rozpouštěcího žíhání s následným umělým stárnutím (vytvrzováním). Dodává se ve formě desek o tloušťkách od 8 mm do 300 mm. V tabulce 2.3 jsou uvedeny mechanické vlastnosti této slitiny ve vytvrzeném stavu a to pro desky o rozsahu tloušťek 25 - 100 mm<sup>36</sup>.

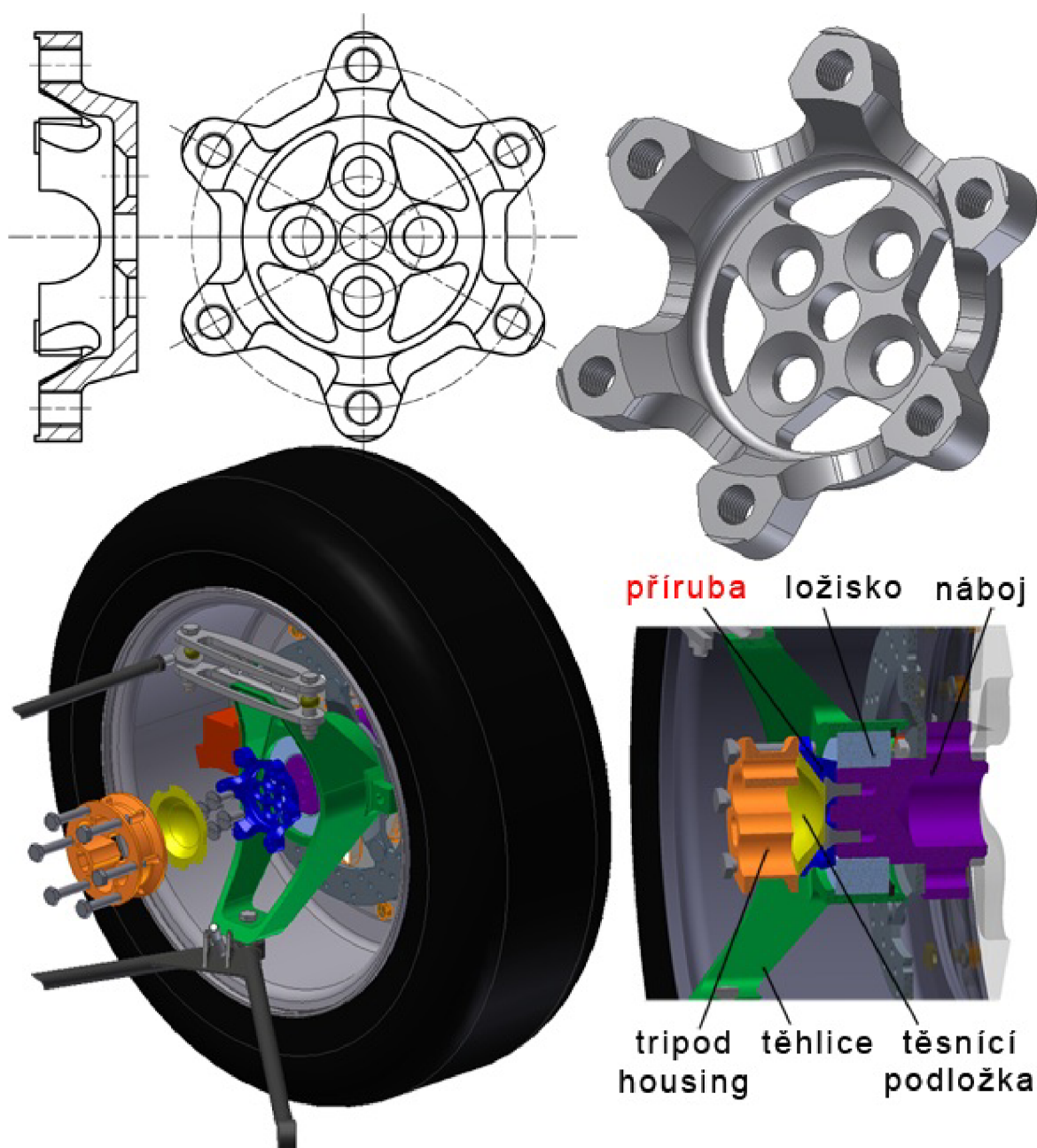
Tab. 2.3 Mechanické vlastnosti slitiny Certal<sup>36</sup>.

CERTAL - mechanické vlastnosti		
Mez pevnosti v tahu	R <sub>m</sub> [MPa]	550
Mez kluzu	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	495
Tažnost	A <sub>50</sub> [%]	8
Modul pružnosti v tahu	E [MPa]	72000
Tvrдость	HB	165



### 3 KONSTRUKCE PROTOTYPU PŘÍRUBY NÁBOJE ZADNÍHO KOLA FORMULE A NÁVRH OBRÁBĚCÍCH STRATEGIÍ

Tato kapitola se v první části věnuje konstrukci příruby náboje zadního kola studentské formule Dragon 3 (dále jen příruba) a následně popisuje návrh obráběcích strategií pomocí CAM technologie a CNC dílenského programování. Návrh součásti byl řešen společně se členy týmu TU Brno Racing, kteří celou formuli navrhují, vyvíjí a závodí s ní v mezinárodní studentské soutěži Formula Student/SAE. Příruba slouží k převodu krouticího momentu ze součásti tripod housing na náboj kola. Na obr. 3.1 a 3.2 je zobrazena samotná příruba, zařazení příruby v sestavě uložení kola a render formule Dragon 3.



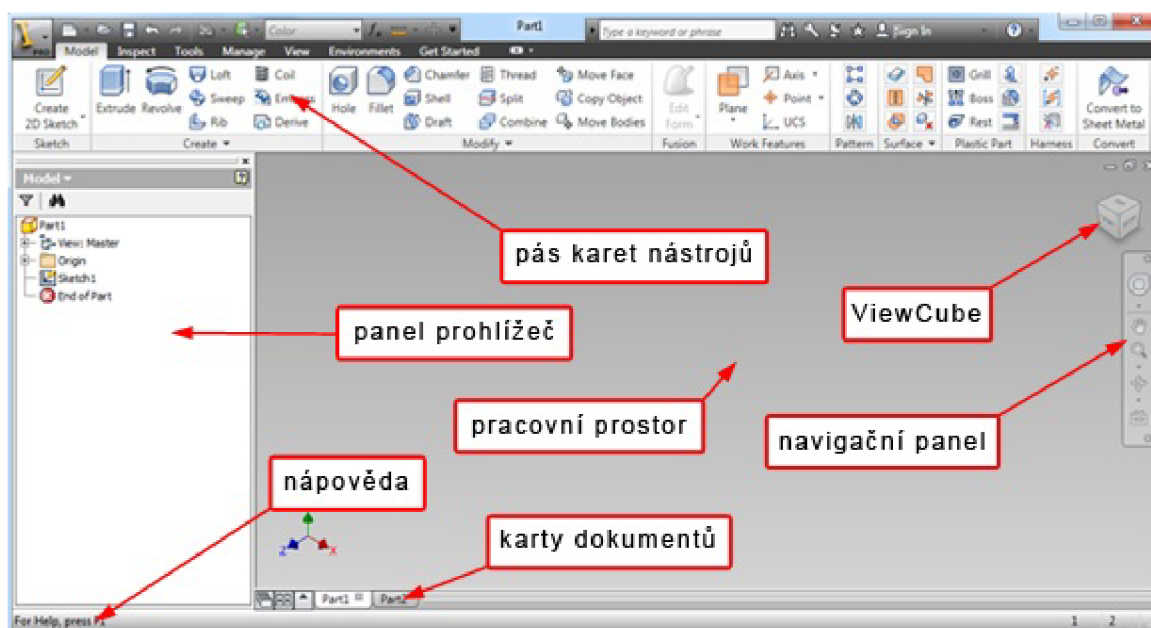
Obr. 3.1 Příruba náboje zadního kola formule a její zařazení v sestavě uložení kola<sup>37</sup>.



Obr. 3.2 Render formule Dragon 3.

### 3.1 Konstrukce příruby náboje zadního kola

Pro návrh příruby byl aplikován parametrický CAD software Autodesk Inventor Professional 2012. Nejprve byl vytvořen 3D model součásti a z něj následně výkres, jenž je přiložen jako příloha č.2. Na obr. 3.3 je uvedeno a popsáno základní uživatelské rozhraní programu.

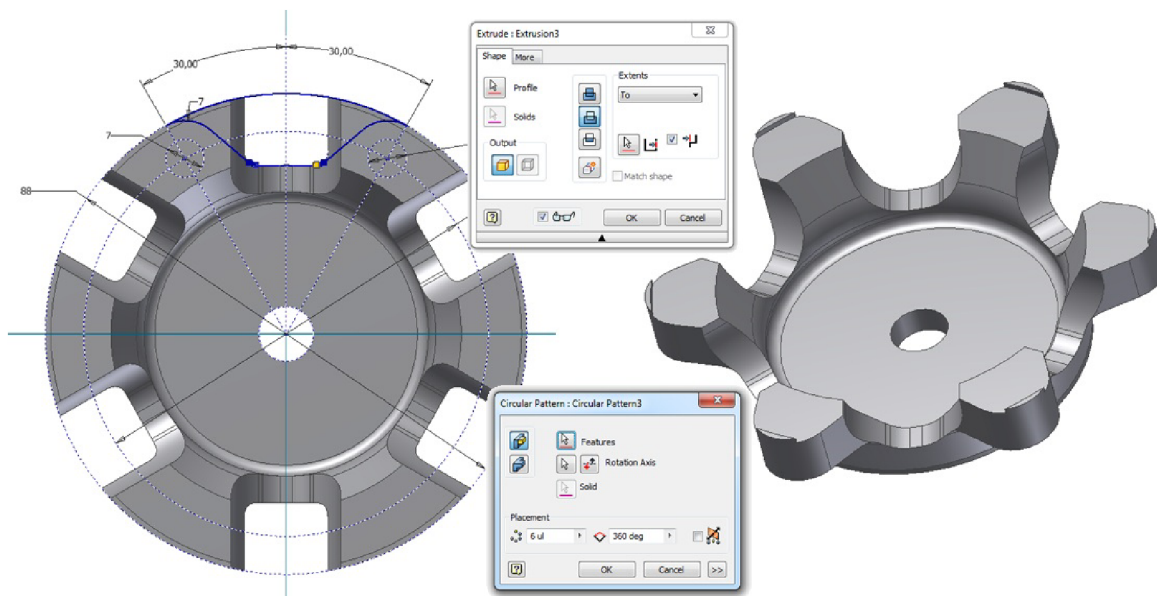


Obr. 3.3 Pracovní rozhraní programu Autodesk Inventor Professional 2012.



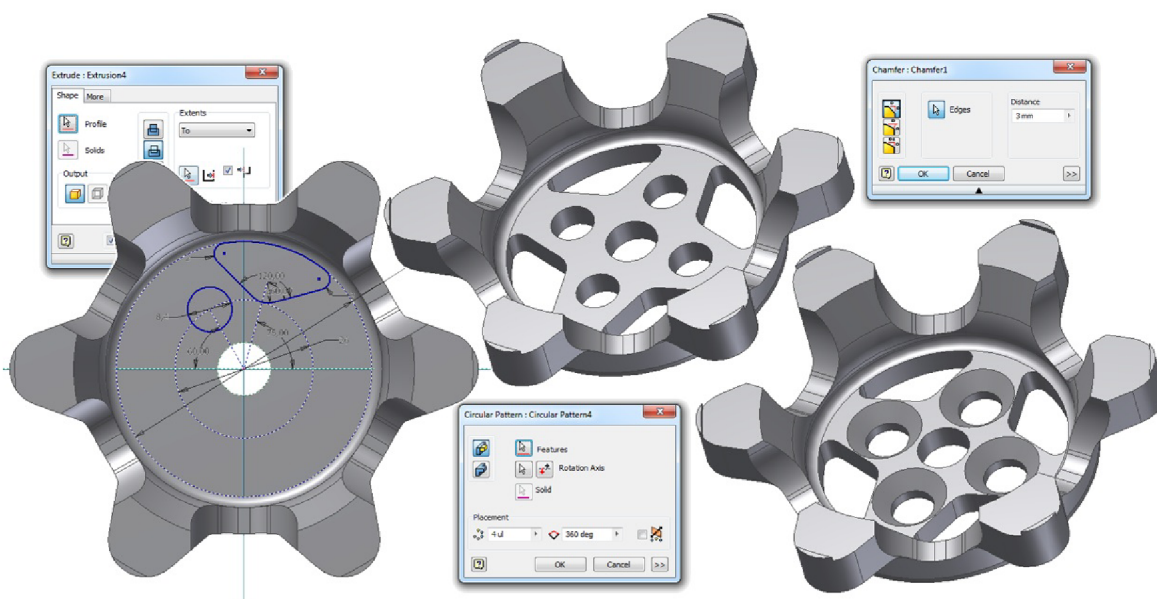


Dále bylo třeba tyto drážky rozšířit i v axiálním směru. Opět byl materiál odebrán pomocí funkce vysunutí a kruhové pole bylo využito obdobně jako v minulé operaci (viz obr. 3.6)



Obr. 3.6 Rozšíření drážek - vysunutí profilu a kruhové pole.

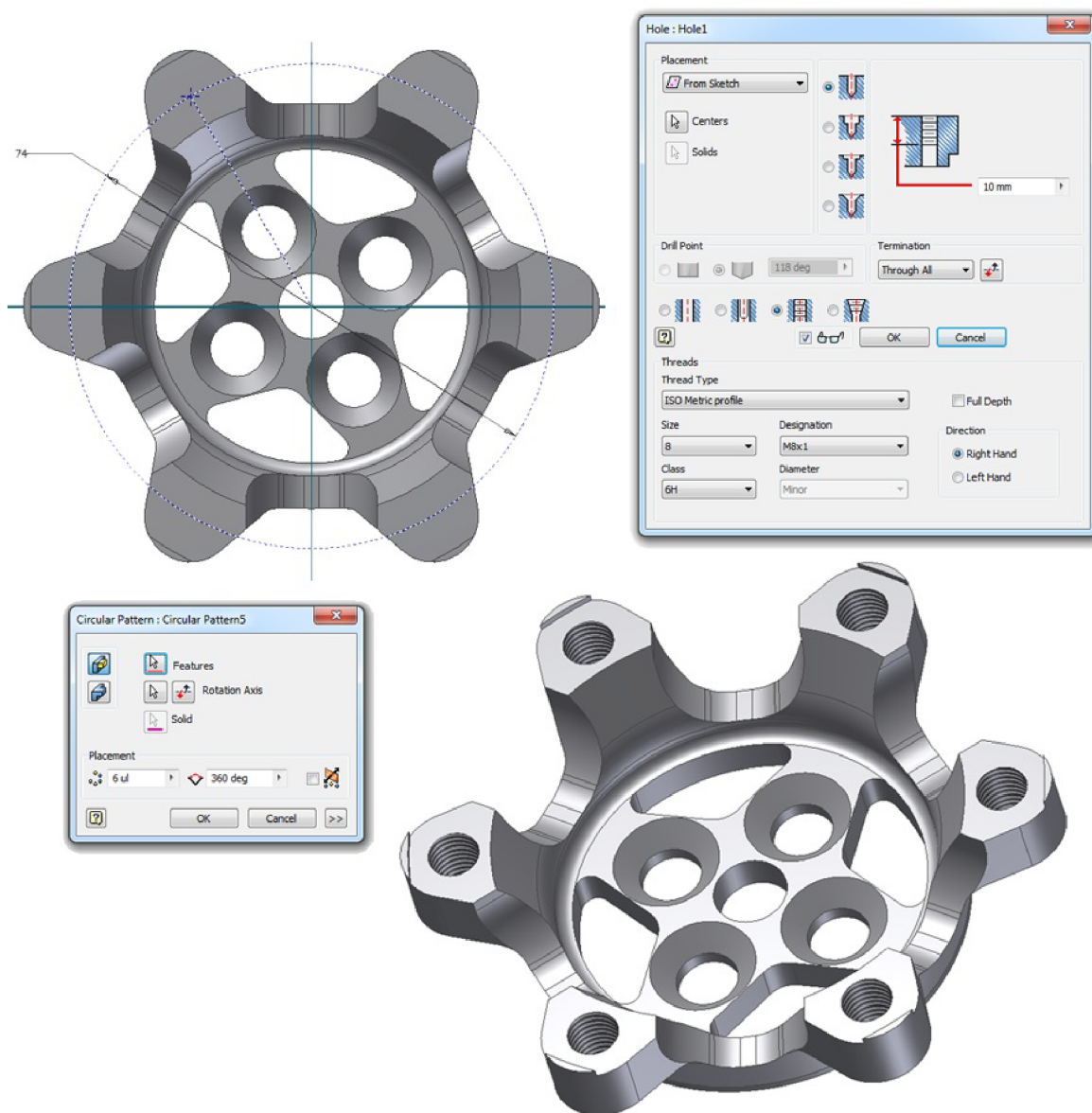
Následně byly současně vytvořeny kapsy a díry na dně součásti (viz obr. 3.7). Použity byly operace vysunutí a kruhové pole. Kapsy mají opět funkci odlehčení a skrz díry  $\varnothing 8,4$  mm vedou šrouby, kterými se příruba připevňuje k náboji kola. Protože byly použity šrouby s kuželovitou hlavou, musely být hrany děr upraveny pomocí funkce zkosení.



Obr. 3.7 Kapsy a díry  $\varnothing 8,4$  mm na dně - vysunutí, kruhové pole a zkosení.



Poslední operací je vytvoření šesti obvodových děr opatřených závitem M8 (viz obr. 3.8). Tyto díry jsou určeny pro šrouby, které připevňují přírubu k součásti tripod housing. Aplikována byla funkce díra, kde byly nastaveny rozměry i parametry závitu. Díry byly opět namnoženy pomocí kruhového pole.



Obr. 3.8 Díry se závitem M8 - díra a kruhové pole.

Po vyhotovení 3D modelu součásti následovalo ověření tuhosti konstrukce v systému Ansys 14, kde byla pomocí metody konečných prvků provedena pevnostní analýza (není předmětem této diplomové práce). Výsledky analýzy potvrdily dostatečnou tuhost konstrukce, a proto nebylo nutné provádět na modelu další změny. Dále byl z modelu vygenerován výkres, jenž je přiložen jako příloha 2. Nakonec bylo nutné exportovat model do formátu STEP, aby s ním bylo možné pracovat při následujícím návrhu obráběcích strategií.

### 3.2 Návrh obráběcích strategií

Pro výrobu součásti jsou zapotřebí soustružnické i frézovací operace. Soustružnické dráhy byly vygenerovány pomocí dílenského CNC programování v programu ShopTurn v. 06.04, což je modul řídicího systému Sinumerik 840D. V případě tvorby frézovacích strategií byl využit CAM software PowerMILL 2010. Kompletní výrobní postup aplikovaný při obrábění příruby je uveden v příloze 3.

#### 3.2.1 Návrh soustružnických strategií

Před samotným programováním obráběcích drah bylo nutné ověřit technologičnost konstrukce a promyslet pořadí jednotlivých operací. V tabulce 3.1 je uveden orientační výrobní postup soustružnické části výroby spolu s grafickým zobrazením obrobku a odebíraného materiálu. (kompletní postup uveden v příloze 3).

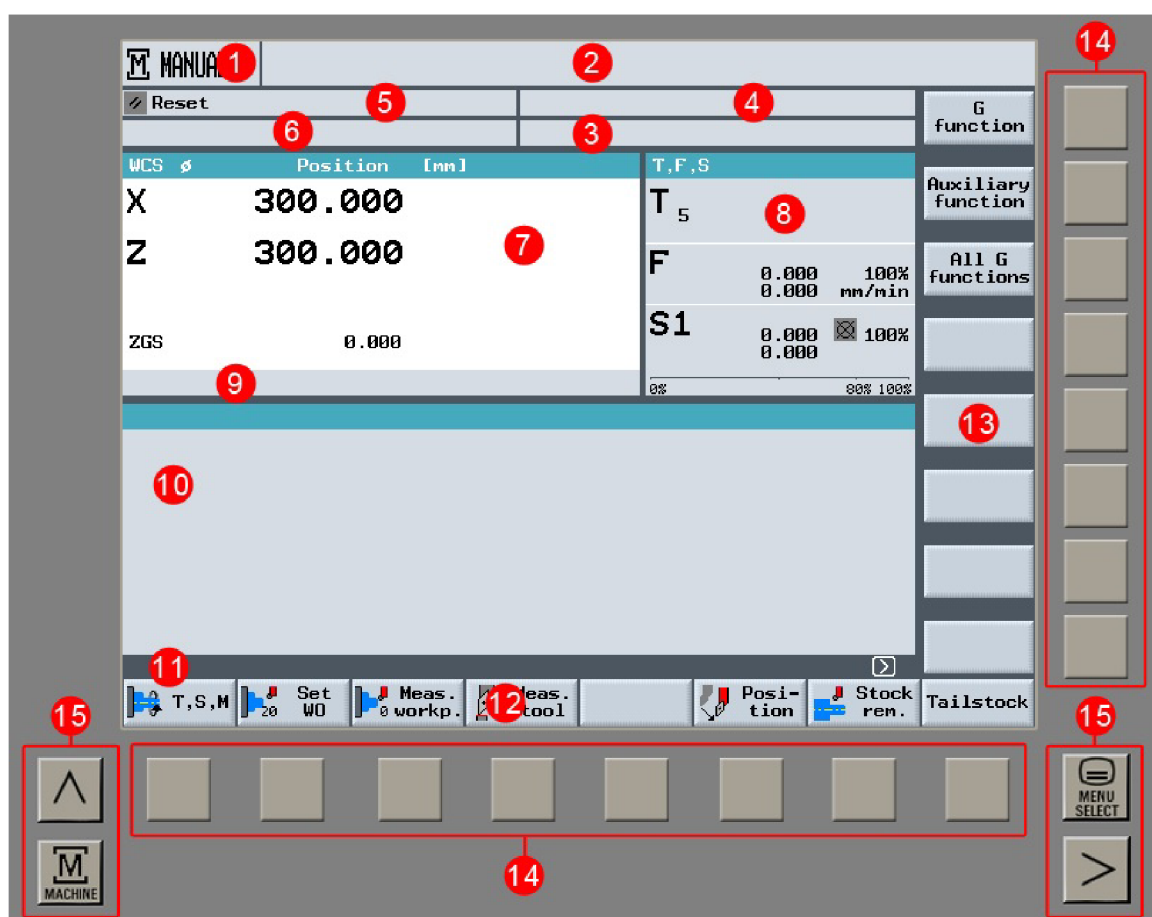
Tab. 3.1 Orientační výrobní postup soustružnické části výroby.

č. op./ús.	popis práce	vyznačení odebíraného materiálu
1/1	Upnout do sklíčidla za délku 8 mm.	
1/2	Zarovnat čelo 0,8 mm nahrubo.	
1/3	Soustružit vnější konturu nahrubo.	
1/4	Soustružit čelo načisto.	
1/5	Soustružit vnější konturu načisto.	
2/1	Zkontrolovat rozměry.	
3/1	Otočit a upnout za $\varnothing 50$ ve vzdál. 9 mm.	
3/2	Zarovnat čelo 0,8 mm nahrubo.	
3/3	Navrtat středící důlek.	
3/4	Vrtat díru $\varnothing 10$ mm do vzdálenosti 25 mm.	
3/5	Vrtat díru $\varnothing 35$ mm do vzdálenosti 16,6 mm.	
3/6	Soustružit vnitřní konturu nahrubo.	
3/7	Soustružit obvod na $\varnothing 88,8$ mm načisto.	
3/8	Soustružit vnitřní konturu načisto.	
4/1	Ručně odstranit ostřiny a zkontrolovat rozměry.	

Při soustružení obrobku z první strany, bylo nutné, kromě základní kontury, vytvořit i přídatnou válcovou část o délce 16 mm a průměru 50 mm, která slouží jako upínací plocha při soustružení druhé strany. Důvodem je kuželovitý profil součásti, který neumožňuje řádné upnutí součásti do čelistového sklíčidla. Kvůli tomuto opatření musel být zvolen delší polotovar ( $\varnothing 90 - 40$  mm). Tato pomocná válcová část bude po celkovém obrobení součásti odstraněna upíchnutím na soustruhu.

### 3.2.1.1 Systém ShopTurn

ShopTurn je označení programového modulu pracujícího na základě řídicího systému Sinumerik, určeného pro obsluhu a programování CNC soustružnických strojů. Systém ShopTurn se vyznačuje pohodlnou obsluhu CNC stroje a oproti programování v tzv. G-kódech značně ulehčuje a zkracuje cyklus tvorby NC programu. Na obr. 3.9 je uvedeno uživatelské rozhraní základní obrazovky programu.



Obr. 3.9 Uživatelské rozhraní základní obrazovky programu ShopTurn v. 06.04<sup>38</sup>.

- |  |   |
|--|---|
| 1 - Aktivní provozní režim,                | 9 - Zobrazování aktivních posunutí počátku, |
| 2 - Řádek alarmových hlášení,              | 10 - Pracovní okno,                         |
| 3 - Název programu,                        | 11 - Dialogový řádek pro doplňkové info.,   |
| 4 - Cesta programu,                        | 12 - Vodorovný pruh programových tlačítek,  |
| 5 - Stav kanálu a ovlivňování programu,    | 13 - Svislý pruh programových tlačítek,     |
| 6 - Provozní hlášení kanálu,               | 14 - Programová tlačítka,                   |
| 7 - Zobrazení poloh os,                    | 15 - Tlačítka u obrazovky.                  |
| 8 - Informace o nástroji, posuvu, vřetenu, |   |

Při samotné tvorbě obráběcích drah se struktura programu rozděluje na hlavičku, programové bloky a konec programu (viz obr. 3.10). Do hlavičky programu se zadávají parametry, které jsou následně v platnosti pro celý program (rozměry polotovaru, návratové roviny, max. otáčky vřetena, atd.). Jednotlivé kroky obrábění jsou definovány v programových blocích, které mohou obsahovat technologické bloky, polohovací bloky a bloky kontury. Technologické bloky určují typ a formu obrábění (soustružení, navrtávání, vrtání, atd.), zatímco polohovací bloky definují polohy pro vrtání nebo frézování (např. poloha děr). Konturové bloky obsahují grafické prostředí, které umožňuje sestavení kontury tvaru výsledného obrobku, podle níž jsou následně vypočítávány obráběcí dráhy. Konec programu signalizuje stroji ukončení obrábění, popř. může obsahovat informace o počtu obrobků, které se mají obrábět<sup>36</sup>.

Hlavička programu	P	N0	DRIVE_SHAFT						
Programové bloky	N5	Stock removal		▽▽	T=ROUGHING_T80	A F0.25/rev	V240M		
	N10	DRIVE_SHAFT_CONTOUR							
	N20	Stock removal		▽	T=ROUGHING_T80	A F0.3/rev	V240M		
	N15	Resid. cutting		▽	T=FINISHING_T35	A F0.2/rev	V240M		
	N25	Stock removal		▽▽	T=FINISHING_T35	A F0.12/rev	V280M		
Konec programu	N30	Thread long.		▽+▽▽	T=THREADING_T1.5	P1.5mm	S800U		
	END	Program end					N=1		

Obr. 3.10 Obecná struktura programu v systému ShopTurn.

### 3.2.1.2 Tvorba NC programu v systému ShopTurn

Prvním krokem při tvorbě programu bylo vytvoření seznamu nástrojů (obr. 3.11), které budou při obrábění použity. Do seznamu nástrojů se lze dostat přes programová tlačítka *Tools WOs* a následně *Tool list* (vodorovný pruh programových tlačítek). Každý nástroj je definován několika parametry. Jednotlivé parametry jsou pro názornost popsány na obr. 3.12.

Tool list							Coolant 1 on/off		
Loc	Typ	Tool name	DP	1st cutting edge			Insr Lngh	1	2
				Lngh X	Lngh Z	Radius			
1		SDJCL-20-20	1	62.660	47.426	0.400 ←	93.055	11.0	QX
2		SVJCL-20-20-C5	1	70.713	47.604	0.400 ←	93.035	15.0	QX
4		NAVRTAVAK_CNC	1	0.000	86.799	9.500	90.0		QX
6		VRTAK 10	1	0.000	148.495	10.000	118.0		QX
8		VRTAK-VBD35	1	0.000	178.541	35.000	180.0		QX
10		SDUCL_CISTO	1	-10.774	101.820	0.400 ←	93.055	5.0	QX
11		SDUCL-HRUBOVAT	1	-8.362	102.470	0.800 ←	93.055	7.0	QX

Obr. 3.11 Seznam nástrojů.

pozice nástroje v nástrojové hlavě

typ řezného nástroje a poloha břitu

název nástroje

duplo číslo - číslo náhradního nástroje

korekční parametry nástroje  
- délka nástroje ve směru X  
- délka nástroje ve směru Z  
- zaoblení špičky nástroje/ø nástroje

Loc	Typ	Tool name	DP	1st cutting edge				Insrt	#
				Lngth X	Lngth Z	Radius		Lngth	12
1		SDJCL-20-20	1	62.660	47.426	0.400	93.055	11.0	X

směr příjezdu nástroje

úhel nastavení hlavního ostří

úhel špičky nástroje

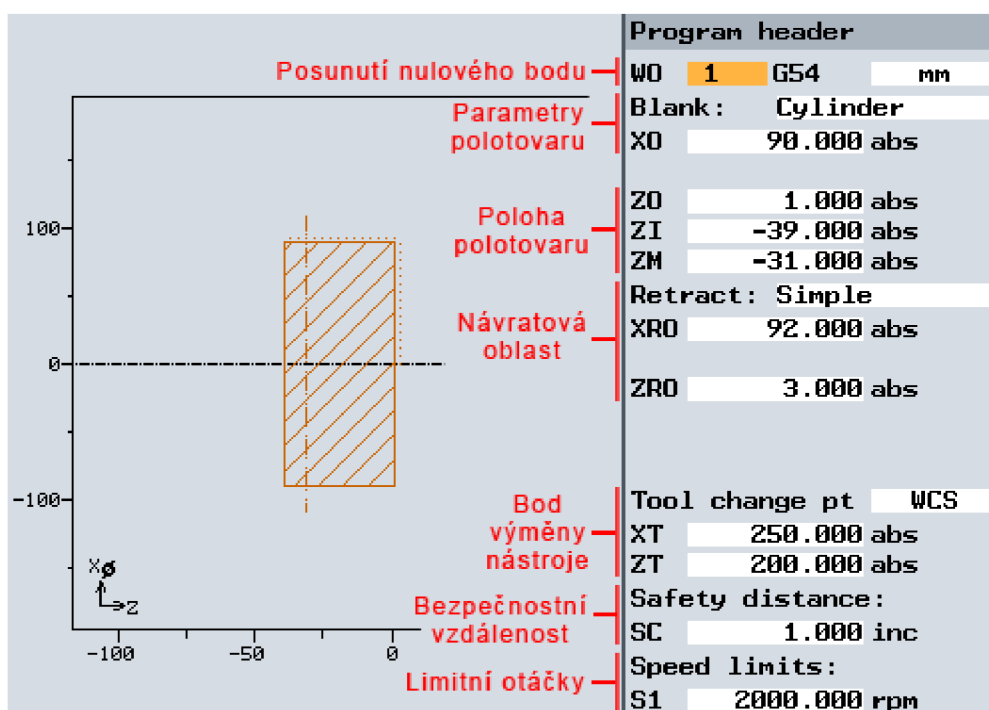
délka ostří

smysl otáčení vřetena

zapnutí/vypnutí přívodu procesní kapaliny

Obr. 3.12 Popis parametrů definujících nástroj.

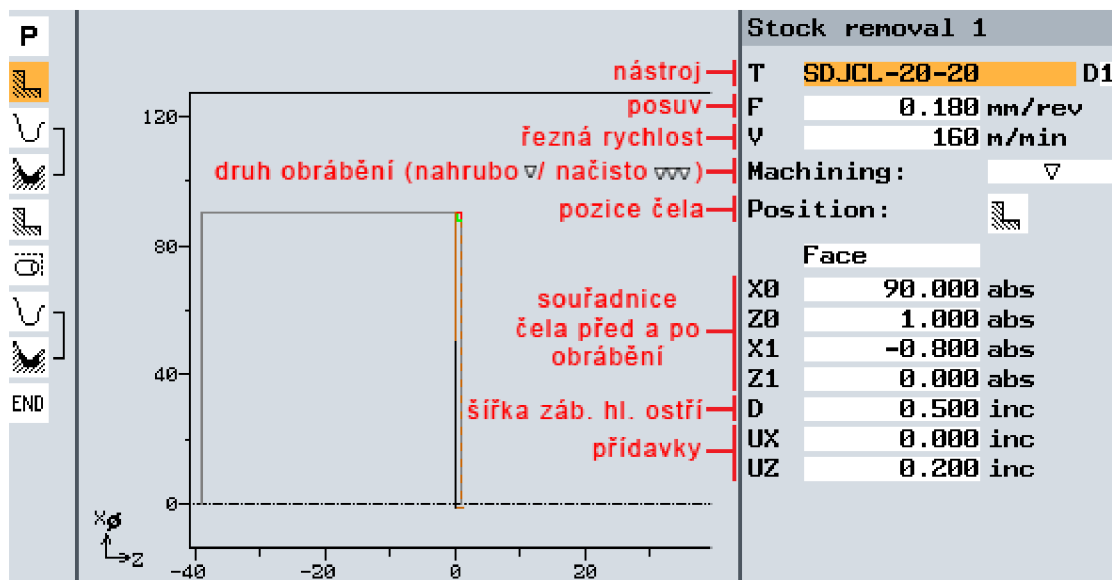
Po definování všech potřebných nástrojů se již mohlo přikročit k programování obráběcích drah. Součást je soustružena na dvě upnutí, takže byly vytvořeny dva samostatné programy pro každé upnutí. Přes tlačítko *Program* lze přejít do adresáře, kde byla vytvořena nová složka "PRIRUBA.WPD" a v ní nový ShopTurn program s názvem "01\_PRIR.MPF". V prvním kroku byla nadefinována hlavička programu, jejíž parametry jsou popsány na obr. 3.13.



Obr. 3.13 Hlavička prvního programu.

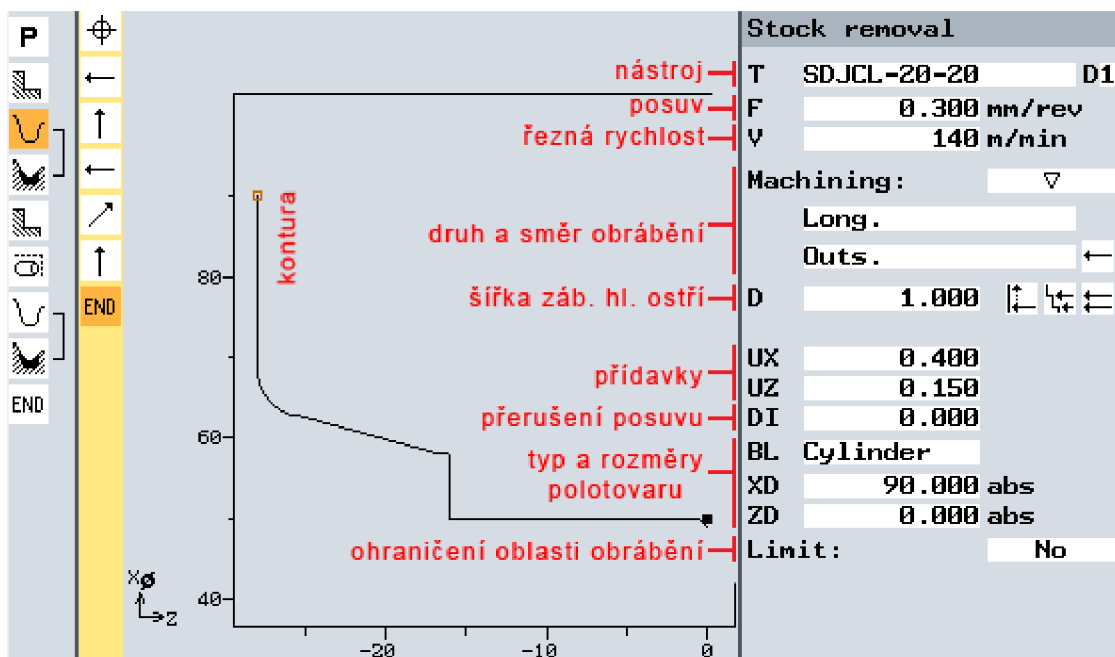


Následně byly vytvořeny jednotlivé programové bloky definující obráběcí dráhy. Zarovnání čela bylo naprogramováno pomocí funkce *Turning* a cyklu *Stock removal* (obr. 3.14).



Obr. 3.14 Zarovnání čela (Turning - Stock removal).

Dalším úsekem je soustružení vnější kontury nahrubo. Zde byla využita funkce *Contour turning*. Nejprve bylo nutné podle výkresu vytvořit konturu profilu součásti a následně byl opět aplikován cyklus *Stock removal*, kde byly nadefinovány parametry obrábění (obr. 3.15).



Obr. 3.15 Hrubování kontury (Contour turning - New contour + Stock removal).



V dalším kroku byly programovány dokončovací operace. Nejprve bylo načisto zarovnáno čelo a následně načisto soustružena kontura. Postup programování byl analogický s návrhem předchozích technologických bloků včetně stejné kontury. Změněny byly pouze parametry jednotlivých cyklů (viz obr. 3.16).

a) Stock removal 1	b) Stock removal
T SVJCL-20-20-C5 D1	T SVJCL-20-20-C5 D1
F 0.120 mm/rev	F 0.120 mm/rev
V 180 n/min	V 220 n/min
Machining: <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Machining: <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Position: <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Long. <input type="text"/>
Face <input type="text"/>	Outs. <input type="text"/>
X0 50.000 abs	Allowance: <input type="checkbox"/> No
Z0 0.200 abs	Limit: <input type="checkbox"/> No
X1 -0.800 abs	
Z1 0.000 abs	

Obr. 3.16 Nastavené parametry cyklu Stock removal.

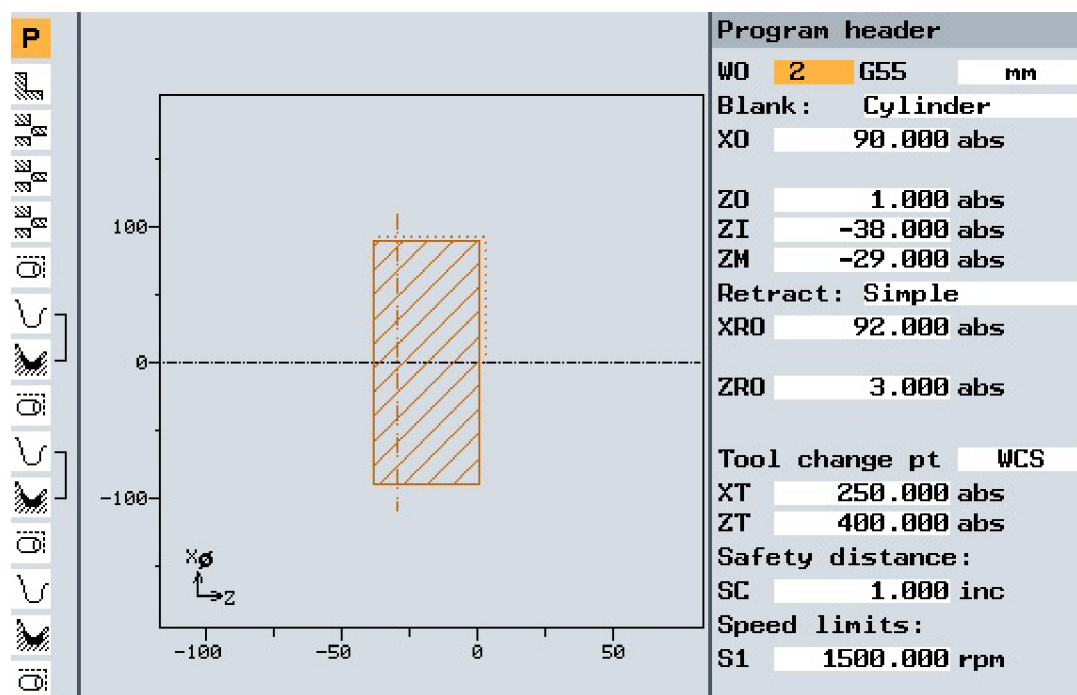
a) zarovnání čela načisto, b) soustružení kontury načisto.

Aby bylo možné aplikovat na dokončovací operace vyšší řezné rychlosti, byl ještě před cyklus soustružení kontury načisto vložen blok, kde se nastavilo zvýšení limity otáček z  $2000 \text{ min}^{-1}$  na  $3500 \text{ min}^{-1}$  (funkce *Various - Settings*). Na obr. 3.17 je uvedena kompletní struktura prvního programu.

01_PRIR			
P	N5	01_PRIR	Work offs 1 G54
	N10	Stock removal	T=SDJCL-20-20 F0.18/rev V160M Face
	N15	TVAR	
	N20	Stock removal	T=SDJCL-20-20 F0.3/rev V140M
	N45	Stock removal	T=SVJCL-20-20-C5 F0.12/rev V180M Face
	N50	Setting	S1=3500
	N35	TVAR	
	N25	Stock removal	T=SVJCL-20-20-C5 F0.12/rev V220M
END		Program end	N=1

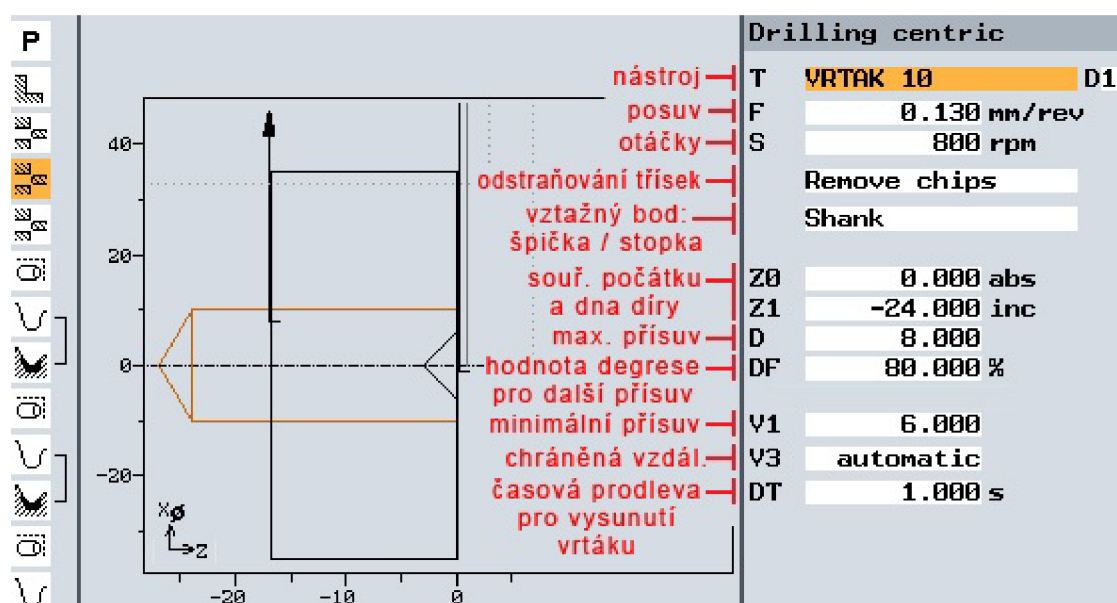
Obr. 3.17 Struktura prvního programu (obrobení první strany).

Následovalo zhotovení programu pro obrábění příruby z druhé strany. Ve stejné složce "PRIRUBA.WPD" byl vytvořen druhý ShopTurn program s názvem "02\_PRIR.MPF". Jako první krok musela být opět nadefinována hlavička programu se všemi potřebnými parametry (viz obr. 3.18 - význam jednotlivých parametrů byl již popsán na obr. 3.13 u prvního programu). U bodu výměny nástroje musela být zvolena větší hodnota Z souřadnice (ZT = 400 mm), protože při obrábění druhé strany příruby byly aplikovány také nástroje s axiálním vyložení (vnitřní soustružnické nože a vrtáky). Bez tohoto opatření by došlo při výměně nástroje (otočení nástrojové hlavy) ke kolizi nástroje s obrobkem.

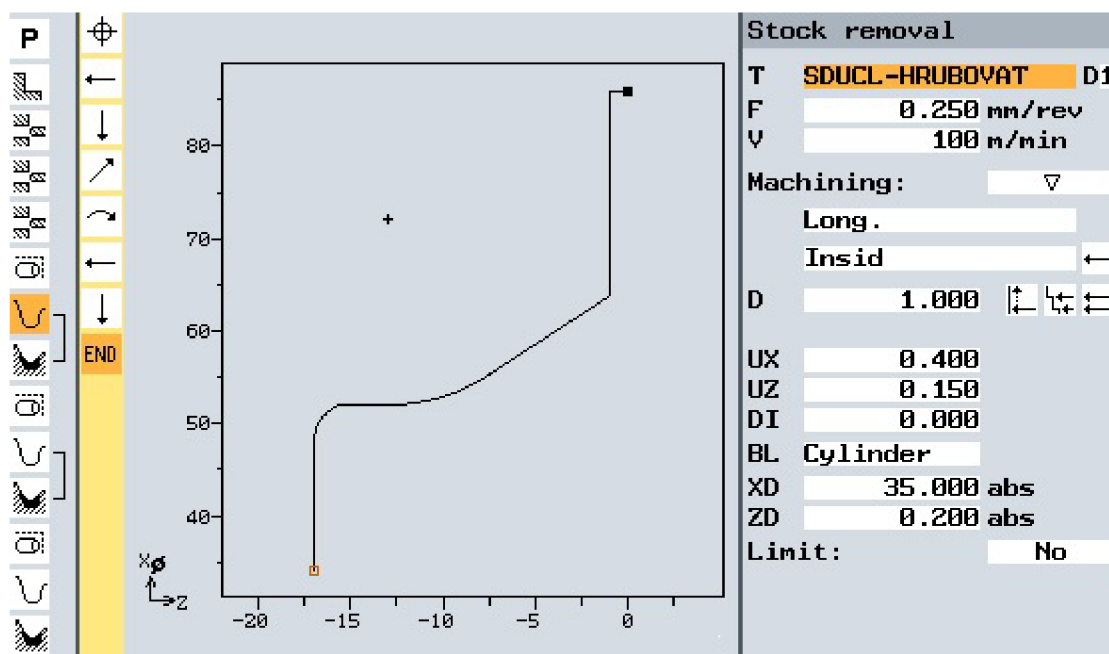


Obr. 3.18 Hlavička druhého programu.

Stejně jako v předchozím programu, bylo nejdříve zarovnáno čelo pomocí cyklu *Stock removal*. V dalších třech operacích byly aplikovány operace vrtání zahrnující navrtání středícího důlku, předvrtání díry  $\varnothing 10$  mm, kterou se zároveň vytvořila díra na dně příruby a nakonec vrtání díry  $\varnothing 35$  mm, která zajišťuje dostatečný prostor pro vnitřní soustružnické nože využitě v následujících operacích. Vrtací operace byly programovány pomocí funkce *Drilling* a cyklu *Drilling centric*. Na obr. 3.19 jsou uvedeny a popsány parametry pro operaci vrtání  $\varnothing 10$  mm, kde byla aplikována funkce odstraňování třísek opakovaným vyjížděním vrtáku z díry.

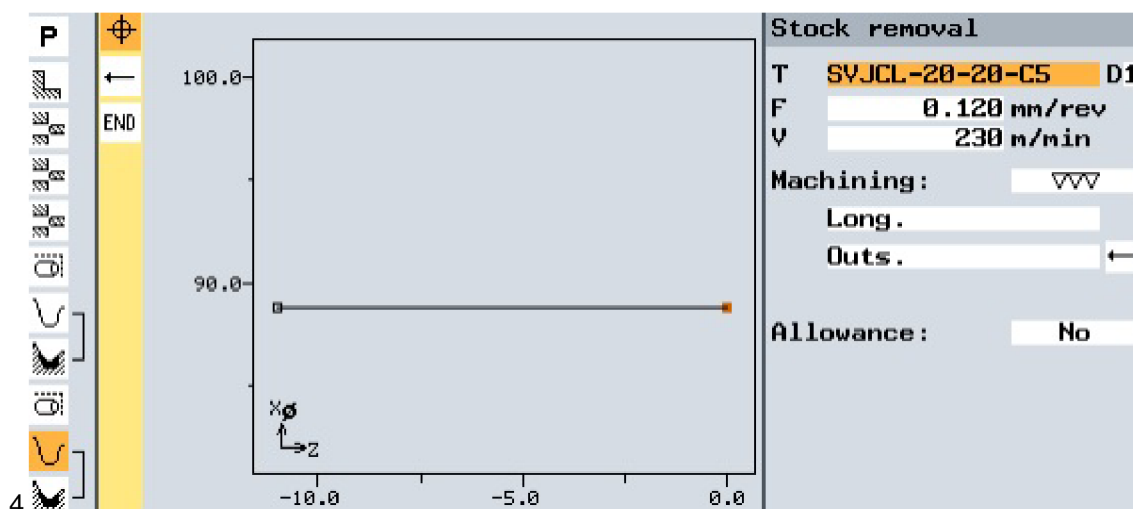
Obr. 3.19 Vrtání díry  $\varnothing 10$  mm (*Drilling - Drilling centric*).

Následně byl v bloku *Setting* snížen limit otáček na  $1000 \text{ min}^{-1}$  a změněna návratová oblast. Na řadu přišlo naprogramování soustružení vnitřní kontury nahrubo. Nejprve byla vytvořena kontura vnitřní dutiny příruby a poté byl aplikován cyklus *Stock removal*, kde byly nadefinovány parametry vnitřního soustružení (obr. 3.20).



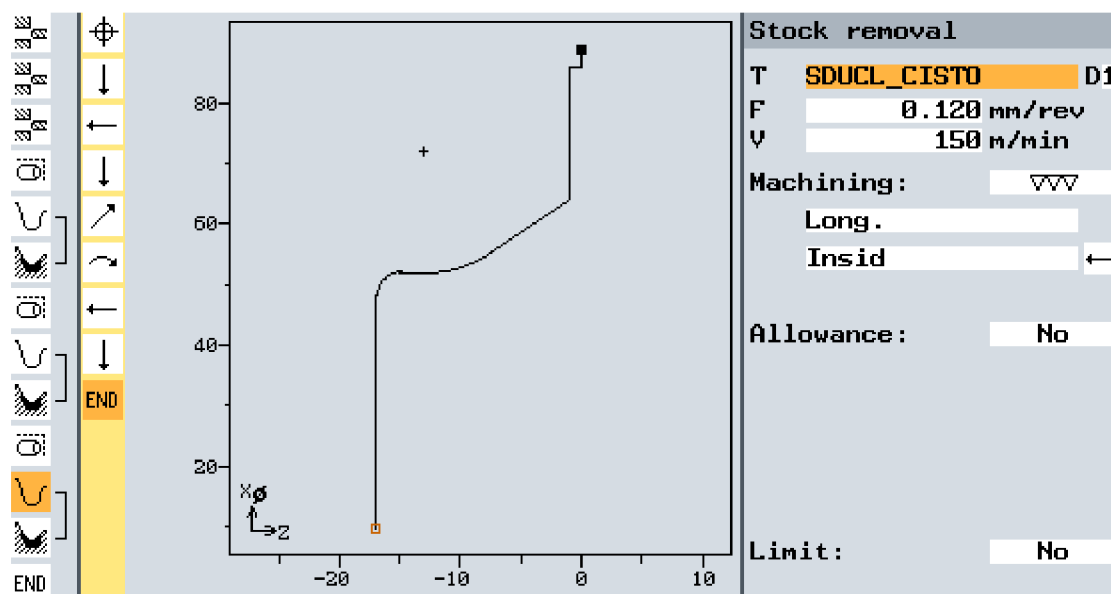
Obr. 3.20 Hrubování kontury (*Contour turning - New contour + Stock removal*).

Jako první z dokončovacích operací bylo soustružení obvodu příruby načisto. Nejprve byl zvýšen limit otáček na  $3000 \text{ min}^{-1}$  a poté byla opět vytvořena kontura v podobě jednoduché horizontální úsečky polohované v souřadnici  $X = 88,8 \text{ mm}$ . Zbylých  $0,2 \text{ mm}$  slouží jako přídavek pro frézovací operace. Samotné obrobení obvodu načisto bylo realizováno znovu cyklem *Stock removal*, ale tentokrát šlo o vnější soustružení (obr. 3.21).



Obr. 3.21 Dokončení obvodu (*Contour turning - New contour + Stock removal*).

Druhou a poslední dokončovací operací je soustružení vnitřní kontury načisto. Opět byla nejprve změněna návratová oblast a limit otáček na  $2000 \text{ min}^{-1}$ . Kontura osazení na čele příruby, které bylo hrubováno již při zarovnání čela a tudíž nebylo v kontuře pro hrubování zahrnuto. Stejně jako v předchozích případech byl pro obrábění aplikován cyklus *Stock removal* (obr. 3.22). Dalším a posledním blokem je již jen konec programu. Na obr. 3.23 je uvedena kompletní struktura druhého programu uzavírajícího návrh soustružnických drah.

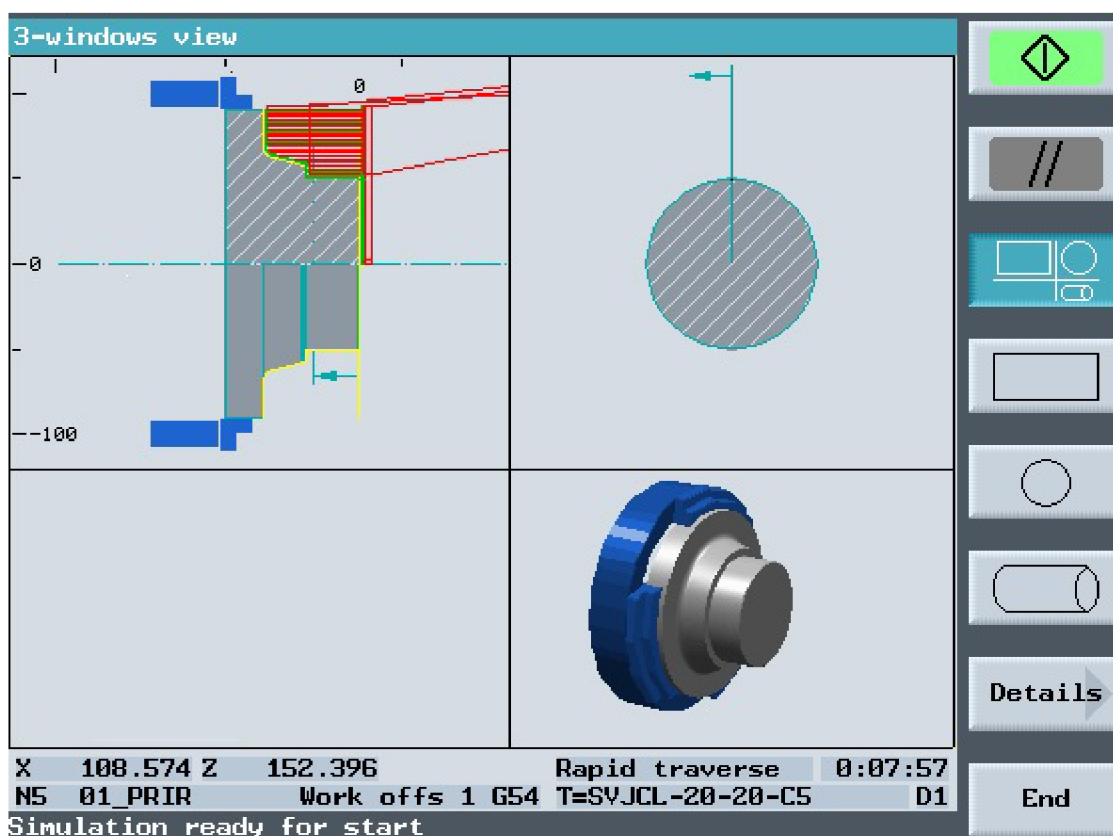


Obr. 3.22 Dokončení kontury (*Contour turning - New contour + Stock removal*).

02_PRIR			
P	N5	02_PRIR	Work offs 1 G54
	N10	Stock removal	T=SDJCL-20-20 F0.2/rev V160M Face
	N175	Drilling centric	T=NAVRTAVAK_CNC F0.12/rev S1000rev.
	N170	Drilling centric	T=VRTAK 10 F0.13/rev S800rev. Z0=0
	N45	Drilling centric	T=VRTAK-VBD35 F0.15/rev S333rev.
	N60	Setting	Retract S1=1000
	N50	DIRA	
	N55	Stock removal	T=SDUCL-HRUBOVAT F0.25/rev V100M
	N100	Setting	S1=3000
	N155	VNEJSI	
	N160	Stock removal	T=SVJCL-20-20-C5 F0.12/rev V230M
	N110	Setting	Retract S1=2000
	N105	DIRA1	
	N30	Stock removal	T=SDUCL_CISTO F0.12/rev V150M
END		Program end	N=1

Obr. 3.23 Struktura druhého programu (obrobení druhé strany).

System ShopTurn obsahuje i nástroj pro simulaci obráběcího procesu. Jedná se o grafické prostředí, kde jsou v závislosti na čase interpretovány všechny programové bloky včetně vykreslení břitu nástroje a jednotlivých obráběcích drah. Simulace je vhodná pro optimalizaci programu a kontrolu kolizí nástroje s obrobkem či s upínačem. Je zde i orientačně zobrazen průběžný čas výroby. Výrobní časy budou podrobněji rozebrány v kapitole Technicko-ekonomické zhodnocení. Na obr. 3.24 je uvedena ukázka simulačního prostředí při simulaci prvního programu s kombinovaným 2D a 3D zobrazením včetně zobrazení libovolně definovaného průřezu.



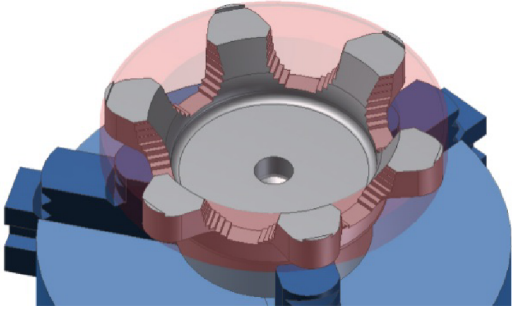
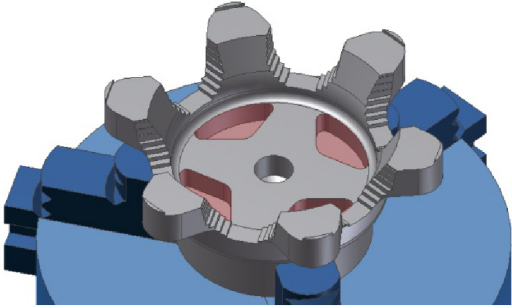
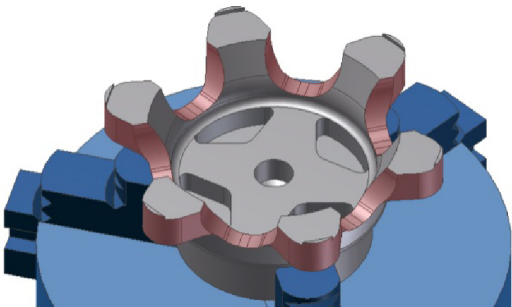
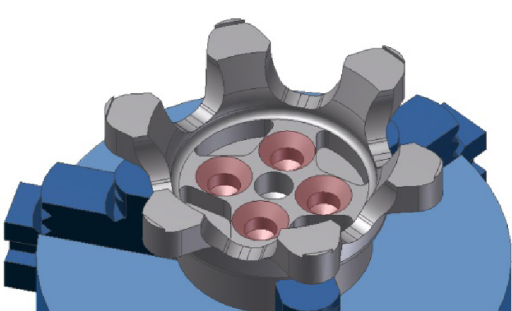
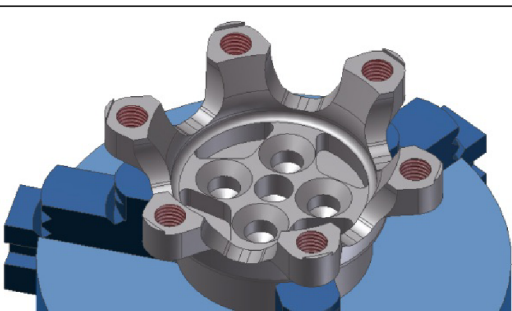
Obr. 3.24 Simulace prvního programu.

### 3.2.2 Návrh frézovacích strategií

Po dokončení návrhu soustružnických operací následoval návrh frézovacích drah. Součást bude upnuta, stejně jako v předchozím případě, do tříčelistového sklíčidla za upínací válcovou plochu vytvořenou v první soustružnické operaci. Stejně jako u soustružení, je i zde nejprve uveden orientační výrobní postup frézovacích a vrtacích úseků včetně grafického zobrazení obrobku a odebíraného materiálu (viz tab. 3.2). Kompletní výrobní postup s podrobnějšími informacemi o jednotlivých obráběcích úsecích výroby je uveden v příloze 3. K návrhu frézovacích strategií byla již použita CAM technologie, čímž byl významně zkrácen čas technologické přípravy výroby.



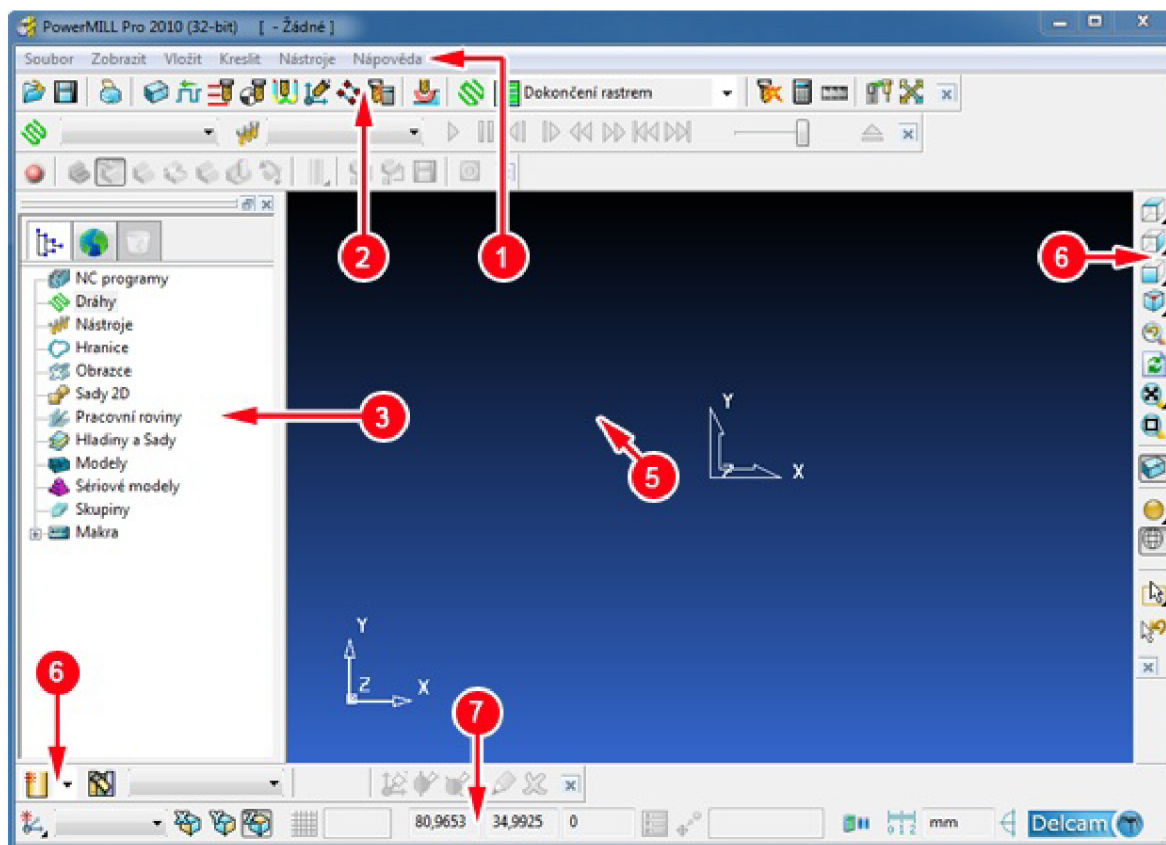
Tab. 3.2 Orientační výrobní postup frézovací části výroby.

č. op./ús.	popis práce	vyznačení odebíraného materiálu
5/1	Upnout do sklíčidla za $\varnothing$ 50 mm.	
5/2	Frézovat boční drážky nahrubo.	
5/3	Frézovat boční drážky - zbytkové obrábění nahrubo.	
5/4	Frézovat kapsy na dně nahrubo	
5/5	Frézovat kapsy na dně - zbytkové obrábění načisto.	
5/6	Frézovat obvod a boční drážky načisto.	
5/7	Vrtat 4 x díru $\varnothing$ 8,4 mm do vzdálenosti 9 mm.	
5/8	Vrtat 4 x zahloubení 3 x 45°.	
5/9	Vrtat 6 x díru $\varnothing$ 6,8 mm skrz.	
5/10	Řezat 6 x závit M8.	
6/1	Ručně odstranit ostřiny a zkontrolovat rozměry.	



### 3.2.2.1 Systém PowerMILL

PowerMILL je název CAM softwaru společnosti Delcam, který je určen pro programování tříosých a víceosých CNC frézovacích strojů a frézovacích center. Primární zaměření tohoto systému spočívá ve frézování tvarových ploch, ale je vybaven i rozšířenými možnostmi 2.5D frézování. Pro návrh frézovacích strategií aplikovaných při výrobě příruby náboje zadního kola byla zvolena verze PowerMILL 2010. Základní pracovní prostředí tohoto programu je uvedeno na obr. 3.25.<sup>39</sup>



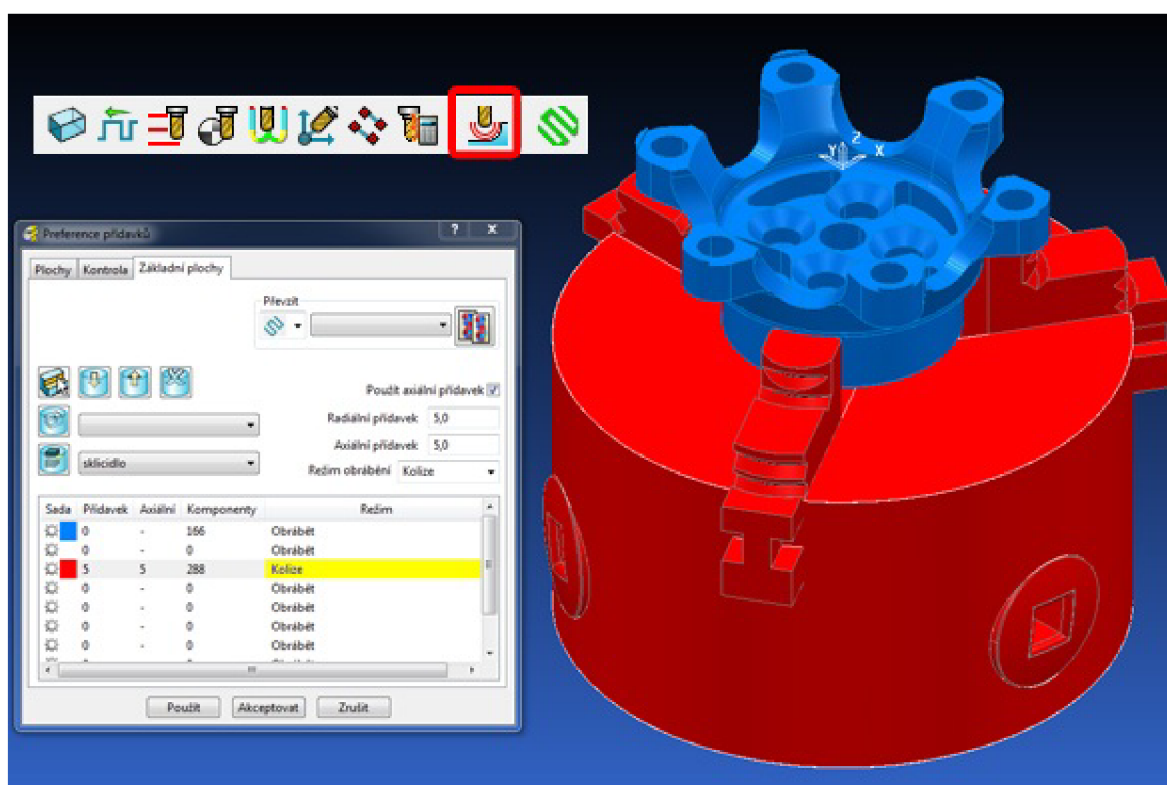
Obr. 3.25 Pracovní prostředí programu PowerMILL 2010.

Jednotlivé oblasti pracovní plochy jsou následující<sup>40</sup>:

- 1) Panel menu - souhrn asociovaných příkazů pro danou skupinu nástrojů,
- 2) Hlavní lišta - rychlý přístup k nejpoužívanějším příkazům,
- 3) Prohlížeč - stromový seznam umožňující správu jednotlivých entit,
- 4) Lišta nástroje - vytváření nástrojů a jejich správa,
- 5) Grafické okno - pracovní plocha programu,
- 6) Panel pohledů - rychlý přístup k nastavení pohledu a způsobu vykreslení,
- 7) Informační panel - poskytuje nápovědu k aktivním příkazům.

### 3.2.2.2 Návrh frézovacích strategií v systému PowerMILL

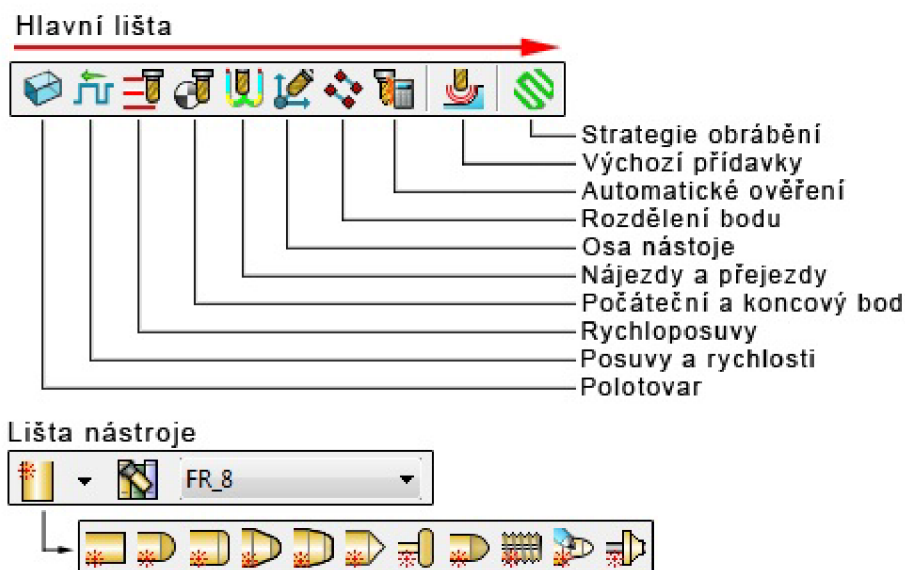
Po otevření nového projektu bylo zapotřebí importovat model, který reprezentuje finální podobu ofrézované součásti. Již dříve vytvořený model příruby musel být doplněn o pomocnou upínací válcovou část a exportován do formátu STEP. PowerMILL obsahuje integrovanou aplikaci Delcam Exchange, pomocí které byl STEP soubor převeden do formátu DGK, který je již tímto CAM softwarem podporován. Jelikož byla součást modelována už s ohledem na polohu při obrábění, není třeba ji v pracovní ploše nijak transformovat, protože po importu modelu je souřadný systém součásti shodný s globálním souřadným systémem v programovém prostředí. Kromě modelu součásti byl vytvořen i model upínače, kterým je tříčelisťové sklíčidlo. Ten byl do projektu importován také, ale tentokrát musel být pomocí transformačních nástrojů (vybrat plochy - *Upravit* - *Transformovat*) napolohován vůči obrobku tak, aby vzájemná poloha odpovídala reálnému upnutí. Dále bylo nutné všechny plochy upínače vložit do samostatné hladiny a přejít do nástroje *Výchozí přídávky* (hlavní lišta), kde byla tato hladina zařazena do režimu kolize a byly u ní nastaveny radiální i axiální přídávky (obr. 3.26). Díky tomuto opatření nebude při návrhu obráběcích strategií upínač zahrnut do ploch určených k obrábění a dráhy budou generovány tak, aby nedocházelo ke kolizi.



Obr. 3.26 Importované modely součásti a upínače a nastavení přídávku upínače.

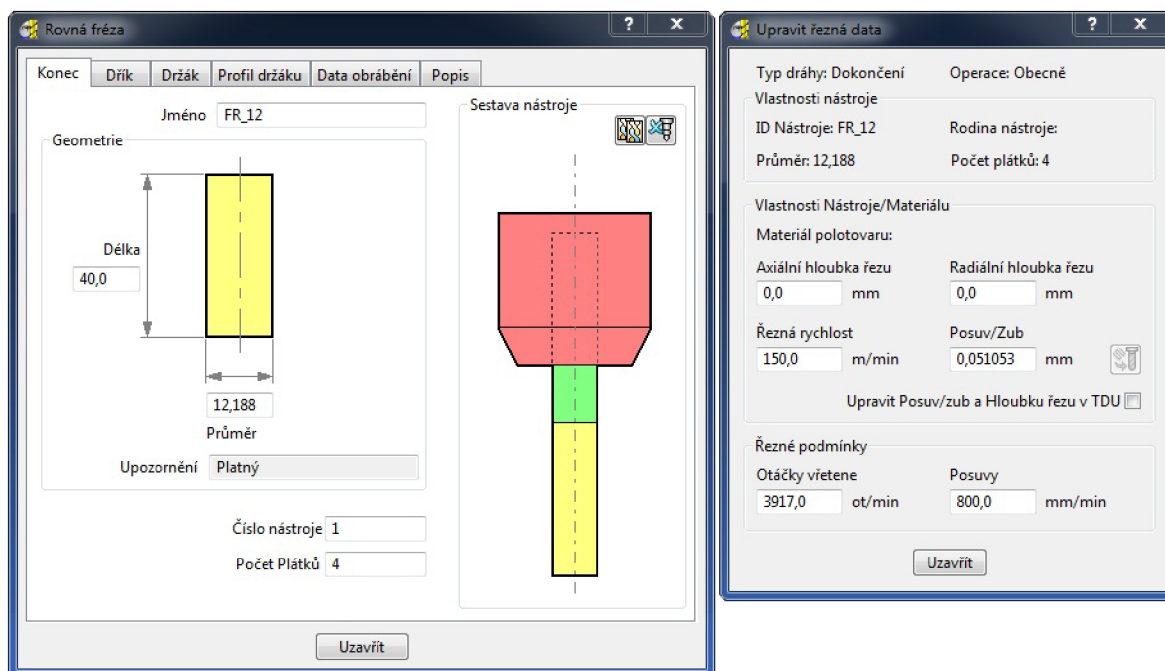
Při navrhování samotných obráběcích drah se většinou postupuje systematicky podle uspořádání nástrojů v hlavní liště a to zleva doprava (obr. 3.27). Výjimkou je definování nástroje, které se provádí pomocí tzv. *Lišty nástroje*, která je samostatně oddělená a primárně se nachází v dolní části obrazovky. Po prvním nastavení

jednotlivých parametrů se hodnoty zachovávají i pro následující obráběcí strategie a proto ty, které zůstávají stejné, není potřeba pokaždé definovat znovu. V novějších verzích programu PowerMILL (včetně verze 2010) lze všechny nástroje z hlavní lišty nalézt také přímo v okně definice jednotlivých obráběcích strategií.



Obr. 3.27 Hlavní lišta s vyznačeným směrem postupu a lišta nástroje.

Po importu modelů se již mohlo přistoupit k návrhu obráběcích strategií. Prvním operačním úsekem je frézování boční drážky nahrubo. Nejprve byl vytvořen nástroj, kterým je stopková čelní válcová fréza  $\varnothing 12$  mm. Na obr. 3.28 je na ukázkou pro tento první případ uvedeno okno, v kterém se parametry nástroje definují.

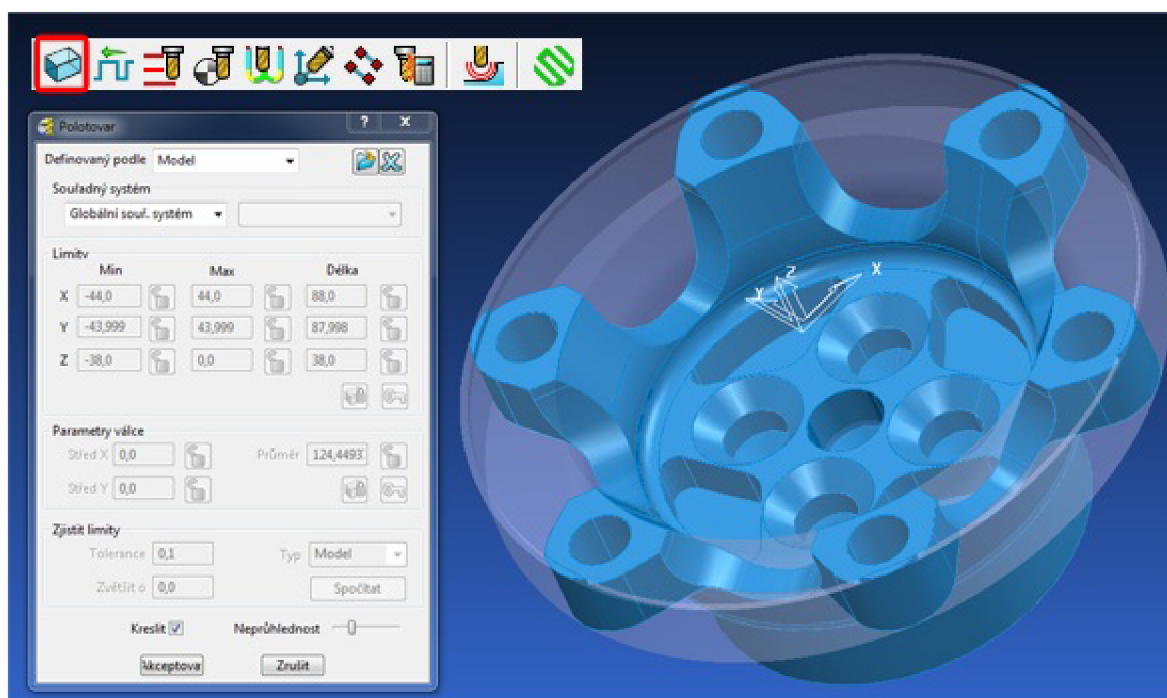


Obr. 3.28 Definice nástroje - čelní válcová fréza s rovným čelem  $\varnothing 12$  mm.

V liště nástroje byla zvolena jakožto nový nástroj fréza s rovným čelem a následně byly nadefinovány rozměry řezné části nástroje, dřívku a držáku. V kartě *Data obrábění* byly nastaveny řezné podmínky pro daný nástroj. Pro zvýšení přesnosti obrábění, byly nejprve změřeny reálné hodnoty průměrů jednotlivých fréz a při definování nástroje byl průměr zadáván již s průměrovými korekcemi a to s přesností na tisícinu milimetru. Podrobnosti o měření geometrie nástroje jsou uvedeny v následující kapitole zabývající se výrobou prototypu příruby náboje zadního kola.

V dalším kroku byla vytvořena nová pracovní rovina, která měla počátek souřadného systému posunutý oproti globálnímu o -1 mm ve směru osy Z. Globální souřadný systém leží v maximální Z souřadnici polotovaru, která je ale určená pouze úzkou obvodovou obrubou, na které by se pomocí sondy obtížně nastavoval nulový bod při budoucím obrábění. V nové pracovní rovině leží rozměrnější čelní plocha, na které se nulový bod bude nastavovat pohodlněji.

Dále byl nastaven polotovaz. Znovu bylo třeba zkonstruovat 3D model v podobě obrobku vzniklého po soustružnických operacích, jenž reprezentuje polotovaz pro frézovací operace. Ten byl opět exportován do STEP formátu a následně importován do programu PowerMILL jako polotovaz typu model (obr. 3.29).



Obr. 3.29 Definice polotovaru typu model.

Po definici polotovaru byly zadány řezné podmínky v kartě *Posuvy a rychlosti*. Hodnoty řezných podmínek byly automaticky nastaveny podle aktivního nástroje, u kterého byly definovány již při jeho tvorbě. V okně *Rychloposuvy* byly nastaveny Z výšky určující prostor, kde se může nástroj bezpečně pohybovat. *Bezpečná Z výška* (výška, ve které se nástroj pohybuje bezpečně rychloposuvem) byla nastavena na 11 mm a *Počáteční Z výška* (výška, na kterou nástroj klesne před spuštěním obráběcího posuvu) byla nastavena na hodnotu 6 mm. *Počáteční a koncový bod* obráběcí strategie byl nastaven v počátku roviny XY a v bezpečné

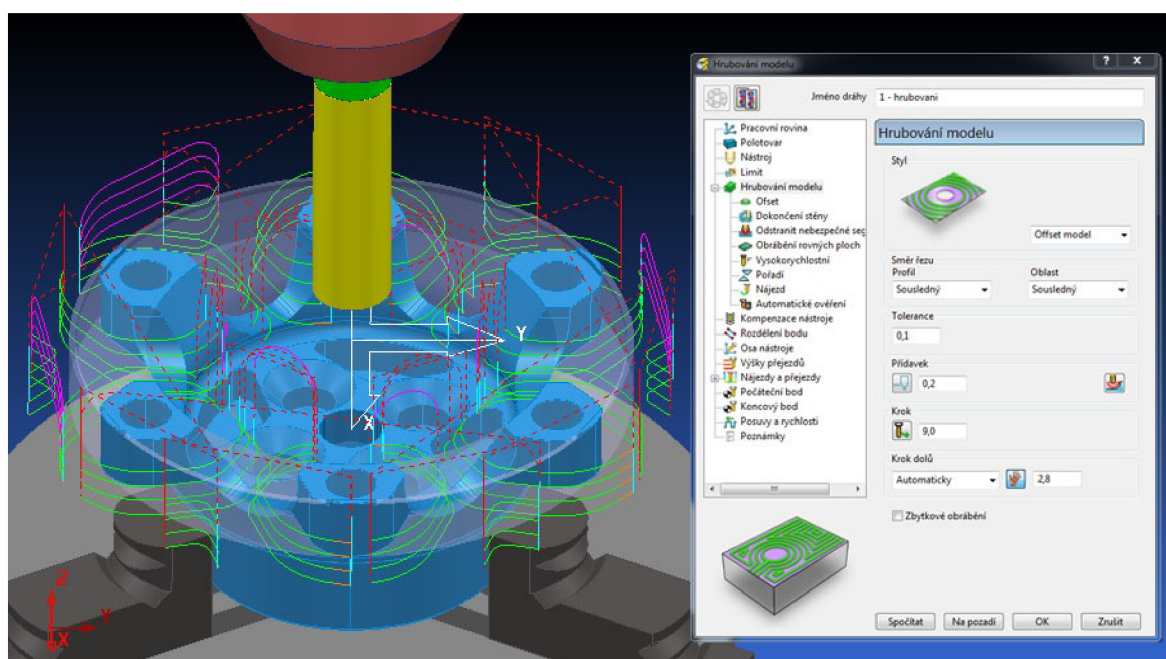


Z výše nastavené v předchozím kroku. Velmi významným optimalizačním krokem, který má zásadní vliv na celkový čas jednotlivých obráběcích strategií, je nastavení tabulky *Nájezdy a přejezdy*. Důležitá je zejména karta *Propojení*, kde se definuje, jakým způsobem budou jednotlivé obráběcí dráhy propojeny (obr 3.30).

Poslední výjezd	Protažení	Propojení
Krátký/Dlouhý rozliš. 10,0	Krátké Obloukem	Dlouhý Nejkratší
Odjezd a sjezdový pohyb Podél Tangenta	Výchozí Ochrana	<input checked="" type="checkbox"/> Oblouky rychloposuvů
<input checked="" type="checkbox"/> Automatické prodloužení Maximální délka 250,0	Rádus oblouku (TDU) 0,5	

Obr. 3.30 Nastavení propojení obráběcích drah v tabulce *Nájezdy a přejezdy*.

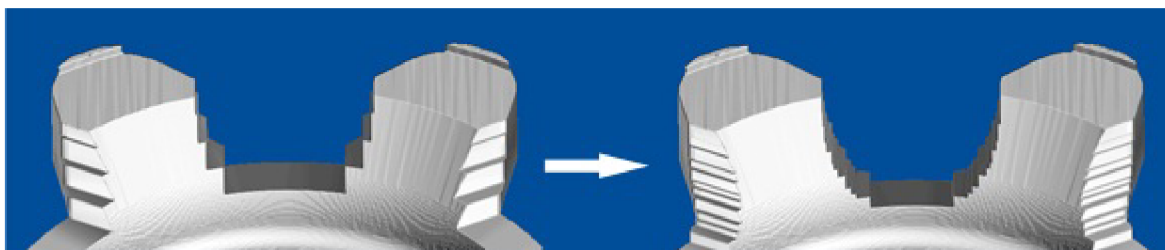
V další tabulce *Osa nástroje* bylo nastaveno, že osa frézy má vzhledem k souřadnému systému pouze vertikální orientaci, protože frézovací stroj neumožňuje náklon vřetena či pracovního stolu, tj. jedná se o tříosou frézku. Poté už se přestoupilo k definování samotných frézovacích drah. V okně *Obráběcí strategie* byl pro první frézovací úsek, tj. frézování bočních drážek nahrubo, zvolena strategie *Hrubování modelu* z karty *3D hrubovací strategie*. Na obr. 3.31 je uvedena tabulka obráběcí strategie s nastavenými hodnotami a grafické znázornění vygenerovaných drah.



Obr. 3.31 Frézování bočních drážek nahrubo (*3D hrubování - Hrubování modelu*).

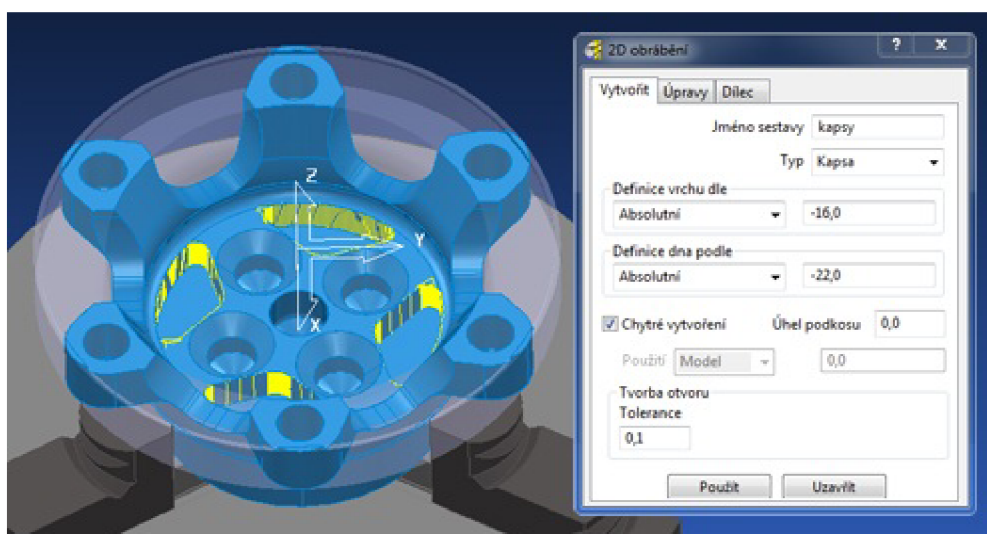
Jako styl hrubování byl zvolen *Offset modelu* se sousledným směrem řezu. Dále byly nastaveny obráběcí tolerance, axiální a radiální kroky a operační přídávky, přičemž v detailnějším nastavení přídavek byly zkopírovány data přídavek pro upínač, která byla definována již dříve. Po vygenerování drah bylo potřeba dráhu ještě upravit a nastavit limitaci pomocí nedefinované Z roviny, což omezilo rozsah frézovacích drah pouze na oblasti bočních drážek.

Následujícím operačním úsekem je zbytkové obrábění bočních drážek nahrubo. Účelem bylo zjemnění schodovitého tvaru bočních drážek, který byl vytvořen v předchozí operaci (viz obr. 3.32). Pro tuto strategii byla jako nástroj zvolena čelní válcová fréza  $\varnothing 8$  mm s rovným čelem. Kromě řezných podmínek byly všechny parametry zachovány z předchozího nastavení a jako obráběcí strategie bylo aplikováno *Zbytkové hrubování modelu* v kartě *3D hrubování*. Jako výchozí dráha pro výpočet zbytkového materiálu byla nastavena předchozí obr. strategie. Změněny byly pouze axiální a radiální kroky a řezné podmínky.



Obr. 3.32 Tvar bočních drážek před a po aplikaci zbytkového obrábění.

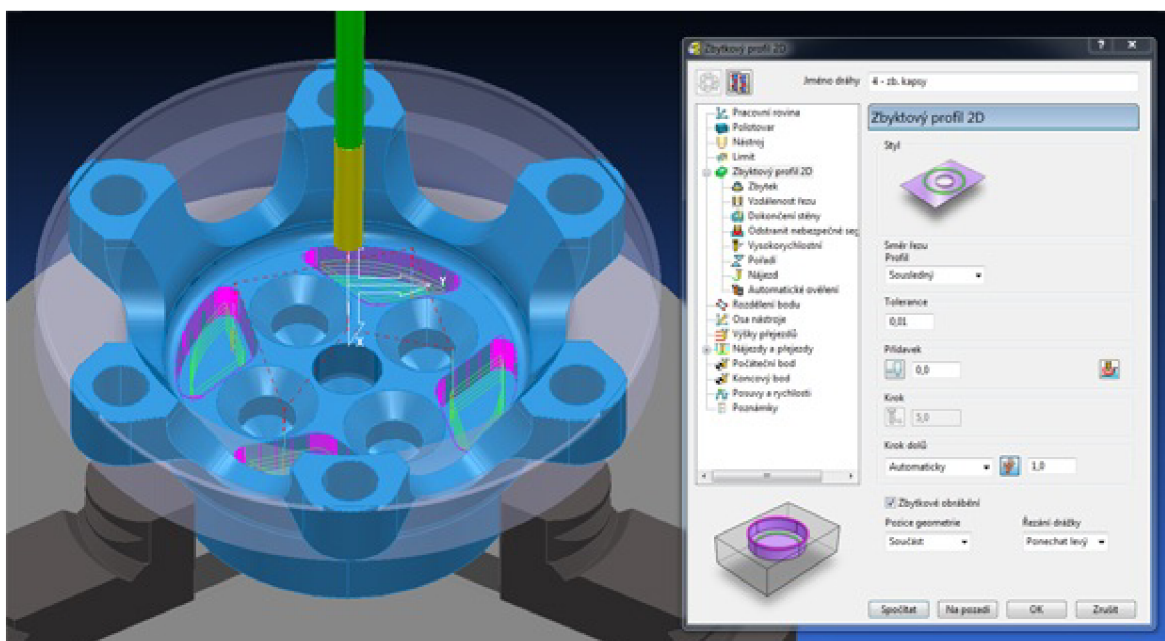
Stejný nástroj byl aplikován i v dalším operačním úseku, kterým je frézování kapes na dně nahrubo. Před nastavením obráběcí strategie byly vytvořeny tzv. 2D sady, které určují výsledný tvar kapes. Tvorba 2D sad probíhá tak, že se na modelu vyberou všechny plochy, které definují dna daných kapes a v okně prohlížeče se zvolí příkaz na tvorbu 2D sad (*Sady 2D - Vytvořit sadu 2D*). Objeví se tabulka, kde se nastaví typ 2D sady (*kapsa*) a Z souřadnice dna a vrchu kapsy (obr. 3.33).



Obr. 3.33 Tvorba 2D sad kapes na dně.

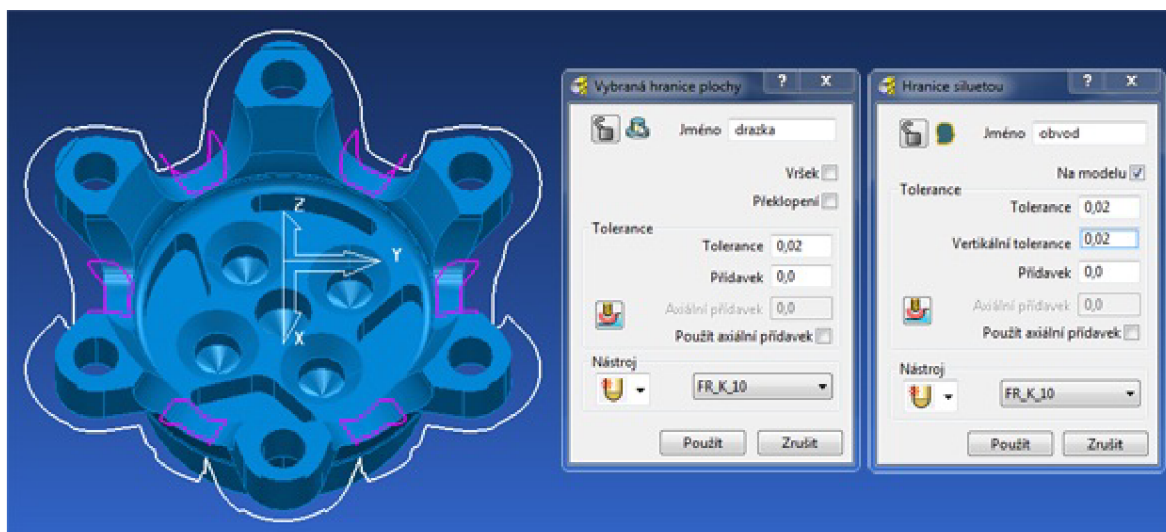


Pro hrubování kapes byla zvolena strategie *2D profil* z karty *2,5D obrábění*. Ostatní parametry nastavení byly opět zachovány. Po vygenerování hrubovacích drah následoval návrh zbytkového obrábění pro dokončení daných kapes. Jelikož nejmenší rádius kapsy je R2, musela být vytvořena nová čelní válcová fréza  $\varnothing$  4 mm. Na tento frézovací úsek byla aplikována frézovací strategie *Zbytkový profil 2D* (obr. 3.34) ze stejné karty jako předchozí strategie, přičemž 2D sada kapes zůstala stále aktivní.



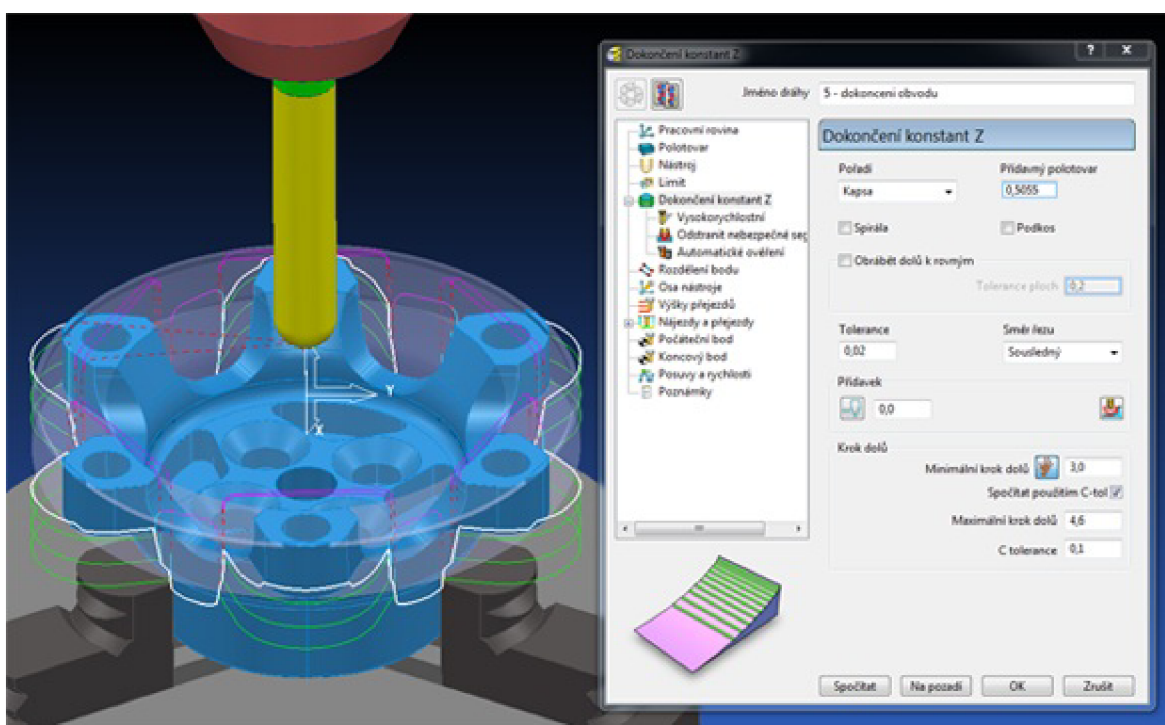
Obr. 3.34 Zbytkové frézování kapes načisto (*2,5D obrábění - Zbytkový profil 2D*).

Posledním frézovacím úsekem je frézování obvodu a bočních drážek načisto. Nejdříve byly navrženy dráhy pro frézování obvodu a poté zvláště frézování drážek načisto. Tento operační úsek byl rozdělen, protože obvod a drážky jsou definovány plochami rozdílného charakteru a na obrobení těchto ploch jsou vhodné rozdílné frézovací strategie. Pro obě strategie byl vytvořen nový nástroj a to kopírovací kulová fréza  $\varnothing$  10 mm. Pro ověření byl v možnostech vykreslení modelu nastaven minimální rádius nástroje 5 mm a poté byl aktivován režim zobrazení *Stínování minimálního rádiusu*. Všechny plochy drážek byly vykresleny zeleně a byla tedy ověřena vhodnost aplikace kulové frézy  $\varnothing$  10 mm na dokončovací obrobení těchto ploch. Pro frézování obvodu není sice kulová fréza optimální, ale danou úlohu splní a navíc se ušetří čas na výměnu nástroje, protože pro následující frézování bočních drážek je kulová fréza nezbytná. Před nastavením frézovací strategie pro frézování obvodu musela být vytvořena hranice, která definuje prostor, ve kterém se může osa nástroje při obrábění pohybovat. Tímto opatřením se omezí rozsah frézovacích drah jen na konkrétní plochy. Hranice byla vytvořena pomocí výběru všech obvodových ploch na modelu a následným příkazem *Vytvořit hranice*, kde byl dále zvolen nástroj a typ hranice (*Siluetu*). Pro dokončení bočních drážek bylo také zapotřebí limitovat obráběcí prostor hranic. Opět byly vybrány všechny plochy, ze kterých se drážky skládají a následně byla, v závislosti na tvaru zvoleného nástroje, vytvořena hranice typu *Vybrané plochy* (viz obr. 3.35).



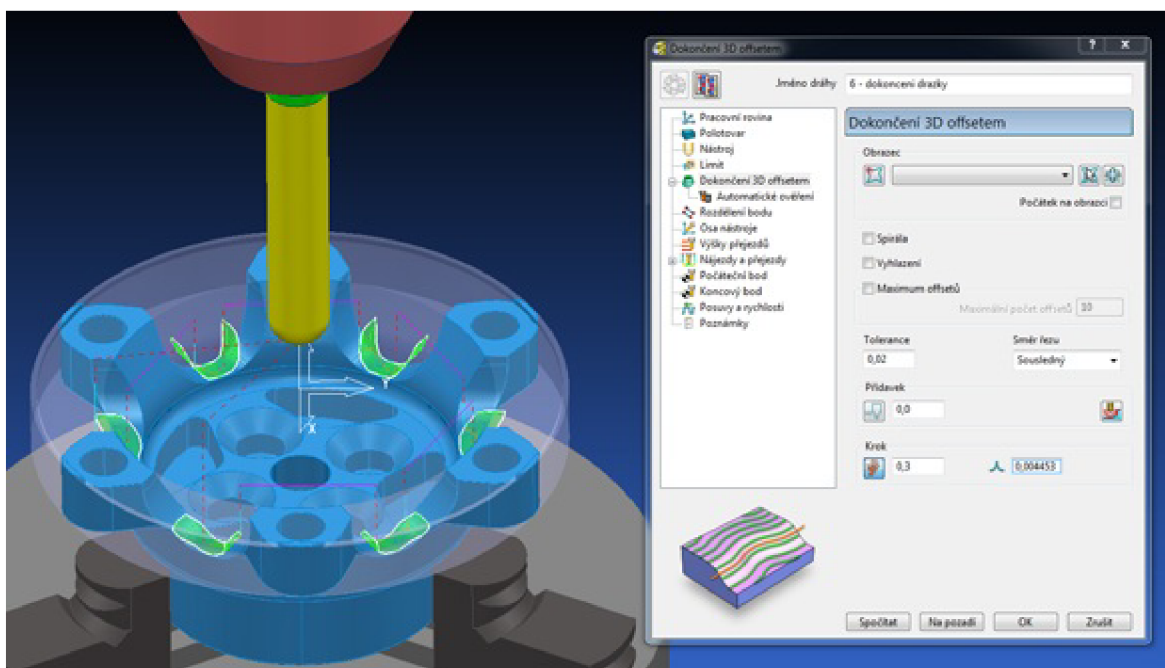
Obr. 3.35 Nastavení hranic pro dokončování obvodu (bílá) a drážek (fialová).

Pro dokončovací frézování obvodu byla jako nejvhodnější zvolena obráběcí strategie *Konstant Z dokončení* (obr. 3.36), protože všechny obvodové plochy jsou orientovány rovnoběžně s osou Z. Po nastavení rezných podmínek byl dále nastaven axiální krok (4,6 mm), tolerance obrábění a hlavně byla v sekci Limit zvolena hranice, jež byla nadefinována v předchozím kroku. Vygenerované obráběcí dráhy bylo třeba dále znovu limitovat v určité výšce Z, aby nezasahovaly i pod požadovanou oblast. Bylo třeba brát v úvahu také tvar kulové frézy a fakt, že špička nástroje musí být polohována o hodnotu jeho poloměru níže, aby byla tříska odebírána obvodem frézy.



Obr. 3.36 Frézování obvodu načisto (*Dokončení - Konstant Z dokončení*).

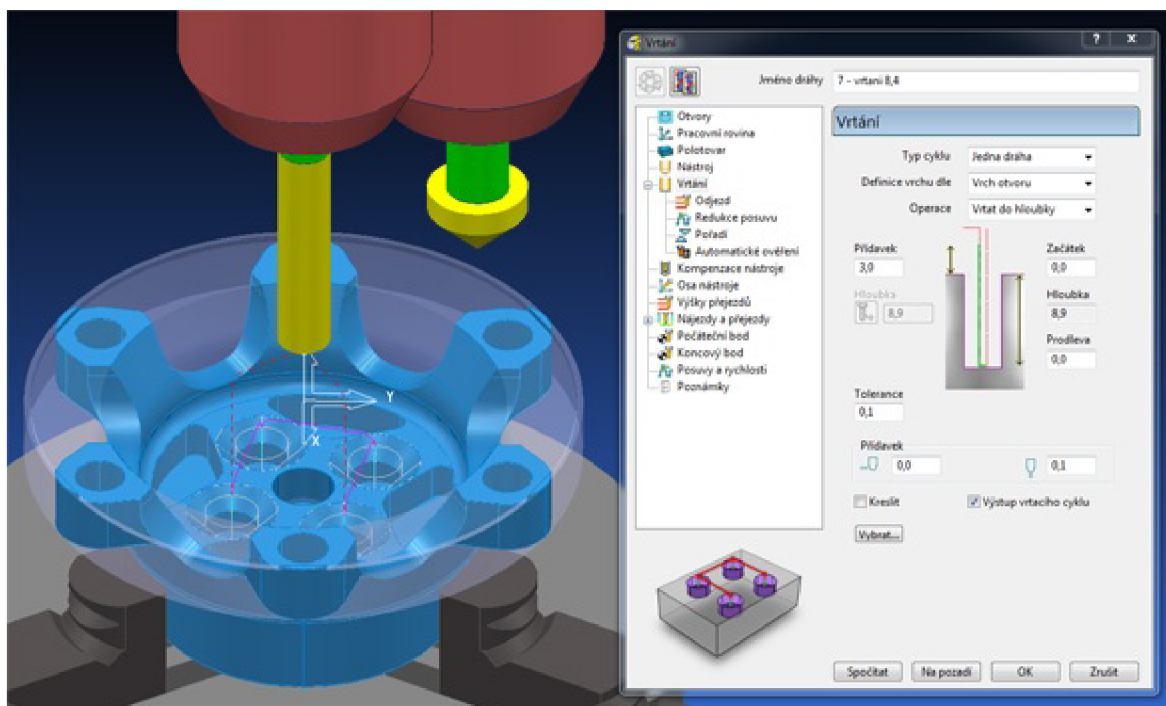
Následovalo nastavení frézovací strategie pro dokončení bočních drážek. Zde byla zvolena strategie *3D ofset dokončení* (obr. 3.37), která patří k nejpoužívanějším dokončovacím strategiím 3D ploch. Jako aktivní nástroj byla zachována kulová fréza  $\varnothing 10$  mm včetně aplikovaných řezných podmínek. Na rozdíl od obrábění obvodu, byly drážky obráběny především čelem kulové frézy. V tabulce nastavení strategie byl nastaven radiální krok nástroje (0,3 mm), který určuje výslednou drsnost obrobeného povrchu.



Obr. 3.37 Frézování bočních drážek načisto (*Dokončení - 3D ofset dokončení*).

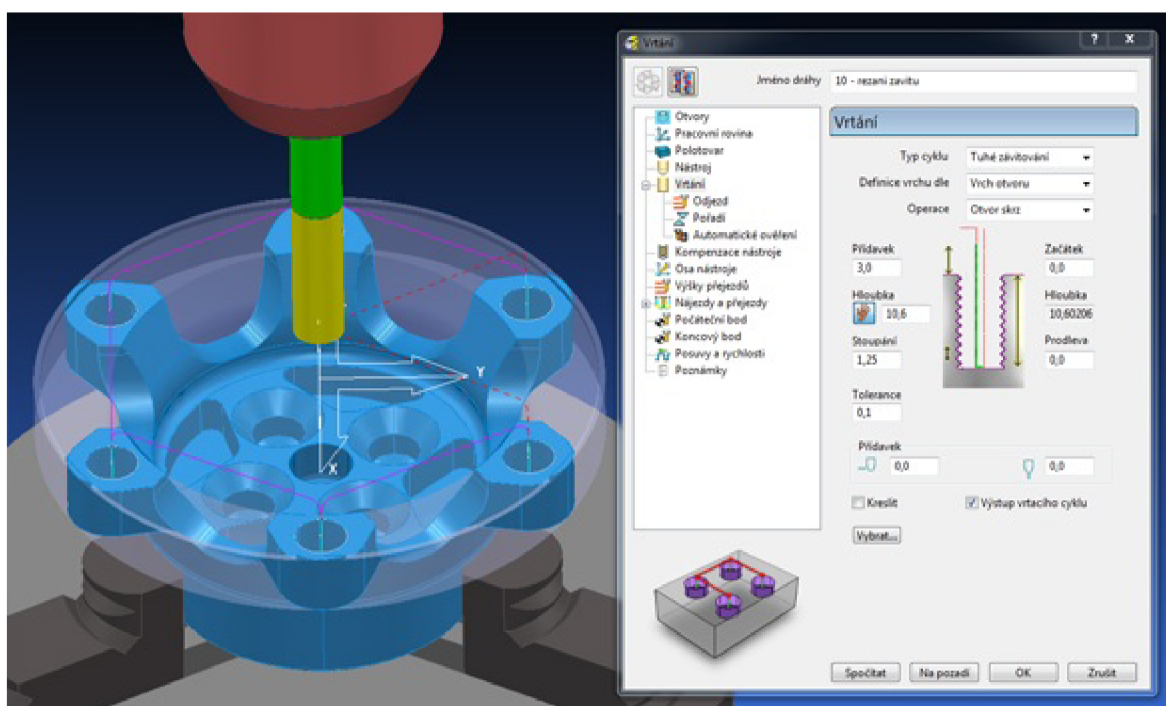
Dalším operačním úsekem je vrtání čtyř děr  $\varnothing 8,4$  mm, které se nacházejí na dně příruby. Stejně jako v případě kapes, byla i zde vytvořena 2D sada všech čtyř děr. Souřadnice vrchu a dna 2D sady museli být ale upraveny tak, aby sada začínala na dně součásti ( $Z = -16$  mm) a končila až ve vzdálenosti  $Z = -25$  mm, protože bylo třeba zohlednit tvar špičky vrtáku. Po 2D sadě byl vytvořen nástroj, tj. vrták  $\varnothing 8,4$  mm spolu s definicí řezných podmínek. Aplikována byla strategie *Vrtání* nacházející se ve stejnojmenné kartě. V okně strategie byl zvolen vrtací cyklus typu *Jedna dráha* a dále byla nastavena pouze vzdálenost sjezdu nad počátek dráhy (3 mm). Ostatní parametry vychází z tvaru 2D sady. Po vyvrtání děr bylo třeba naprogramovat jejich zhloubení. Postup byl naprosto identický s tvorbou předchozích vrtacích drah. Jako nástroj byl pro tento operační úsek zvolen kuželový záhlubník  $\varnothing 16$  mm s vrcholovým úhlem  $90^\circ$ . Nejedná se sice o vrták, ale jelikož není záhlubník v nabídce tvorby nástroje, byl vytvořen opět nástroj typu vrták. Při tvorbě vrtáku byla navržena taková geometrie, aby výsledný tvar odpovídal záhlubníku. Pomocí kuželových ploch na modelu byla opět vytvořena 2D sada, která zahrnuje i pomyslný vrchol kužele definující dno vrtací dráhy. Opět byla zvolena strategie *Vrtání* i stejný vrtací cyklus *Jedna dráha*. Na obr. 3.38 jsou zobrazeny dráhy vrtací strategie spolu se záhlubníkem použitým v následující strategii, kde jsou dráhy téměř shodné. Okno s nastavenými parametry je pro obě strategie totožné také.





Obr. 3.38 Vrtání a zahloubení děr 4 x  $\varnothing$  8,4 mm (Vrtání - Jedna dráha).

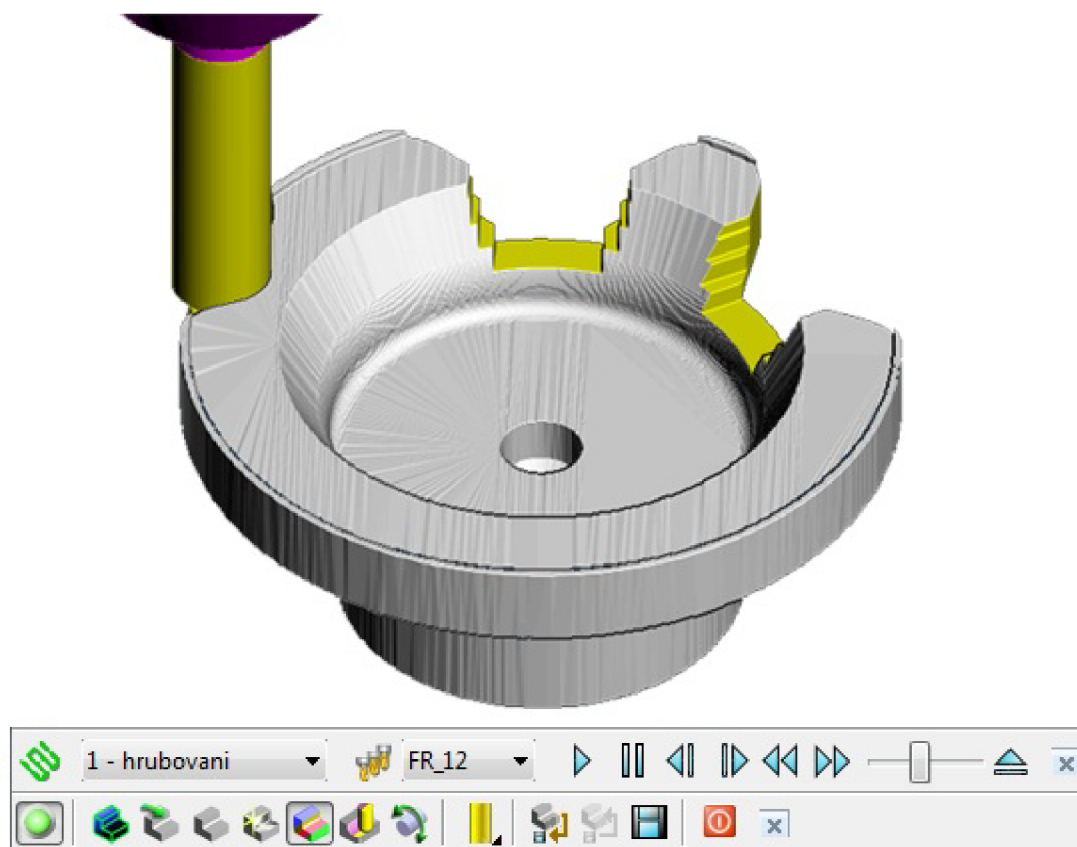
Následovalo navržení dalšího vrtacího úseku a to vrtání šesti průchozích děr  $\varnothing$  6,8 mm, do kterých bude následně vyřezán závit M8. Postup při programování vrtacích drah byl shodný s postupem návrhu předchozích vrtacích drah, tj. vytvoření vrtáku, nadefinování rezných podmínek, tvorba 2D sady a nastavení samotné strategie *Vrtání*, kde jedinou změnou bylo zvolení typu vrtací operace *Otvor skrz*.



Obr. 3.39 Řezání závitu M8 (Vrtání - Tuhé závitování).

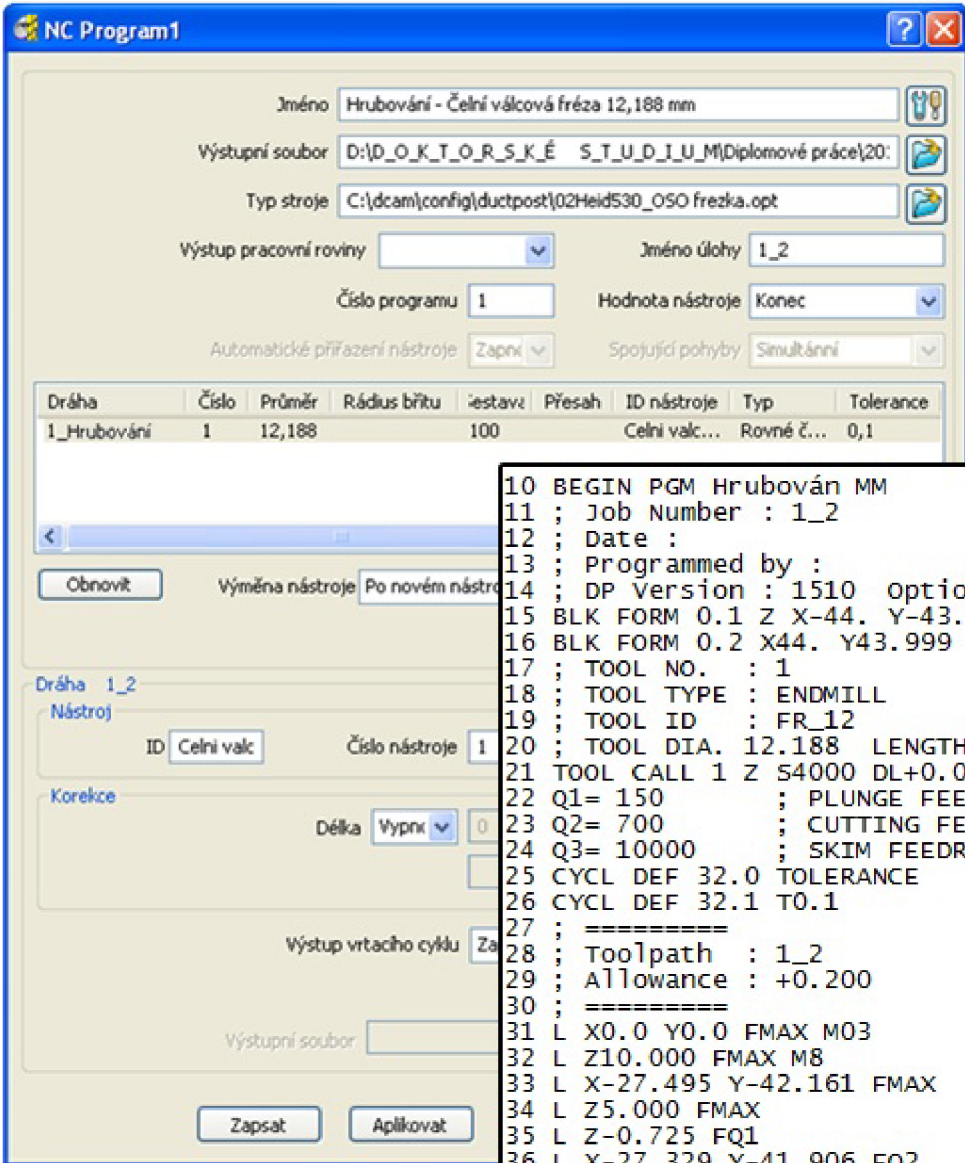
Pro další obráběcí strategii, kde bylo třeba vytvořit závit M8, byl vytvořen nástroj typu závitník. Aplikována byla stejná 2D sada, která byla vytvořena pro předchozí vyvrtání děr. Strategie pro řezání závitu, se vyskytuje opět pod strategií *Vrtání*, kde je nutné zvolit jako typ cyklu *Tuhé závitování* (obr. 3.39). Hloubka řezání závitu se vypočte automaticky dle 2D sady a zadává se tedy pouze stoupání závitu a vzdálenost sjezdu nad počátek dráhy.

Tímto byl uzavřen návrh obráběcích drah v programu PowerMILL. Poslední obráběcí operací je již jen upíchnutí pomocné upínací plochy, které bylo realizováno na CNC soustruhu pomocí manuálního naprogramování jednoduché dráhy (více popsáno v následující kapitole). Dále bylo ještě nutné zkontrolovat, jestli se v jednotlivých drahách nevyskytují kolize, popř. bourání. K tomuto účelu byl použit nástroj *Kontrola dráhy*, po jehož aplikaci byly všechny dráhy označeny zelenou značkou signalizující bezkolizní stav. Vizuelní kontrola byla během celého návrhu frézovacích strategií realizována pomocí nástroje *ViewMILL*, což je simulační modul programu PowerMILL (obr. 3.40).



Obr. 3.40 Simulace prvního frézovacího úseku - prostředí ViewMILL.

Poté se již přistoupilo k vygenerování jednotlivých NC programů. Ty byly vytvořeny ze všech obráběcích drah pomocí volby *Vytvořit individuální NC program*. Po následném zvolení možnosti *Zapsat v kontextové nabídce*, byly NC programy přeloženy pomocí postprocesoru (kompatibilního s řídicím systémem CNC frézky) do NC kódu, který lze již načíst do CNC obráběcího stroje (obr. 3.41).



The screenshot shows the 'NC Program1' software interface. At the top, there are input fields for 'Jméno' (Name), 'Výstupní soubor' (Output file), and 'Typ stroje' (Machine type). Below these are dropdown menus for 'Výstup pracovní roviny' (Output work plane), 'Jméno úlohy' (Job name), 'Číslo programu' (Program number), 'Hodnota nástroje' (Tool value), 'Automatické přiřazení nástroje' (Automatic tool assignment), and 'Spojující pohyby' (Connecting movements). A table lists tool parameters for '1\_Hrubování'. Below the table are buttons for 'Obnovit' (Refresh), 'Výměna nástroje' (Tool change), and 'Zapsat' (Save). A preview window shows the generated NC code for the first tool path.

Dráha	Číslo	Průměr	Rádus bříty	řestavz	Přesah	ID nástroje	Typ	Tolerance
1_Hrubování	1	12,188		100		Celni valc...	Rovné č...	0,1

```

10 BEGIN PGM Hrubován MM
11 ; Job Number : 1_2
12 ; Date :
13 ; Programmed by :
14 ; DP Version : 1510 Option File :
15 BLK FORM 0.1 Z X-44. Y-43.999 Z-38.
16 BLK FORM 0.2 X44. Y43.999 Z0.0
17 ; TOOL NO. : 1
18 ; TOOL TYPE : ENDMILL
19 ; TOOL ID : FR_12
20 ; TOOL DIA. 12.188 LENGTH 100.
21 TOOL CALL 1 Z S4000 DL+0.0 DR+0.0
22 Q1= 150 ; PLUNGE FEEDRATE
23 Q2= 700 ; CUTTING FEEDRATE
24 Q3= 10000 ; SKIM FEEDRATE
25 CYCL DEF 32.0 TOLERANCE
26 CYCL DEF 32.1 T0.1
27 ; =====
28 ; Toolpath : 1_2
29 ; Allowance : +0.200
30 ; =====
31 L X0.0 Y0.0 FMAX M03
32 L Z10.000 FMAX M8
33 L X-27.495 Y-42.161 FMAX
34 L Z5.000 FMAX
35 L Z-0.725 FQ1
36 L X-27.329 Y-41.906 FQ2
37 L X-28.122 Y-41.203
38 L X-29.400 Y-39.649

```

Obr. 3.41 Tvorba NC programu a ukázka NC kódu první obráběcí dráhy - hrubování.



## 4 VÝROBA PŘÍRUBY NÁBOJE ZADNÍHO KOLA FORMULE

Výroba příruby náboje zadního kola byla realizována ve firmě BOSCH DIESEL s.r.o. v Jihlavě (dále jen BOSCH, logo na obr. 4.1), která je zároveň generálním partnerem týmu TU Brno racing. Tato firma se zabývá výrobou komponentů pro dieselový vstřikovací systém Common Rail. K hlavním výrobkům patří dieselová vysokotlaká vstřikovací čerpadla, vysokotlaké zásobníky a tlakové regulační ventily. Příruba byla vyráběna konkrétně ve školícím středisku firmy BOSCH, které se nachází v areálu Jihlavské pobočky. Toto školící centrum bylo částečně vybaveno z projektu Evropské unie a slouží zejména pro technické vzdělávání nejen zaměstnanců firmy, ale i studentů technických škol, kterým je umožněno propojit výuku s praxí a seznámit se tak s moderními technologiemi. Tyto prostory také umožňují rozvíjet spolupráci s vysokými školami, mezi které patří i Vysoké učení technické v Brně<sup>41</sup>.



Obr. 4.1 Logo firmy BOSCH s.r.o.<sup>42</sup>.

### 4.1 Popis strojů

Pro soustružnické operace byl zvolen CNC soustruh Gildemeister CTX 210 od výrobce DMG s řídicím systémem Sinumerik 840D (viz obr. 4.2 a tab. 4.1).



Obr. 4.2 CNC soustruh Gildemeister CTX 210 od výrobce DMG.

Tab. 4.1 Specifikace CNC soustruhu DMG Gildemeister CTX 210<sup>43</sup>.

Základní specifikace	
Max. průměr soustružení	380 mm
Rozsah otáček	20 - 6000 min <sup>-1</sup>
Výkon pohonu	7,5 kW
Krouticí moment	72 Nm
Hmotnost stroje	3500 kg
Rozměry (D x Š x V)	2885 x 1690 x 1670 mm
Pojezdové dráhy	
Osa X	160 mm
Osa Z	305 mm
Rychloposuv: (X/Z)	15/30 m/min
Posuv: (X/Z)	5 m/min
Revolverová hlava	
Upínání nástroje	VDI 30
Nástrojová místa	12
Poháněné nástroje	12
Výkon pohonu poháněných nástrojů	3 kW

Druhá část výroby zahrnující frézovací operace byla realizována na tříosém CNC obráběcím centru MCV 754 QUICK od výrobce KOVOSVIT MAS s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530 (viz obr. 4.3 a tab. 4.2).



Obr. 4.3 CNC obráběcí centrum MCV 754 QUICK od výrobce KOVOSVIT MAS.

Tab. 4.2 Specifikace CNC obráběcího centra MCV 754 QUICK<sup>44</sup>.

Stůl	
Upínací plocha stolu	1000 x 500 mm
Maximální zatížení stolu	400 kg
Pracovní rozsah	
X - osa	754 mm
Y - osa	500 mm
Z - osa	550 mm
Vřeteno	
Výkon motoru	13 kW
Max. otáčky vřetena	10000 min <sup>-1</sup>
Kuželová dutina vřetena	ISO 40
Rozměry stroje	
Délka x šířka x výška	2590 x 2320 x 2560 mm
Hmotnost stroje	4000 kg

## 4.2 Popis výroby příruby náboje zadního kola formulového vozu

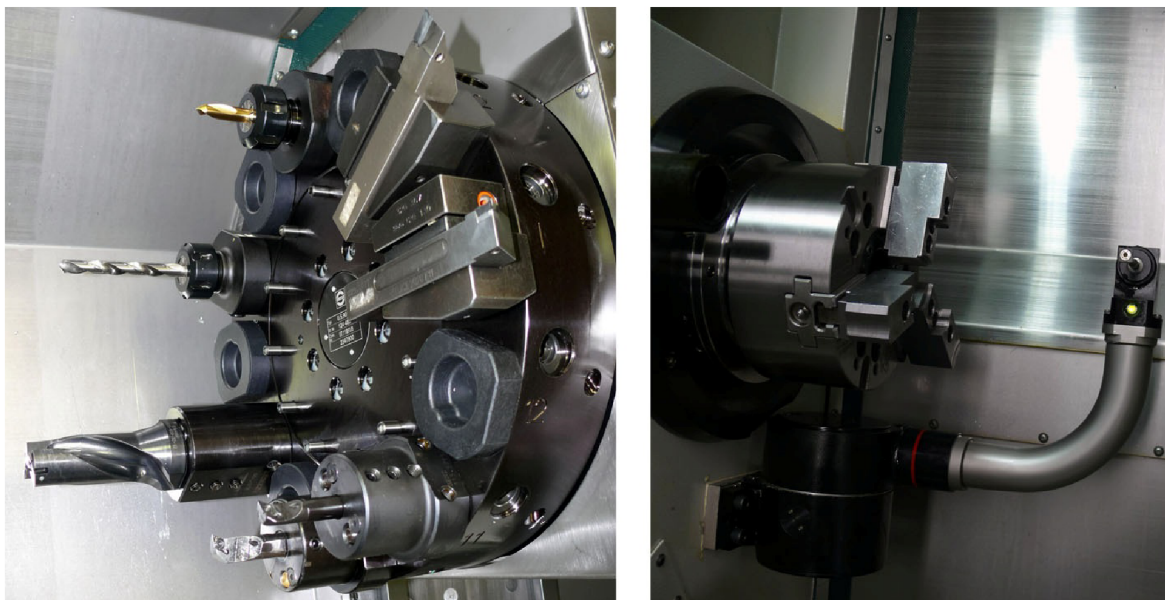
Polotovarem byl přířez  $\varnothing 90 - 40$  mm z hliníkové slitiny Certal (AlZnMgCu0.5), která byla podrobněji popsána v kapitole 2.2.6. NC program se soustružnickými dráhami byl předběžně vytvořen pomocí softwaru SinuTrain, což je program, který simuluje řídicí systém Sinumerik i s modulem ShopTurn na běžném PC s operačním systémem Windows XP. Vytvořený NC program byl přes síťový port následně nahrán do stroje, kde byl zařazen do adresáře mezi ostatní programy. NC program pro frézovací dráhy, jenž byl vygenerován systémem PowerMILL byl do CNC frézky nahrán přes USB port. V následujících kapitolách bude popsána část výroby na CNC soustruhu Gildemeister CTX 210 a druhá část na CNC obráběcím centru MCV 754 QUICK. Výrobní postup byl již uveden v kapitolách s návrhem obráběcích strategií a v kompletní podobě je také přiložen v příloze 3. V této kapitole budou uvedeny doplňující informace o výrobě a aplikovaných nástrojích.

### 4.2.1 Popis výroby na CNC soustruhu

Stroj byl vybaven revolverovou nástrojovou hlavou s 12 nástrojovými pozicemi, do které bylo přes upínač VDI 30 upnuto všech 7 nástrojů, které byly pro tuto část výroby aplikovány (viz obr. 4.4). U všech nástrojů byly změřeny délkové korekce v ose X a v ose Z pomocí výklopné měřicí sondy, kterou je stroj vybaven (obr. 4.4). Nástroj byl v ručním režimu nepolohován vedle sondy a ve směru osy X se k ní pomalu přibližoval, až nakonec došlo k dotyku špičky nástroje se sondou a podle momentální pozice nástrojové hlavy se vyhodnotila vzdálenost špičky nástroje od vztažného bodu na nástrojovém držáku. V porovnání s bývalou hodnotou této vzdálenosti byla následně vypočítána délková korekce nástroje. Stejný postup se opakoval i ve směru osy Z. Tyto korekce byly uloženy do řídicího systému stroje, který je následně zohledňoval při obráběcím procesu. Polotovár byl upnut do

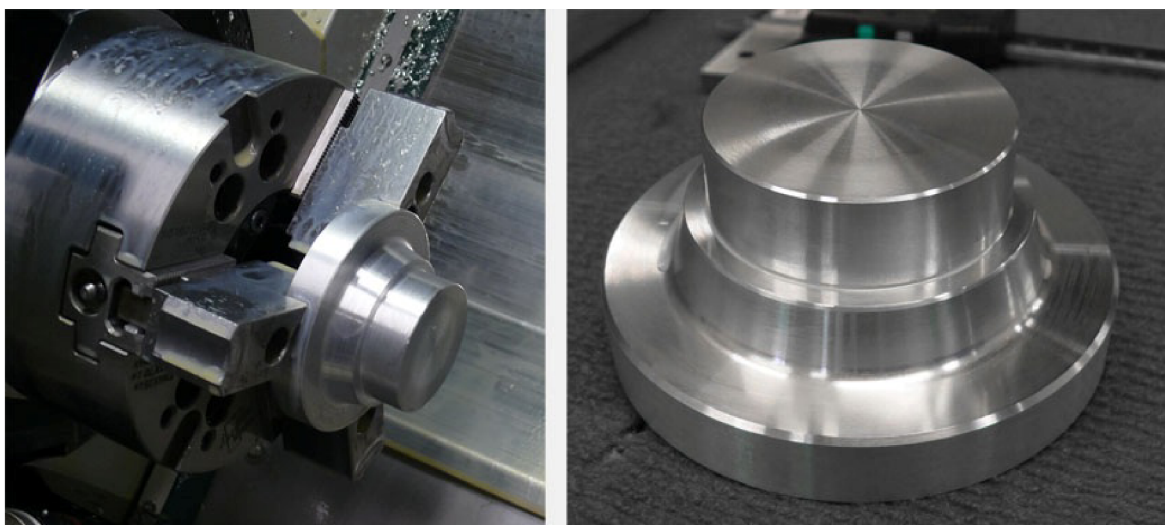


tříčelistového sklíčidla s měkkými čelistmi, jejichž funkční plochy byly ještě před upnutím obrobeky na  $\varnothing 90$  mm do hloubky 9 mm. Tento krok byl doporučen odbornou obsluhou stroje, aby se dosáhlo vyšší přesnosti upnutí.



Obr. 4.4 revolverová nástrojová hlava (vlevo) a sklíčidlo s měřicí sondou (vlevo).

Poté co byl obrobek upnut, bylo nutné nastavit jeho nulový bod. Ten byl nastaven dotykem nástroje o čelo polotovaru při současně roztočeném vřetenu. Přibližování nástroje bylo realizováno manuálním ovládáním s výrazně redukovanou posuvovou rychlostí. Po nastavení nulového bodu již bylo vše připraveno ke spuštění prvního programu, tj. obrábění první strany příruby. Na obr. 4.5 je zobrazen tvar součásti po dokončení této operace zahrnující úseky soustružení vnější kontury na hrubo a následně načisto.



Obr. 4.5 Podoba součásti po dokončení první soustružnické operace.

Před upnutím součásti z druhé strany byly vyměněny čelisti ve sklíčidle a opět byly jejich vnitřní funkční plochy pro zvýšení přesnosti upnutí přesoustruženy na  $\varnothing 50$  mm do hloubky 12 mm. Dále byl stejným způsobem jako v předchozím případě nastaven nulový bod a po načtení a spuštění druhého programu započal obráběcí cyklus. V tomto obráběcím cyklu bylo aplikováno vnější i vnitřní soustružení a také vrtací operace. Na obr. 4.6 jsou pro ukázkou uvedeny snímky pořízené během obráběcího procesu a také podoba výsledné součásti (kvalita fotek byla ovlivněna focením přes sklo zavřených bezpečnostních dveří, které bylo znečištěno rozstříkující se procesní kapalinou).



Obr. 4.6 Ukázkové snímky z obráběcího procesu a vyobrazení hotové součásti.

Jednotlivé nástroje, které byly při výrobě na CNC soustruhu aplikovány, jsou spolu s popisem uvedeny v tabulce 4.3. Po ukončení jednotlivých operací bylo provedeno měření rozměrů a ruční odstranění ostřin. Měření rozměrů bylo realizováno pomocí digitálních měřidel značky Mitutoyo uvedených na obr. 4.7. Konkrétně se jednalo o třmenové mikrometry dvou různých rozsahů, posuvové měřítko, hloubkoměr a výškoměr. Na CNC soustruhu byla dále ještě realizována poslední operace výroby a to upíchnutí pomocné upínací části. Kvůli zachování chronologického popisu výroby, bude tato operace včetně použitého nástroje uvedena až za popisem frézovací části výroby.



Tab. 4.3 Přehled aplikovaných nástrojů na CNC soustruhu Gildemeister CTX 210.

Zobrazení nástroje	Popis nástroje
	<p><b>Soustružnický nůž vnější ISCAR:</b>  SDJCL 2020K11; VBD: DCGT 11T304-AS;  řezný materiál: SK (WC); chlazení: vnější;  aplikované řezné podmínky:  <math>v_c = 140 - 160 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}</math>; <math>f = 0,18 - 0,3 \text{ mm}</math>  <math>a_p = 0,5 - 1 \text{ mm}</math>.</p>
	<p><b>Soustružnický nůž vnější ISCAR:</b>  SVJCL 2020K-16; VBD: VCGT 160404-AS;  řezný materiál: SK (WC); chlazení: vnější;  aplikované řezné podmínky:  <math>v_c = 180 - 230 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}</math>; <math>f = 0,12 \text{ mm}</math>  <math>a_p = 0,2 - 0,4 \text{ mm}</math>.</p>
	<p><b>Středicí vrták ø 9,5 - 90° PRAM ET:</b>  301CS-9,5-70-P90A10;  řezný materiál: HSS+ TiN; chlazení: vnější;  aplikované řezné podmínky:  <math>v_c = 30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}</math>; <math>n = 1000 \text{ min}^{-1}</math>; <math>f = 0,12 \text{ mm}</math>.</p>
	<p><b>Šroubovitý vrták ø 10 KORLOY:</b>  SSD100;  řezný materiál: HSS; chlazení: vnější;  aplikované řezné podmínky:  <math>v_c = 28 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}</math>; <math>n = 800 \text{ min}^{-1}</math>; <math>f = 0,13 \text{ mm}</math>.</p>
	<p><b>Vrták s VBD ø 35 ISCAR:</b>  DR 035-070-32-12; VBD: SDMT 120408-DT;  řezný materiál: SK (WC); chlazení: vnitřní;  aplikované řezné podmínky:  <math>v_c = 37 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}</math>; <math>n = 333 \text{ min}^{-1}</math>; <math>f = 0,15 \text{ mm}</math>.</p>
	<p><b>Soustružnický nůž vnitřní KORLOY:</b>  A12K SDUCL07; VBD: DCGT 070208-AR;  řezný materiál: SK (WC); chlazení: vnější;  aplikované řezné podmínky:  <math>v_c = 100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}</math>; <math>f = 0,25 \text{ mm}</math>; <math>a_p = 1 \text{ mm}</math>.</p>
	<p><b>Soustružnický nůž vnitřní CERATIZIT:</b>  S16M SDUCL07; VBD: DCGT 070204FN-27;  řezný materiál: SK (WC); chlazení: vnější;  aplikované řezné podmínky:  <math>v_c = 150 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}</math>; <math>f = 0,12 \text{ mm}</math>; <math>a_p = 0,4 \text{ mm}</math>.</p>

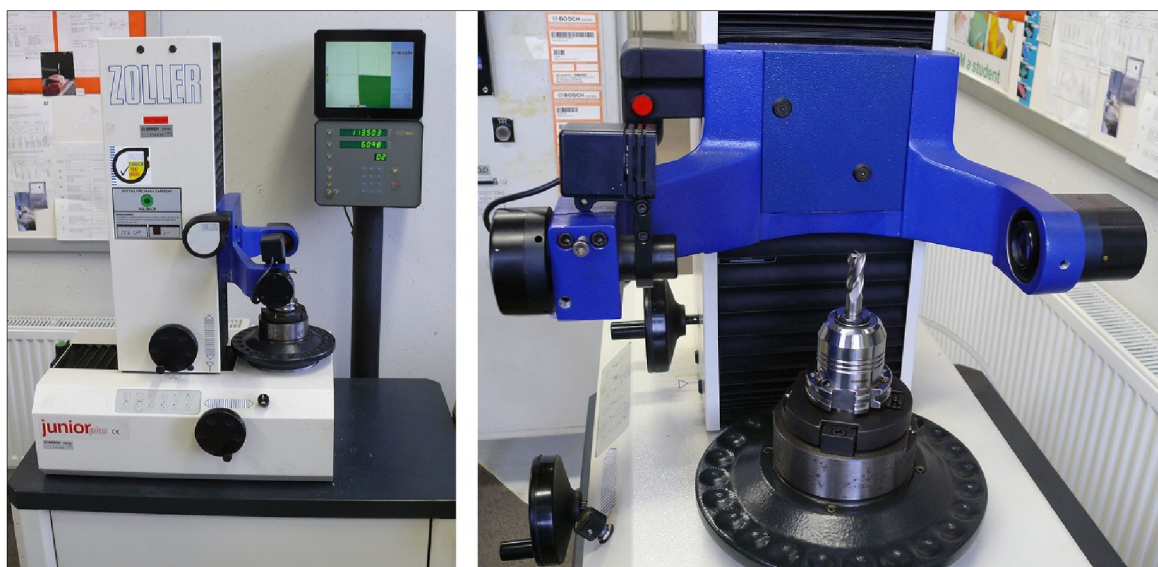




Obr. 4.7 Digitální měřidla značky Mitutoyo použité při výrobě.

#### 4.2.2 Popis výroby na CNC obráběcím centru

Pro upnutí součásti bylo opět zvoleno tříčelistové sklíčidlo, které bylo pomocí šroubů připevněno ke stolu obráběcího centra. Všechny nástroje byly upnuty v kleštinových upínačích, které byly dále upínány do vřetena stroje pomocí strmého kužele ISO 40. Stroj není vybaven automatickou výměnou nástroje, a proto byly před jednotlivými operačními úseky nástroje měněny ručně. Před výrobou byly u všech aplikovaných nástrojů měřeny délkové a poloměrové korekce na měřícím přístroji od výrobce Zoller (obr. 4.8). Tento přístroj je vybaven systémem pro kamerové zpracování obrazu, který automaticky rozezná a změří tvar měřeného břitu na nástroji, který je včetně upínače uložen na rotačním stole měřícího přístroje<sup>45</sup>. Po změření byly naměřené hodnoty vytisknuty na štítek, který byl přilepen na nástrojový držák, a před aplikací nástroje byly do tabulky nástrojů v řídicím systému stroje vloženy příslušné korekce.



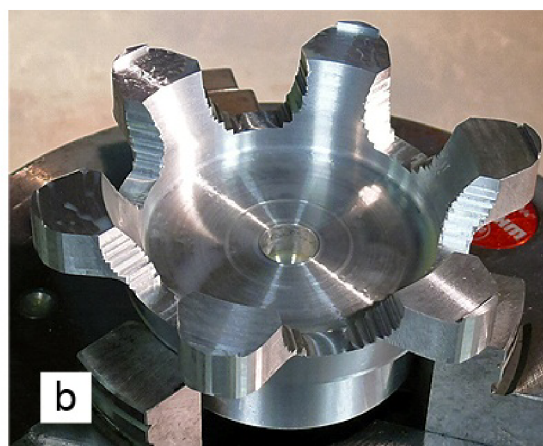
Obr. 4.8 Měření geometrie nástroje na měřícím přístroji Zoller.

Po upnutí součásti do sklíčidla byl pomocí dotykové sondy Heidenhain TS 220 nastaven nulový bod obrobku (obr. 4.9). Sonda byla přes kužel upnuta do vřetena stroje a pomocí kabelu a konektoru byla propojena s řídicím systémem. Nejdříve sjela ve směru osy Z dolů a dotkla se čela součásti, které definuje Z souřadnici nulového bodu. Následně byla sonda napolohována vedle obrobku a na třech různých místech se dotkla obvodu součásti. Pomocí třech bodů byla definována kružnice, v jejímž středu leží X a Y souřadnice nulového bodu.



Obr. 4.9 Nastavení nulového bodu obrobku pomocí dotykové sondy Heidenhain TS 220.

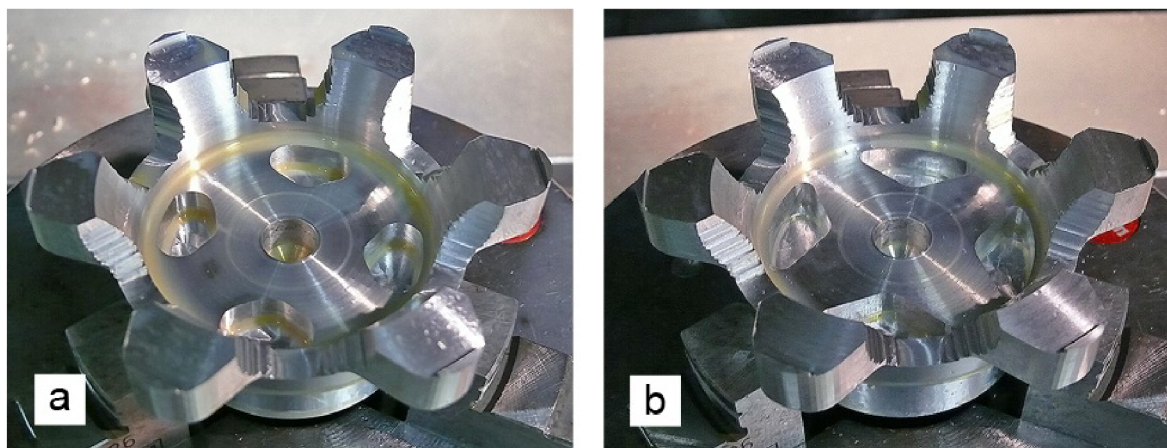
Po upnutí čelní válčové frézy  $\varnothing 12$  mm mohl být již spuštěn první NC program, ve kterém bylo realizováno hrubování bočních drážek (4.10a). Následujícím výrobním úsekem bylo zbytkové frézování drážek pomocí čelní válčové frézy  $\varnothing 8$  mm, kdy došlo ke zjemnění schodovitého charakteru povrchu (obr. 4.10b).



Obr. 4.10 Stav obrobku po a) hrubování bočních drážek, b) zbytkovém hrubování.

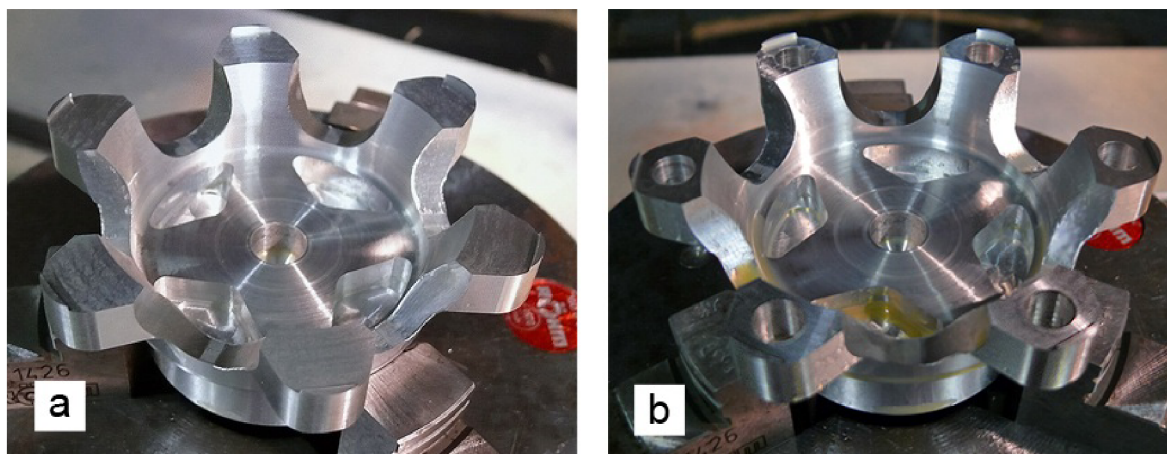


Následovalo frézování čtyř kapes na dně příruby, přičemž nemusela být provedena výměna nástroje, protože pro hrubování kapes (obr. 4.11a) byl navržen stejný nástroj jako pro předchozí obráběcí úsek. Poté byly kapsy dokončeny čelní válčovou frézou  $\varnothing 4$  mm (obr. 4.11b). Kromě dokončení stěn vytvořených při předchozím hrubování bylo také potřeba aplikovat zbytkové frézování, protože kapsy obsahují zaoblení R2, která mohla být vytvořena pouze nástrojem s totožným poloměrem.



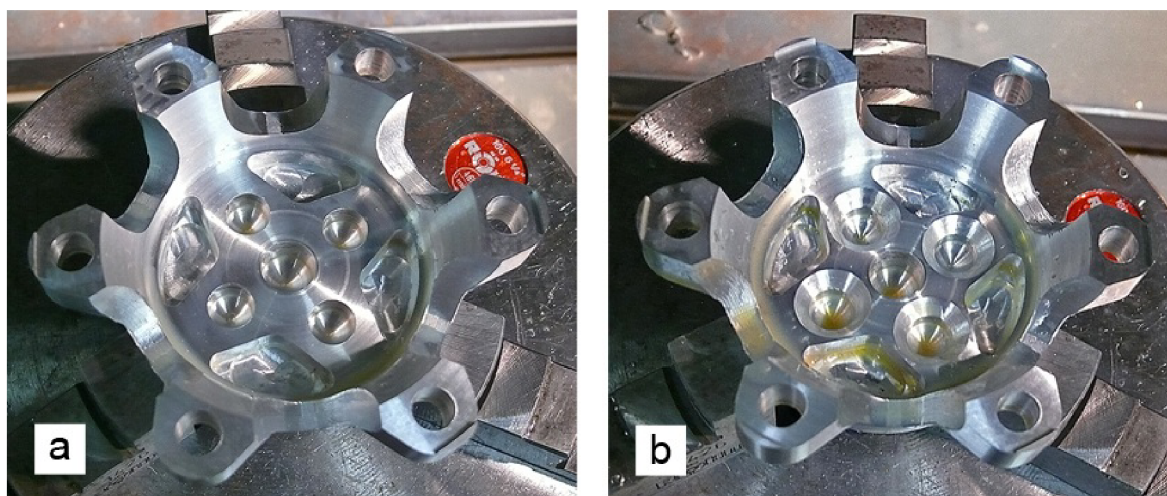
Obr. 4.11 Stav obrobku po a) hrubování kapes, b) zbytkovém dokončení kapes.

Navazujícím frézovacím úsekem bylo dokončení obvodu jednotlivých paprsků příruby a dna bočních drážek pomocí kulové frézy  $\varnothing 10$  mm (obr. 4.12a). Dále měl být spuštěn NC program pro vrtání čtyř děr  $\varnothing 8,4$  mm. Jelikož byl ale vrták v tu dobu nedopatřením využíván na jiném pracovišti, byl tento úsek přeskočen a nejdříve bylo vyvrtáno šest děr  $\varnothing 6,8$  mm (obr. 4.12b).



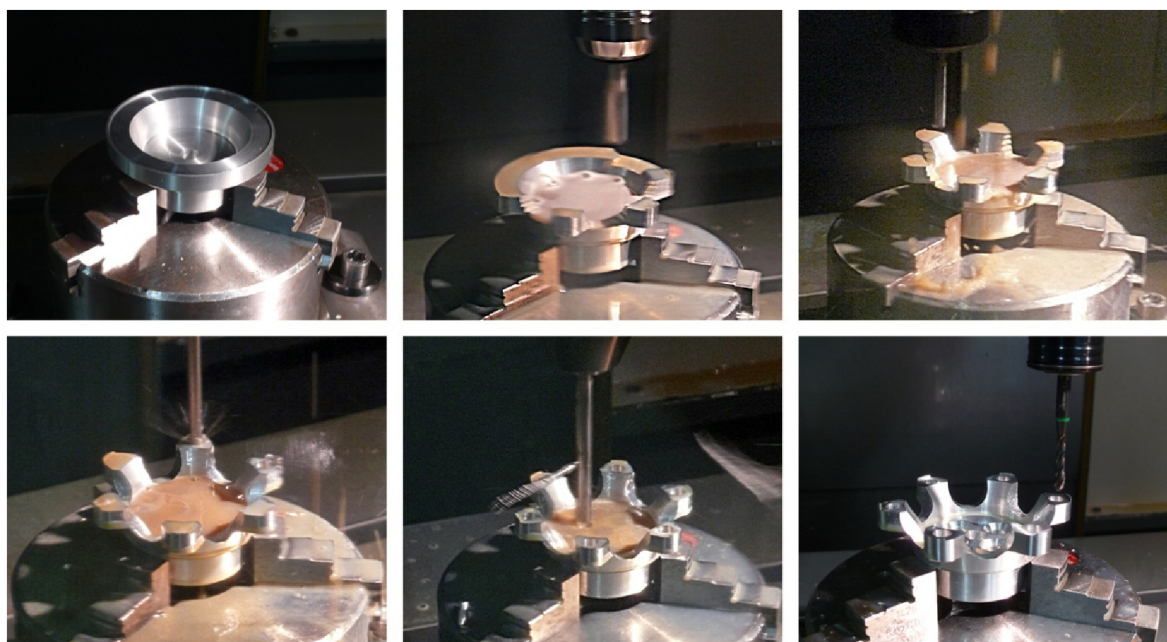
Obr. 4.12 Stav obrobku po a) dokončení bočních drážek, b) vrtání děr 6 x  $\varnothing 6,8$  mm.

Poté byl již vrták k dispozici a bylo tedy realizováno vrtání čtyř děr  $\varnothing 8,4$  mm (obr. 4.13a). Po vyvrtání byly díry zahloubeny kuželovým záhlubníkem s vrcholovým úhlem  $90^\circ$  (obr. 4.13b). V posledním obráběcím úseku byly do předvrtaných děr  $\varnothing 6,8$  mm vyřezány strojním závitníkem závity M8.



Obr. 4.13 Stav obrobku po a) vrtání děr 4 x  $\varnothing$  8,4 mm, b) zahloubení děr 3 x 45°.

Během výroby na CNC obráběcím centru byla prováděna průběžná kontrola rozměrů. Použita byla opět digitální měřidla firmy Mitutoyo, která byla již uvedena na obr. 4.7 v předchozí kapitole. Na obr. 4.14 jsou pro ukázkou uvedeny snímky pořízené během obráběcího procesu (kvalita snímků opět ovlivněna focením přes bezpečnostní sklo).



Obr. 4.14 Ukázkové snímky z obráběcího procesu.

Všechny řezné nástroje, které byly aplikovány při výrobě na CNC obráběcím centru MCV 754 QUICK, jsou uvedeny i s popisem a aplikovanými řeznými podmínkami v tabulce 4.4. Zvolené řezné podmínky jsou o něco nižší než doporučené řezné podmínky od výrobce nástrojů. Příčinou je kleštinový nástrojový upínač, který nedokáže dostatečně zajistit přenos vyšších krouticích momentů.



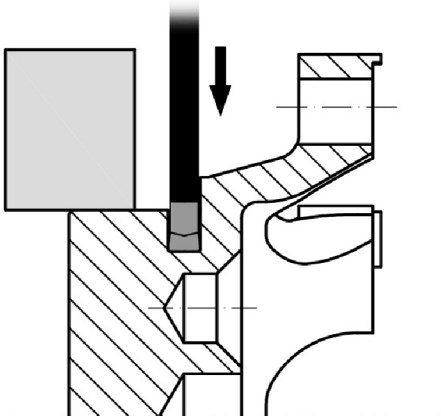

Tab. 4.4 Přehled aplikovaných nástrojů na CNC obráběcím centru MCV 754 QUICK.

Zobrazení nástroje	Popis nástroje
	<b>čelní válcová fréza stopková Ø 12 FRANKEN:</b> 1018.012; řezný materiál: HSS; počet břitů: 4; chlazení: vnější; aplikované řezné podmínky: $v_c = 150 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $n = 3900 \text{ min}^{-1}$ ; $f = 0,2 \text{ mm}$ ; $a_p = 2,8 \text{ mm}$ .
	<b>čelní válcová fréza stopková Ø 8 FRANKEN:</b> 1006.08; řezný materiál: HSS + TiCN; počet břitů: 4; chlazení: vnější; aplikované řezné podmínky: $v_c = 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $n = 3900 \text{ min}^{-1}$ ; $f = 0,2 \text{ mm}$ ; $a_p = 1,3 - 2 \text{ mm}$ .
	<b>čelní válcová fréza stopková Ø 4 FRANKEN:</b> 1006.04; řezný materiál: HSS + TiCN; počet břitů: 4; chlazení: vnější; aplikované řezné podmínky: $v_c = 70 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $n = 5500 \text{ min}^{-1}$ ; $f = 0,1 \text{ mm}$ ; $a_p = 1 \text{ mm}$ .
	<b>kulová fréza stopková Ø 10 FRANKEN:</b> 3326C.010; řezný materiál: HSS + TiCN; počet břitů: 4; chlazení: vnější; aplikované řezné podmínky: $v_c = 160 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $n = 5000 \text{ min}^{-1}$ ; $f = 0,1 \text{ mm}$ ; $a_p = 0,2 \text{ mm}$ .
	<b>šroubovitý vrták Ø 8,4 GARANT:</b> 113020 8,4; řezný materiál: HSS; počet břitů: 2; chlazení: vnější; aplikované řezné podmínky: $v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $n = 1895 \text{ min}^{-1}$ ; $f = 0,2 \text{ mm}$ .
	<b>Kuželový záhlubník Ø 16 - 90° FRANKEN:</b> 7560T.090016; řezný materiál: HSS + TiN; počet břitů: 2; chlazení: vnější; aplikované řezné podmínky: $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $n = 800 \text{ min}^{-1}$ ; $f = 0,12 \text{ mm}$ .
	<b>šroubovitý vrták Ø 6,8 GARANT:</b> 113020 6,4; řezný materiál: HSS; počet břitů: 2; chlazení: vnější; aplikované řezné podmínky: $v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $n = 2300 \text{ min}^{-1}$ ; $f = 0,18 \text{ mm}$ .
	<b>strojní závitník M 8 GARANT:</b> 131120 M8; řezný materiál: HSS; počet břitů: 3; chlazení: vnější; aplikované řezné podmínky: $v_c = 8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; $n = 300 \text{ min}^{-1}$ .

Poslední operací je upíchnutí pomocné upínací válcové plochy na CNC soustruhu Gildemeister CTX 210, na kterém byly již aplikovány prvotní soustružnické operace. Součást byla upnuta za onu pomocnou válcovou plochu ve vzdálenosti 8 mm. Vyložení upichovacího nože bylo seřízeno na 48 mm, aby v konečné fázi upichování nedošlo ke kolizi nástrojové hlavy s obrobkem. Nástroj byl upnut do revolveřové nástrojové hlavy a celá operace byla řízena manuálně kvalifikovaným pracovníkem. V tabulce 4.5 je uvedeno schéma operace a informace o aplikovaném upichovacím noži. Finální podoba obrobku je uvedena na obrázku 4.15.

Oddělení pomocné válcové plochy mohlo být realizováno i jinými způsoby. Jednou z možností bylo odfrézování materiálu po upnutí součásti na stůl frézky pomocí upínek. V tom případě by se ale musela nejdříve vyhotovit podložka, kterou by se součást vypodložila, aby kontaktní plocha mezi součástí a stolem stroje nebyla tvořena pouze úzkými výčnělky na čele příruby. Další variantou, která byla zvažována, bylo soustružení postupnými úběry či upíchnutí pomocné plochy při obrátcené orientaci upnuté součásti. Jelikož ale druhá strana součásti není tvořena válcovou plochou, bylo by upnutí velice obtížné a nestabilní. Obě dvě alternativní varianty by také znamenaly značné prodloužení jednotkového času operace. Proto byl i vzhledem k dostupnosti vhodného upichovacího nože zvolen uvedený postup.

Tab. 4.5 Popis upichovací operace<sup>46</sup>.

Schéma operace	Popis nástroje
	<p><b>Soustružnický nůž upichovací ISCAR:</b>            SGFH 32-4; VBD: GFN 4A;            řezný materiál: SK (WC); chlazení: vnější;            aplikované řezné podmínky:  <math>v_c = 140 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}</math>; <math>f = 0,06 \text{ mm}</math>; <math>a_p = 4 \text{ mm}</math>.</p> 



Obr. 4.15 Finální podoba vyrobené příruby náboje zadního kola formulového vozu.



## 5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole je analyzován výrobní čas a výrobní náklady související s výrobou příruby náboje zadního kola formulového vozu Dragon 3. Zadní náprava formule má samozřejmě dvě kola a proto musely být vyrobeny dvě příruby, přičemž pravá i levá příruba jsou identické.

### 5.1 Jednotkový čas CNC stroje

Čas výroby jednoho kusu je charakterizován tzv. jednotkovým časem CNC stroje  $t_{mA}$ , který definuje vztah (5.1)<sup>47</sup>.

$$t_{mA} = t_{mA4} + t_{mA5} + t_{mA6} \text{ [min]} \quad (5.1)$$

kde:  $t_{mA4}$  [min] - jednotkový čas chodu CNC stroje,

$t_{mA5}$  [min] - jednotkový čas klidu CNC stroje,

$t_{mA6}$  [min] - jednotkový čas interference CNC stroje.

Jednotkový čas chodu CNC stroje  $t_{mA4}$  zahrnuje čas samotného obráběcího procesu, který byl pro jednotlivé výrobní operace vyhodnocen pomocí simulace řídicího systému stroje, která právě čas chodu CNC stroje (NC programu) zaznamenává. Prakticky bylo ověřeno, že časové údaje uvedené v simulaci odpovídají času reálné výroby, přičemž odchylky jsou zanedbatelné. Zaznamenané hodnoty času  $t_{mA4}$  pro výrobu na jednotlivých obráběcích strojích jsou uvedeny v tabulce 5.1. Dílčí jednotkové časy chodu CNC stroje pro jednotlivé výrobní úseky jsou uvedeny ve výrobním postupu, který je přiložen jako příloha 3. Jednotkový čas klidu CNC stroje  $t_{mA5}$  se vztahuje k upínání obrobku, ruční výměně nástroje, měření rozměrů apod<sup>47</sup>. Z důvodu kusové výroby, nebyl tento čas měřen a pro účely tohoto vyhodnocení byl obsluhou obráběcího stroje podle zkušeností přibližně odhadnut (viz tab. 5.1). Poslední složkou je jednotkový čas interference CNC stroje, který se uplatňuje v případě vícestrojové obsluhy, kdy daný stroj tzv. čeká na příchod pracovníka<sup>47</sup>. V případě výroby příruby obsluhoval pracovník vždy pouze jeden stroj, a proto je tato časová složka rovna nule. Jednotkový čas CNC stroje  $t_{mA}$  je tedy nakonec roven součtu časů  $t_{mA4}$  a  $t_{mA5}$ . Hodnoty pro CNC soustruh a CNC obráběcí centrum jsou rozlišeny pomocí indexu  $i$ . (viz tab. 5.1).

Tab. 5.1 Jednotkové časy CNC stroje.

Stroj	$i$	$t_{mA4i}$ [min]	$t_{mA5i}$ [min]	$t_{mAi}$ [min]
CNC soustruh Gildemeister CTX 210	1	14,90	3,50	18,40
CNC obráběcí centrum MCV 754 QUICK	2	39,74	6,80	46,54

Výrazného zkrácení času  $t_{mA42}$  bylo dosaženo pomocí systému PowerMILL, kde byl v tabulce Nájezdy a přejezdy nastaven způsob propojení elementárních úseků jednotlivých obráběcích drah. U každé dráhy lze zobrazit okno Statistika drah, kde jsou uvedeny statistické informace o délce dráhy a času pohybů nástroje. Důležitý je zejména údaj o celkovém času dané obráběcí strategie, který lze přirovnat k jednotkovému času CNC stroje  $t_{mA42}$ . V tabulce 5.2 je uveden vliv nastavení propojení v tabulce Nájezdy a přejezdy na celkový čas obrábění součásti, tj. čas  $t_{mA42}$ .

Tab. 5.2 Jednotkové časy CNC stroje.

Nastavení propojení nájezdů a přejezdů		$t_{mA42}$ [min]
Krátké	Ochrana	62,93 (01:02:56)
Dlouhý	Ochrana	
Výchozí	Ochrana	
Krátké	Obloukem	39,74 (00:39:45)
Dlouhý	Nejkratší	
Výchozí	Ochrana	

Vhodným nastavením propojení nájezdů a přejezdů se tedy nakonec dosáhlo snížení jednotkového času chodu CNC obráběcího centra  $t_{mA42}$  z 62,93 min až na 39,74 min. Bylo tedy dosaženo časové úspory 23,19 min (00:23:11), tj. 36,85%.

## 5.2 Výrobní náklady

V dalším kroku byly pro účely technicko-ekonomického vyhodnocení stanoveny náklady spojené s výrobou dvou součástí příruby náboje zadního kola formule. Ty se skládají z nákladů na materiál (polotovary) a z nákladů spojených s provozem CNC stroje.

Výchozí polotovar pro obrábění byl zakoupen ve firmě ALFUN a.s., která se zabývá prodejem hliníkových, ocelových a měděných polotovarů pro strojírenskou výrobu<sup>48</sup>. Jak již bylo zmíněno dříve, jednalo se o hliníkovou slitinu Certal ve formě válcované desky o rozměrech 1500 x 3020 x 90 mm. Tato rozměrná deska byla dále nadělena na menší díly, které byly použity pro výrobu různých součástí formule. Polotovary určené pro rotační součásti byly následně upraveny na soustruhu, kde byl materiál ve formě kvádrů redukován na válcový polotovar určený pro budoucí soustružnické operace. Tyto úpravy polotovarů byly uskutečněny ve strojírenských firmách, které sponzorují tým TU Brno Racing. Konečný polotovar pro výrobu příruby náboje byl tedy nakonec ve formě válce o rozměrech  $\varnothing 90 - 40$  mm. Díky partnerským firmám byly náklady spojené s materiálem pro výrobu příruby rovné pouze poměrné části z ceny výchozího polotovaru (desky). Firma ALFUN a.s. má pro slitinu Certal určenou prodejní cenu 180 Kč / kg (bez DPH)<sup>49</sup>. Při zná-

mé hustotě slitiny ( $2760 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) byla hmotnost polotovaru  $\varnothing 90 - 40 \text{ mm}$  (původně ve formě kvádrů  $90 \times 90 \times 40 \text{ mm}$ ) vypočtena na  $0,894 \text{ kg}$ . Výsledné jednotkové náklady na materiál  $N_{Am}$  byly tedy vypočteny na  $161 \text{ Kč}$  (bez DPH).

Dále byly určeny náklady, které souvisí s provozem CNC stroje. Nejprve bylo nutné pro každý CNC stroj stanovit tzv. náklady na hodinu provozu CNC stroje  $N_{hs}$ , které jsou definovány vztahem (5.2)<sup>47</sup>.

$$N_{hs} = S_f + \frac{C_s + N_i + N_d - L}{Z \cdot F_{ef}} [\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (5.2)$$

- kde:  $S_f$  [ $\text{Kč}\cdot\text{h}^{-1}$ ] - fixní hodinová sazba (mzda obsluhy, režijní náklady, spotřeba náradí, energie, podíl práce programátora, měření a vyhodnocování rezného procesu, údržba),
- $C_s$  [ $\text{Kč}$ ] - pořizovací cena stroje,
- $N_i$  [ $\text{Kč}$ ] - náklady na instalaci stroje (dovoz, základy, montáž, přívod energií),
- $N_d$  [ $\text{Kč}$ ] - náklady na demontáž stroje (po skončení technické životnosti stroje, uvedení pracovního místa do původního stavu, ekologické souvislosti),
- $L$  [ $\text{Kč}$ ] - likvidační hodnota (odprodej stroje po skončení životnosti, popř. cena šrotu),
- $Z$  [r] - doba životnosti stroje (souvisí s dobou odepisování),
- $F_{ef}$  [h] - efektivní časový fond stroje za rok (využitelný fond pracovní doby pro danou směnnost).

Hodinové náklady na provoz jednotlivých CNC strojů ve školicím středisku firmy BOSCH DIESEL s.r.o. v Jihlavě, kde byla výroba příruby realizována, jsou uvedeny v tabulce 5.3 (hodnoty pro jednotlivé stroje jsou opět rozlišeny indexem  $i$ ).

Tab. 5.3 Náklady na hodinu provozu CNC stroje  $N_{hs}$  ve školicím středisku firmy BOSCH DIESEL s.r.o.<sup>50</sup>.

Stroj	$i$	$N_{hsi}$ [ $\text{Kč}\cdot\text{h}^{-1}$ ]
CNC soustruh Gildemeister CTX 210	1	1135
CNC obráběcí centrum MCV 754 QUICK	2	1265

Při známých nákladech na hodinu provozu CNC stroje  $N_{hs}$  a jednotkovém času CNC stroje  $t_{mA}$  byly následně podle vztahu (5.3) vypočítány jednotkové náklady provozu CNC stroje  $N_{Aps}$ <sup>47</sup>.

$$N_{Aps} = \frac{N_{hs}}{60} \cdot t_{mA} [K\check{c} \cdot ks^{-1}] \quad (5.3)$$

kde:  $N_{hs} [K\check{c} \cdot h^{-1}]$  - náklady na hodinu provozu CNC stroje,  
 $t_{mA} [min]$  - jednotkový čas CNC stroje.

Jednotkové náklady provozu CNC stroje se vztahují k výrobě jednoho kusu. V tabulce 5.4 jsou uvedené vypočtené hodnoty pro oba CNC stroje.

Tab. 5.4 Jednotkové náklady provozu CNC stroje  $N_{Aps}$  ve školicím středisku firmy BOSCH DIESEL s.r.o.

Stroj	i	$t_{mAi} [min]$	$N_{hsi} [K\check{c} \cdot h^{-1}]$	$N_{Apsi} [K\check{c} \cdot ks^{-1}]$
CNC soustruh Gildemeister CTX 210	1	18,40	1135	349
CNC obráběcí centrum MCV 754 QUICK	2	46,54	1265	982

Celkové výrobní náklady  $N_c$  na výrobu příruby náboje zadního kola formule, které zohledňují počet vyrobených kusů, náklady na provoz všech použitých CNC strojů a náklady na materiál jsou dány vztahem (5.4). Celkové jednotkové výrobní náklady  $N_{Ac}$  mají stejný význam jako  $N_c$ , ale vztahují se pouze k jednomu vyrobenému kusu. V tabulce 5.5 jsou uvedeny výsledné hodnoty.

$$N_c = n \cdot \left( \left( \sum_{i=1}^k N_{Apsi} \right) + N_m \right) [K\check{c}] \quad (5.4)$$

kde:  $n [ks]$  - počet vyrobených kusů,  
 $N_{Apsi} [K\check{c} \cdot ks^{-1}]$  - jednotkové náklady provozu CNC stroje,  
 $N_{Am} [K\check{c} \cdot ks^{-1}]$  - jednotkové náklady na materiál.

Tab. 5.5 Celkové výrobní náklady  $N_c$  na výrobu dvou kusů příruby náboje zadního kola formule ve školicím středisku firmy BOSCH DIESEL s.r.o.

Stroj	i	$N_{Apsi} [K\check{c} \cdot ks^{-1}]$	$\sum N_{Apsi} [K\check{c} \cdot ks^{-1}]$	$N_{Am} [K\check{c} \cdot ks^{-1}]$	$N_{Ac} [K\check{c} \cdot ks^{-1}]$	n [ks]	$N_c [K\check{c}]$
CNC soustruh Gildemeister CTX 210	1	349	1331	161	1492	2	<b>2984</b>
CNC obráběcí centrum MCV 754 QUICK	2	982					

Náklady spojené s výrobou dvou přírub náboje zadního kola formule ve školicím středisku firmy BOSCH DIESEL s.r.o. tedy nakonec dosáhly částky 2984 Kč. Pro účely názorného porovnání byly zjištěny výrobní náklady spojené s výrobou příruhy i v případě výroby v jiných výrobních podnicích či zařízeních. Konkrétně se jednalo o firmu Frentech Aerospace s.r.o., která se zabývá velice přesným obráběním dílů určených především pro letecký a vesmírný průmysl, mikroelektroniku, lékařskou techniku, vakuovou a přístrojovou techniku, atd.<sup>51</sup>. Dále bylo provedeno porovnání s výrobou v prostorách laboratoře C2, která spadá pod Ústav strojírenské technologie na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. U nákladů na hodinu provozu CNC stroje je v případě laboratoře C2 uveden určitý interval, který zohledňuje druh obráběného materiálu, který má přímý vliv na opotřebení nástroje a energetickou náročnost procesu<sup>52</sup>. Jelikož je hliníková slitina Certal relativně dobře obrobitelný materiál, byly při výpočtu použity střední hodnoty hodinových nákladů. Je také potřeba zdůraznit, že laboratoř C2 není výrobní prostor určený k zakázkové výrobě, ale jedná o pracoviště zaměřené na výzkumnou činnost, a proto se náklady na hodinu provozu stroje mohou oproti výrobním podnikům lišit. V tabulce 5.6 jsou uvedeny náklady na hodinu provozu jednotlivých CNC strojů, které by byly potenciálně pro výrobu použity, a které jsou svými parametry podobné CNC strojům, na kterých byla reálná výroba realizována. Dále jsou v tabulce uvedeny vypočtené hodnoty celkových jednotkových nákladů a celkových nákladů zahrnujících výrobu dvou kusů.

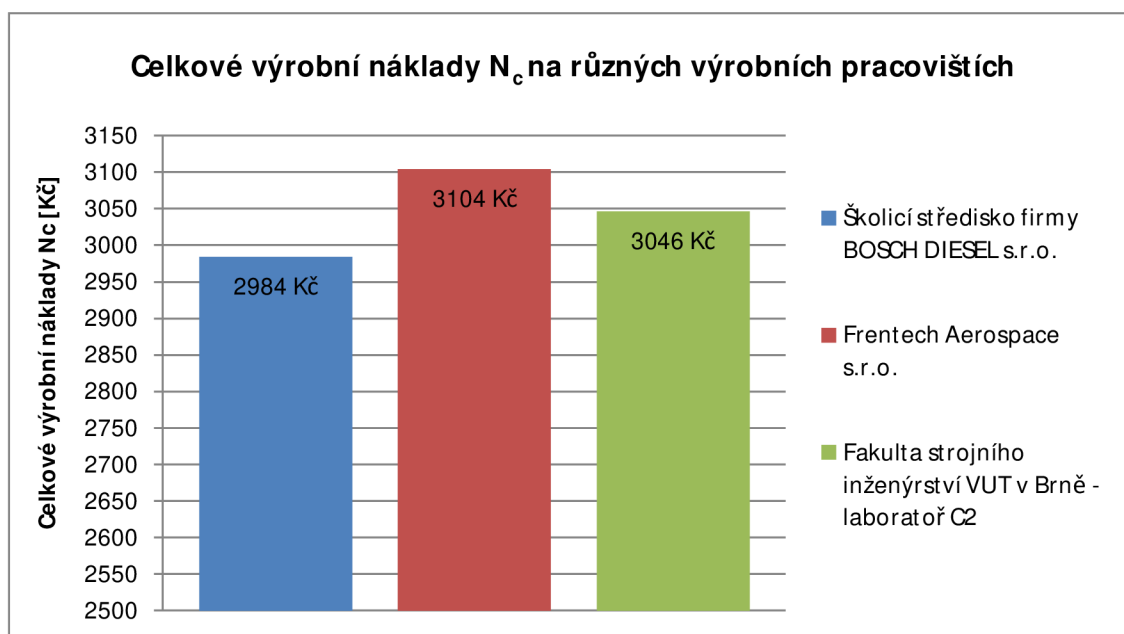
Tab. 5.6 Porovnání výrobních nákladů na různých obráběcích pracovištích<sup>50,52,53</sup>.

Stroj	$N_{hs}$ [Kč.h <sup>-1</sup> ]	$N_{Aps}$ [Kč.ks <sup>-1</sup> ]	$\Sigma N_{Aps}$ [Kč.ks <sup>-1</sup> ]	$N_{Ac}$ [Kč.ks <sup>-1</sup> ]	$N_c$ (2 ks) [Kč]	Rozdíl [Kč]	Rozdíl [%]
Školicí středisko firmy BOSCH DIESEL s.r.o.							
CNC soustruh Gildemeister CTX 210	1135	349	1331	1492	2984	-	-
CNC obráběcí centrum MCV 754 QUICK	1265	982					
Frentech Aerospace s.r.o.							
CNC soustruh SQT 10M	1277	392	1391	1552	3104	120	4,02
CNC obráběcí centrum MCFV 1680	1287	999					
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně - laboratoř C2							
CNC soustruh SPN 12 CNC	800 - 1000	276	1362	1523	3046	62	2,08
CNC frézka FV 25 CNC	1300 - 1500	1086					

Z tabulky 5.6 je patrné, že nejnižší celkové výrobní náklady vykazuje výroba ve školicím středisku firmy BOSCH DIESEL s.r.o. V ostatních pracovištích jsou ale celkové náklady vyšší pouze o několik procent a nejedná se tedy o významný



rozdíl. Na obr. 5.1 je uveden graf popisující celkové výrobní náklady  $N_c$  v závislosti na výrobním pracovišti.



Obr. 5.1 Graf popisující celkové výrobní náklady  $N_c$  na různých výrobních pracovištích.

Výrazné úspory nákladů bylo dosaženo díky vhodnému nastavení propojení obráběcích drah v systému PowerMILL, které bylo popsáno již v předchozí kapitole. Tato optimalizace snížila jednotkový čas chodu CNC obráběcího centra  $t_{mA42}$ , což v konečném důsledku redukovalo celkové výrobní náklady z 3962 Kč na 2984 Kč, tj. o 33,54% (viz tab. 5.7).

Tab. 5.7 Celkové výrobní náklady před a po optimalizaci nájezdů a přejezdů.

Propojení obráběcích drah	$t_{mA42}$ [min]	$N_{Ac}$ [Kč.ks <sup>-1</sup> ]	$N_c$ [Kč]	Rozdíl [Kč]	Rozdíl [%]
Před optimalizací	62,93	1981	3962	978	32,77
Po optimalizaci	39,74	1492	2984		

Z hlediska týmu TU Brno Racing byly celkové náklady na vyhotovení dvou přírub náboje zadního kola formule ještě nižší. Firma BOSCH s.r.o. je totiž generálním partnerem týmu a pro účely výroby součástek do projektu Formula Student poskytuje pro tým TU Brno Racing slevu ve výši 50%. Tato sleva zredukovala původní celkové výrobní náklady z 2916 Kč na 1498 Kč. S touto cenou již ostatní výrobní podniky nemohly konkurovat a je samozřejmostí, že výroba součástek u generálního partnera (sponzora) týmu byla ekonomicky nejvýhodnější.

## ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a výrobou příruby náboje zadního kola formulového vozu (dále jen příruba). Hlavním cílem byl návrh obráběcích strategií spojený s vyhotovením NC programů a následnou realizací výroby funkční součásti, která byla použita při sestavení studentské formule Dragon 3.

V teoretické části jsou popsány a charakterizovány dvě základní metody technologie obrábění aplikované při výrobě součásti, kterými jsou soustružení a frézování. Dále je uveden teoretický rozbor hliníkových slitin zahrnující problematiku jejich obrobitelnosti spolu s popisem a teoretickým začleněním slitiny Certal, která byla zvolena jako materiál pro obráběnou součást.

Praktická část popisuje konstrukci příruby v CAD programu Autodesk Inventor 2012, návrh soustružnických strategií v systému ShopTurn 06.04, návrh frézovacích strategií v CAM programu PowerMILL 2010 a následnou realizaci výroby ve školicím středisku firmy BOSCH DIESEL s.r.o. v Jihlavě. Na závěr je uvedeno technicko-ekonomické zhodnocení výroby.

Z dosažených výsledků diplomové práce vyplývá:

- Při konstrukci příruby bylo hlavním požadavkem dosažení co nejnižší hmotnosti při současném zachování dostatečné tuhosti součásti. Tuhost konstrukce byla ověřena systémem Ansys.
- Obráběcí strategie byly navrhovány s důrazem na co nejnižší jednotkový čas chodu CNC stroje  $t_{mA4}$ . Při návrhu soustružnických drah bylo dosaženo času  $t_{mA41} = 14,9$  min (14 min 54 s). U frézovacích strategií se díky optimalizaci propojení drah v CAM softwaru PowerMILL docílilo času  $t_{mA42} = 39,74$  min (39 min 45 s). Bez optimalizace by byl tento čas roven 62,93 min, což je o 23,19 min (36,85%) více. Při zahrnutí jednotkových časů klidu CNC stroje  $t_{mA5}$  byly výsledné hodnoty jednotkového času CNC stroje  $t_{mA}$  rovny 18,4 min (18 min 24 s) u CNC soustruhu a 46,54 min (46 min 33 s) u CNC obráběcího centra.
- Po stanovení nákladů na hodinu provozu jednotlivých CNC strojů  $N_{hs}$  byly vypočteny jednotkové náklady jejich provozu  $N_{Aps}$ . U soustružnické části výroby na CNC soustruhu bylo dosaženo  $N_{Aps1} = 349$  Kč.ks<sup>-1</sup>. Frézovací a vrtací operace na CNC obráběcím centru vykazovaly  $N_{Aps2} = 982$  Kč.ks<sup>-1</sup>. Vyrobeny byly celkově dvě příruby (jedna pro každé kolo) a po započtení nákladů na materiál ( $N_{Am} = 161$  Kč) byly celkové výrobní náklady  $N_c$  vyhodnoceny na 2984 Kč. Bez optimalizace propojení frézovacích drah v softwaru PowerMILL by celkové výrobní náklady dosahovaly částky 3962 Kč což je o 978 Kč, tj. 32,77% více.
- Pro účely názorného porovnání byly zjištěny výrobní náklady spojené s výrobou dvou přírub i v případě realizace výroby v jiných výrobních podnicích či zařízeních (Frentech Aerospace s.r.o. a laboratoř C2 na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně). Nejnižší celkové výrobní náklady vykazovala právě výroba ve školicím středisku firmy BOSCH DIESEL s.r.o. Nejednalo se ale o významný rozdíl, protože celkové výrobní náklady na ostatních porovnávaných pracovištích se lišily jen o 4,02% (Frentech s.r.o.) a 2,08% (laboratoř C2).

- Z hlediska týmu TU Brno Racing byla výsledná cena za dvě příruby náboje zadního kola formule rovna 1498 Kč, tj. půlce vypočtených celkových výrobních nákladů. Důvodem je fakt, že firma BOSCH DIESEL s.r.o. je generálním sponzorem týmu a pro účely výroby součástí do projektu Formula Student poskytuje týmu TU Brno Racing slevu ve výši 50%. Kvůli velkému časovému vytížení školicího střediska firmy BOSCH DIESEL s.r.o. v Jihlavě, bylo ale podmínkou vyhotovit NC programy v časovém předstihu, aby se minimalizoval čas potřebný na technologickou přípravu výroby přímo na pracovišti. I z toho důvodu byl pro návrh frézovacích drah zvolen CAM systém, díky kterému mohly být NC programy vyhotoveny předběžně bez závislosti na přístupu k CNC obráběcímu centru.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] TU Brno Racing - Formule Student (SAE). *TU Brno Racing* [online]. © 2010 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.tubrnoracing.cz/cs/formule-student-sae>
- [2] *Formula Student 2013* [online]. © 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.formulastudent.com/formula-student/formula-student-2013>
- [3] PÍŠKA, Miroslav a Milan FOREJT. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [4] AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: *Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook*. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [5] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [6] General turning. *Sandvik Coromant* [online]. © 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/general\\_turning/application\\_overview/Pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/general_turning/application_overview/Pages/default.aspx)
- [7] SMITH, Graham T. *Cutting tool technology: Industrial handbook*. London: Springer, © 2008, 599 s. ISBN 978-1-84800-204-3..
- [8] ANTON, Humár. *Technologie I - Technologie obrábění - 1.část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
- [9] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology: Jak je to s řeznými silami. *MM Průmyslové spektrum: Automatizace a regulace v procesech*. Praha, 2012, č. 3, s. 68-69. ISSN: 1212- 2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami.html>
- [10] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie výroby II: Studijní opory pro obor Strojírenská technologie* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby\\_II.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf)

- [11] HUMÁR, Anton. *Výrobní technologie: Syllabus předmětu Výrobní technologie II* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobnTechnologie\\_II.pdf](http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/VyrobnTechnologie_II.pdf)
- [12] Ke stažení - katalogy: Katalog soustružení. *PRAMET Tools* [online]. © 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.pramet.com/cz/ke-stazeni.html>
- [13] Downloads: Catalogues. *Sandvik Coromant* [online]. © 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/downloads/Pages/search.aspx?q=Catalogues>
- [14] Machining Navigator: Soustružení. *Seco Tools* [online]. 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews2\\_2011/MN/turning/Turning%202012\\_CZ\\_LR.pdf](http://www.secotools.com/CorpWeb/Downloads/seconews2_2011/MN/turning/Turning%202012_CZ_LR.pdf)
- [15] Product Overview. *DMG / MORI SEIKI* [online]. 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://cz.dmgmorseiki.com/sites/en/productmap>
- [16] HUMÁR, Anton. *Technologie I - Základní metody obrábění - 1. část: Interaktivní multimediální text pro magisterskou formu studia* [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-ave/zakl\\_met\\_obr/zakl\\_met\\_obr\\_1](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-ave/zakl_met_obr/zakl_met_obr_1)
- [17] Cutter position: Milling. *Sandvik Coromant* [online]. 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/milling/getting\\_started/general\\_guidelines/cutter\\_position/Pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/cutter_position/Pages/default.aspx)
- [18] Vibration: Milling. *Sandvik Coromant* [online]. 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/milling/getting\\_started/general\\_guidelines/vibration/Pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/vibration/Pages/default.aspx)
- [19] Druhy fréz. *Tumlikovo.cz* [online]. © 2010 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/druhy-frez/>
- [20] Product Milling. *Iscar Czech Cutting Tools* [online]. © 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.iscar.cz/Products.aspx/CountryId/6/ProductId/3531>
- [21] *Technický týdeník: Upínače nástrojů (1)* [online]. Praha [vid. 2013-05-14]. ISSN 0040- 1064. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serial/upinace-nastroju/upinace-nastroju-1\\_8497.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serial/upinace-nastroju/upinace-nastroju-1_8497.html)



- [22] BORO VAN, Petr. *Technický týdeník: Upínače nástrojů (1)* [online]. Praha, 2012 [vid. 2013-05-14]. ISSN 0040- 1064. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serial/upinace-nastroju/upinace-nastroju-1\\_8497.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serial/upinace-nastroju/upinace-nastroju-1_8497.html)
- [23] AMBROŽ, Pavel. Upínače stopkových nástrojů. *MM Průmyslové spektrum*. 2008, č. 4, s. 38. ISSN 1212- 2572.
- [24] Upínání nástrojů smrštěním teplem i chladem. *MM Průmyslové spektrum*. 2003, č. 4, s. 24. ISSN 1212- 2572.
- [25] Toolholding Systems. *SCHUNK GmbH & Co.* [online]. © 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://www.schunk.com/schunk\\_files/attachments/catalog\\_ToolholdingSystems\\_DE\\_EN.pdf](http://www.schunk.com/schunk_files/attachments/catalog_ToolholdingSystems_DE_EN.pdf)
- [26] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [27] MICHNA, Štefan, I. LUKÁČ, V. OČENÁŠEK, R. KOŘENÝ, J. DRÁPALA, H. SCHNEIDER a A. MIŠKUFOVÁ. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. ISBN 80-890-4188-4.
- [28] DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu I: Přednášky: určeno pro posl. Fakulty strojního inženýrství*. 3. vyd. Brno: VUT, 1989, 247 s. Učební texty vys. škol. ISBN 80-214-1028-0.
- [29] PLAZA, Diego, Juan ASENSIO, Jose A. PERO-SANZ a Jose I. VERDEJA. Microstructure, a Limiting Parameter for Determining the Engineering Range of Compositions for Light Alloys. *Materials Characterization* [online]. 1998, vol. 40, issue 3, s. 145-158 [vid. 2013-05-14]. DOI: 10.1016/S1044-5803(98)00004-7. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580398000047>
- [30] SONGMENE, V., R. KHETTABI, I. ZAGHBANI, J. KOUAM a A. DJEBAR. Machining and Machinability of Aluminum Alloys. *Aluminium Alloys, Theory and Applications* [online]. InTech, 2011-02-04 [vid. 2013-05-14]. DOI: 10.5772/14888. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/aluminium-alloys-theory-and-applications/machining-and-machinability-of-aluminum-alloys>
- [31] ISO N Neželezné materiály. *Sandvik Coromant* [online]. 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece\\_materials/iso\\_n\\_non\\_ferrous\\_materials/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_n_non_ferrous_materials/pages/default.aspx)

- [32] Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem. *MM Průmyslové spektrum*. 2002, č. 4, s. 61. ISSN 1212-2572.
- [33] Frézování hliníku. *Sandvik Coromant* [online]. 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting\\_started/milling\\_different\\_materials/aluminium\\_milling/Pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/milling_different_materials/aluminium_milling/Pages/default.aspx)
- [34] Quattromill Alu. *SECO Tools* [online]. © 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/en/Global/Products/Milling/Face-milling/Quattromill-AL/>
- [35] Aluminum Machining, Machining Aluminum, High Speed Machining. *Radical Departures* [online]. © 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.radical-departures.net/articles/understanding-the-elements/>
- [36] CERTAL - Technical data sheet. *ALMET Belgium* [online]. 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.almet-belgium.be/web/media/DATASHEETS/CERTAL.pdf>
- [37] TU Brno Racing. *Interní materiály a podklady týmu*. Brno, 2013.
- [38] Sinumerik 840D sl: ShopTurn. *SIEMENS* [online]. 2008 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://cache.automation.siemens.com/dnl/zM/zM0Mjk4MwAA\\_28739059\\_HB/BATsl\\_0108\\_cz.pdf](http://cache.automation.siemens.com/dnl/zM/zM0Mjk4MwAA_28739059_HB/BATsl_0108_cz.pdf)
- [39] PowerMILL: CAD CAM pro 2D, 3D a 5D frézování. *Delcam* [online]. 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.delcam.cz/produkty/powermill/>
- [40] ŠIMONEK, Pavel, Michal JELÍNEK a Aleš POLZER. *Aplikace CAD/CAM v technologii: vzdělávací a tréninkový modul*. Vysoké Učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství. Brno, 2012, 343 s.
- [41] BOSCH - Pressforum. *BOSCH s.r.o.* [online]. 2007 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://press.bosch.cz/detail.asp?f\\_id=645](http://press.bosch.cz/detail.asp?f_id=645)
- [42] BOSCH Česká republika. *BOSCH s.r.o.* [online]. 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.bosch.cz/>
- [43] Gildemeister GTX 210. *DMG / MORI SEIKI* [online]. 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://tr.dmg.com/presse\\_id,2a5db10d000b9b35c1256f10002f8737?opendocument&p=3&kap=\\$\\$\\$\\$](http://tr.dmg.com/presse_id,2a5db10d000b9b35c1256f10002f8737?opendocument&p=3&kap=$$$$)
- [44] MCV 754 QUICK. *KVOSVIT MAS* [online]. © 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.kovosvit.cz/cz/mcv-754-quick>

- [45] Produkty - měřicí a seřizovací přístroje. *ZOLLER* [online]. 2012 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.zoller.cz/produkty.html>
- [46] Iscar Catalog : SGFH/R/L. *ISCAR Cutting Tools* [online]. 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/Ecat/item.asp?app=&mapp=TG&fnum=373&GFSTYP=M&tool=T&cat=2300526&lang=WZ>
- [47] PROKOP, Jaroslav. *Přednášky z předmětu HTR Vybrané statě z obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013.
- [48] O společnosti. *ALFUN a.s.* [online]. 2013 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/>
- [49] ALFUN a.s. *Interní materiály a podklady firmy*. Brno, 2013.
- [50] BOSCH DIESEL s.r.o. *Interní materiály a podklady firmy*. Jihlava, 2013.
- [51] O společnosti. *Frentech Aerospace s.r.o.* [online]. 2010 [vid. 2013-05-14]. Dostupné z: [http://www.frentech.eu/index\\_c.php](http://www.frentech.eu/index_c.php)
- [52] PÍŠKA, Miroslav. *Hodinové sazby pracovišť laboratoře C2 (ústní konzultace)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013.
- [53] Frentech Aerospace s.r.o. *Interní materiály a podklady firmy*. Brno, 2013.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
$A_D$	[mm <sup>2</sup> ]	Jmenovitý průřez třísky
$a_e$	[mm]	Šířka frézované plochy
Al	[-]	Hliník
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	[-]	Oxid hlinitý
$a_p$	[mm]	Šířka záběru hlavního ostří
ASM	[-]	American society for metals
B	[mm]	Šířka frézované plochy
$b_D$	[mm]	Jmenovitá šířka třísky
B <sub>i</sub>	[-]	Bismut
CAD	[-]	Computer aided design
CAM	[-]	Computer aided manufacturing
Cd	[-]	Kadmium
$C_{Fc}$	[-]	Konstanta vyjadřující vliv obráběného mat.
CNC	[-]	Computer numerical control
$C_s$	[Kč]	Pořizovací cena stroje
Cu	[-]	Měď
ČSN	[-]	České státní normy
D	[mm]	Jmenovitý průměr
$D_{max}$	[mm]	Maximální průměr soustružené čelní plochy
$D_{min}$	[mm]	Minimální průměr soustružené čelní plochy
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
EN	[-]	Evropské normy
f	[mm]	Posuv na otáčku
F	[N]	Celková řezná síla
$F_C$	[N]	Řezná síla
$F_{ci}$	[N]	Řezná síla (pro jeden zub)
$F_{cNi}$	[N]	Kolmá řezná síla (pro jeden zub)
Fe	[-]	Železo
$F_{ef}$	[h]	Efektivní časový fond stroje za rok
$F_f$	[N]	Posuvová síla

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
$F_{fi}$	[N]	Posuvová síla (pro jeden zub)
$F_{fNi}$	[N]	Kolmá posuvová síla (pro jeden zub)
$F_i$	[N]	Celková řezná síla (pro jeden zub)
$F_p$	[N]	Pasivní síla
FSI	[-]	Fakulta strojního inženýrství
$f_z$	[mm]	Posuv na zub
H	[mm]	Hloubka odebírané vrstvy
$h_D$	[mm]	Jmenovitá tloušťka třísky
HSS	[-]	High speed steel
ISO	[-]	International organization for standardization
$k_c$	[MPa]	Měrná řezná síla
L	[mm]	Dráha nástroje ve směru posuvu
l	[mm]	Délka obráběné plochy
$l_n$	[mm]	Délka náběhu
$l_p$	[mm]	Délka přeběhu
Mg	[-]	Hořčík
Mn	[-]	Mangan
n	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky
n	[ks]	Počet vyrobených zubů
$N_{Am}$	[Kč.ks <sup>-1</sup> ]	Jednotkové náklady na materiál.
$N_{Aps}$	[Kč.ks <sup>-1</sup> ]	Jednotkové náklady provozu CNC stroje
NC	[-]	Numerical control
$N_c$	[Kč]	Celkové výrobní náklady
$N_d$	[Kč]	Náklady na demontáž stroje
$N_{hs}$	[Kč.h <sup>-1</sup> ]	Náklady na hodinu provozu CNC stroje
Ni	[-]	Nikl
$N_i$	[Kč]	Náklady na instalaci stroje
$n_z$	[-]	Počet zubů v záběru
$P_c$	[W]	Řezný výkon
PKD	[-]	Polykrystalický diamant
PKNB	[-]	Polykrystalický kubický nitrid bóru
$P_m$	[W]	Výkon elektromotoru obráběcího stroje



Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
SEM	[-]	Scanning electron microscope
$S_f$	[Kč.h <sup>-1</sup> ]	Fixní hodinová sazba
Si	[-]	Křemík
SK	[-]	Slinuté karbidy
Sn	[-]	Cín
$t_{AS}$	[min]	Jednotkový strojní čas
TiAlN	[-]	Titan Aluminium Nitrid
TiCN	[-]	Karbonitrid titanu
TiN	[-]	Nitrid titanu
$t_{mA}$	[min]	Jednotkový čas CNC stroje
$t_{mA4}$	[min]	Jednotkový čas chodu CNC stroje
$t_{mA5}$	[min]	Jednotkový čas klidu CNC stroje
$t_{mA6}$	[min]	Jednotkový čas interference CNC stroje
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička
$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	Řezná rychlost
$v_f$	[m.min <sup>-1</sup> ]	Posuvová rychlost
VUT	[-]	Vysoké učení technické
WC	[-]	Karbid wolframu
x	[-]	Exponent vlivu tloušťky třísky
$x_{Fc}$	[-]	Exponent vlivu $a_p$
$y_{Fc}$	[-]	Exponent vlivu f
z	[-]	Počet zubů frézy
Z	[r]	Doba životnosti stroje
Zn	[-]	Zinek
$\alpha$	[-]	Označení tuhého roztoku
$\eta_m$	[-]	Mechanická účinnost obráběcího stroje
$\kappa_r$	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
$\phi_i$	[°]	Úhel posuvového pohybu
$\phi_{max}$	[°]	Maximální úhel posuvového pohybu
$\psi$	[°]	Úhel záběru frézy

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1      Technický list slitiny CERTAL
- Příloha 2      Výkres příruby náboje zadního kola formule
- Příloha 3      Výrobní technologický postup

## CERTAL®

Znaky slitiny	
Slitina	EN AW 7022 [AlZn5Mg3Cu], speciální typ
Typ slitiny	vytvrditelná
Povrch	T651, uvolněný
Stav materiálu	válcovaný povrh

Mechanické vlastnosti <sup>1)</sup>		typické hodnoty
Mez kluzu R <sub>p0,2</sub>	[MPa]	400 - 495
Pevnost v tahu R <sub>m</sub>	[MPa]	490 - 555
Tažnost A <sub>50</sub>	[%]	6 - 9
Tvrdoost HBW	[2,5/62,5]	165 - 170

Fyzikální vlastnosti <sup>1)</sup>		typické hodnoty
Objemová hmotnost	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,76
Modul pružnosti	[GPa]	72
Elektrická vodivost	[m/Ω · mm <sup>2</sup> ]	18 - 22
Koeficient tepelné roztažnosti	[K <sup>-1</sup> · 10 <sup>-6</sup> ]	23,6
Tepelná vodivost	[W/m · K]	120 - 150
Specifická tepelná kapacita	[J/kg · K]	862

Technologické vlastnosti <sup>2)</sup>		
Tvarová stálost/vnitřní pnutí		2 - 3
Obrobitelnost		1
Vhodnost k erozivnímu obrábění		1
Svařitelnost (plyn / WIG / MIG / Odporové / EB)		6 / 5 / 5 / 2 / 3
Odolnost proti korozi (mořská voda / povětrí / SpRK)		5 / 5 / 3
Použití při vysokých teplotách (max. °C při dlouhodobém/krátkodobém zatížení) <sup>3)</sup>		90 / 120
Eloxování (technické / dekorativní / tvrdé-) <sup>4)</sup>		3 / 6 / 2
Leštitelnost		1
Vhodnost k leptání struktur		1 - 2
Kontakt s potravinami (podle EN 602)		ne

Tolerance			
Při tloušťce [mm]	Rovinnost [mm] <sup>5)</sup>	Tloušťka [mm]	Délka & Šířka [mm]
8 - 140	gem. EN 485-3	gem. EN 485-3	EN 485-3
Zuschnitte			DIN ISO 2768-1m

Dodávané formáty		
Formáty [mm]	1.520 × 3.020	u tloušťek od 8 - 100 mm
	1.400 × 3.020	u tloušťek od 110 mm
	1.200 × 3.020	u tloušťek od 120 - 130 mm
	950 × 3.020	u tloušťek od 140 mm
Tloušťky na skladě	8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	
	60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140	

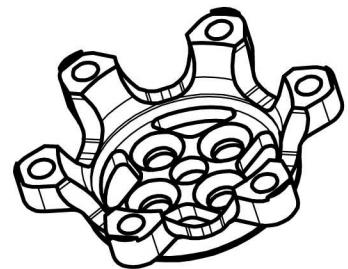
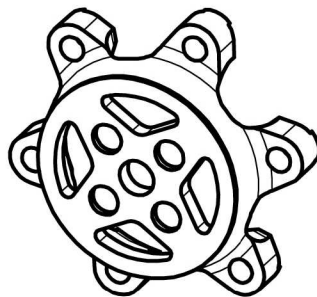
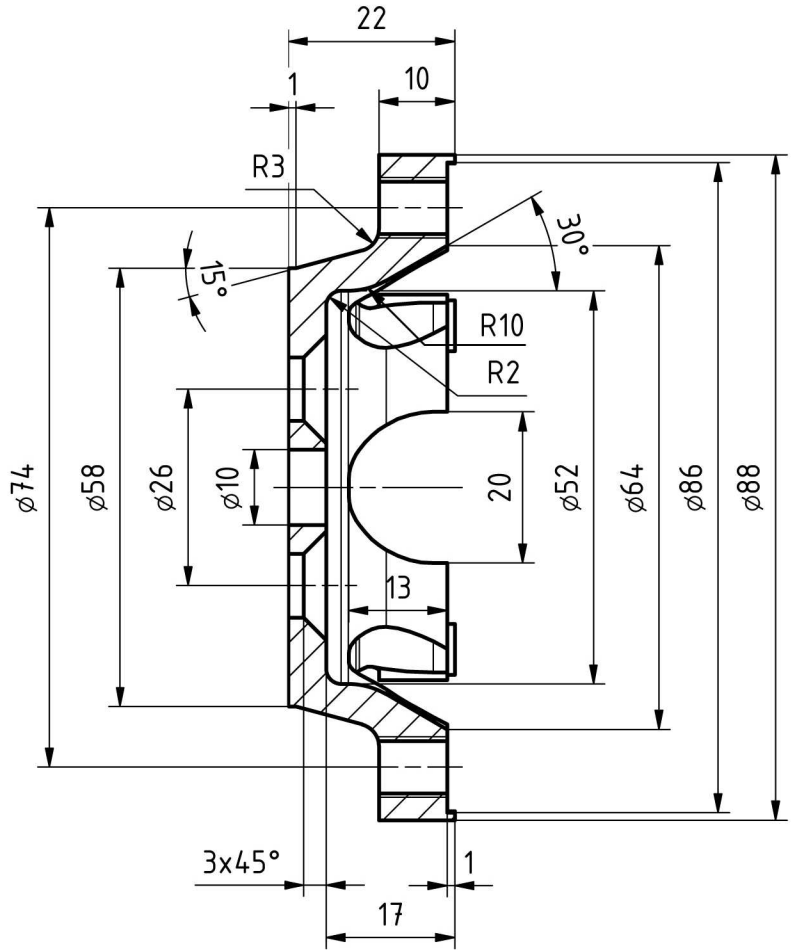
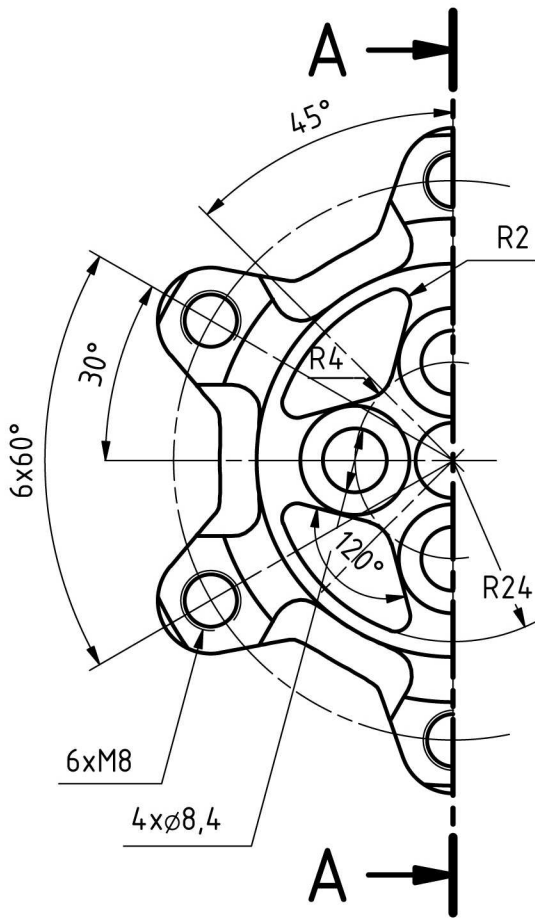
Další tloušťky podle poptávky!

Datum: 03.04.2013

- 1) Typické hodnoty při pokojové teplotě.
- 2) Relativní hodnoty hliníkových materiálů od 1 (velmi dobrý) do 6 (nehodný).
- 3) Bez ztráty pevnosti po ochlazení.
- 4) Výlučně technická anodizace. Neposkytujeme žádnou záruku na barevný vzhled/řešení.
- 5) Tolerance rovinnosti se měří výlučně na měřících stolech a s použitím ocelového pravítka.

Příloha 2

A-A ( 1 : 1 )



Ra 3,2

PŘESNOST	ISO2768-mK	Materiál	CERTAL EN AW 7022
TOLEROVÁNÍ	ISO8015	Polotovár	ø 90-40
PROMÍTÁNÍ		Hmotnost	0,062 kg
Měřítko	Poznámka	Navrhl	Lučaník Aleš
1:1		Datum	23.1.2013
č.seznamu			
č. sestavy	DRG3-RSA-100		
starý výkr.			
nový výkr.			

VUTFSI-ÚST

Název

PŘÍRUBA NÁBOJE ZADNÍHO KOLA

Čís. výkresu

DRG3-RSA-103

Listů 1

List 1

# Příloha 3

VUT FSI ÚST BRNO		VÝROBNÍ POSTUP		Název součásti:	PŘÍRUBA NÁBOJE ZADNÍHO KOLA	Číslo výkresu:	DRG3-RSA-103		
Dne: 25.03.2013		Vyhotožil: Lučaník Aleš		Polotovaru: ø90 - 40 mm		Materiál polotovaru: CERTAL - EN AW-7022			Číslo listu: 1/1
Číslo op. / ús.	Název, označení stroje	Popis práce v operaci	Výrobní nástroje, přípravky, měřidla, pomůcky	Poz. v nástr. hlavě	Výrobní podmínky				
					$v_c$ [m/min]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$f$ [mm]	$a_p$ [m/min]	$t_{ma4}$ [min]
1/1	CNC soustruh Gildemeister CTX 210	Upnout do sklíčidla za délku 8 mm.							
1/2		Zarovnat čelo 0,8 mm nahrubo.	sous. nůž vnější ISCAR: SDJCL 2020K11; VBD: DCGT 11T304-AS	1	160		0,18	0,5	0,42
1/3		Soustružit vnější konturu nahrubo ( $p = 0,4$ mm).	sous. nůž vnější ISCAR: SDJCL 2020K11; VBD: DCGT 11T304-AS	1	140		0,30	1,0	7,05
1/4		Soustružit čelo načisto.	sous. nůž vnější ISCAR: SVJCL 2020K-16; VBD: VCGT 160404-AS	2	180		0,12	0,2	0,11
1/5		Soustružit vnější konturu načisto.	sous. nůž vnější ISCAR: SVJCL 2020K-16; VBD: VCGT 160404-AS	2	220		0,12	0,4	0,37
2/1		Zkontrolovat rozměry.	mikrometr, výškoměr, hloubkoměr, posuvné měřtko (vše digitální)						
3/1		Otočit, upnout do sklíčidla za ø50 ve vzd. 9 mm.							
3/2		Zarovnat čelo 0,8 mm.	sous. nůž vnější ISCAR: SDJCL 2020K11; VBD: DCGT 11T304-AS	1	160		0,20	0,5	0,39
3/3		Navrtat středící důlek.	středící vrták ø9,5 - 90° PRAMET: 301CS-9,5-70-P90A10	4	30	1000	0,12		0,18
3/4		Vrtat díru ø10 do vzdálenosti 26 mm.	šroubovitý vrták ø10 KORLOY: SSD100	6	25	800	0,13		0,30
3/5		Vrtat díru ø35 do vzdálenosti 16,6mm.	vrták ø35 ISCAR: DR 035-070-32-12; VBD: SDMT 120408-DT	8	100	900	0,15		0,16
3/6		Soustružit vnitřní konturu nahrubo ( $p = 0,4$ mm).	sous. nůž vnitřní KORLOY: A12K SDUCL07; VBD: DCGT 070208-AR	11	100		0,25	1,0	4,90
3/7		Soustružit obvod na ø88,8 mm načisto.	sous. nůž vnější ISCAR: SVJCL 2020K-16; VBD: VCGT 160404-AS	2	230		0,12	0,4	0,13
3/8		Soustružit vnitřní konturu načisto.	sous. nůž vnitřní CERATIZIT: S16M SDUCL07; VBD: DCGT 070204FN-27	10	150		0,12	0,4	0,47
4/1	Ručně odstranit ostřiny a zkontrolovat rozměry.	ruční odjehlovač, mikrometr, hloubkoměr, posuvné měřtko (vše digitální)							
5/1	CNC obráběcí centrum MCV 754 QUICK	Upnout do sklíčidla za ø50 mm.							
5/2		Frézovat boční drážky nahrubo. ( $p = 0,2$ mm).	čelní válcová fréza stopková ø12 FRANKEN: 1018.012		150	3900	0,20	2,8	6,22
5/3		Frézovat boční drážky - zbytkové hrubování ( $p = 0,2$ mm).	čelní válcová fréza stopková ø8 FRANKEN: 1006.08		100	3900	0,20	1,3	9,43
5/4		Frézovat kapsy na dně nahrubo (příd. 0,1 mm).	čelní válcová fréza stopková ø8 FRANKEN: 1006.08		100	3900	0,20	2,0	3,73
5/5		Frézovat kapsy na dně - zbytkově načisto.	čelní válcová fréza stopková ø4 FRANKEN: 1006C.04		70	5500	0,10	1,0	6,78
5/6		Frézovat obvod a boční drážky načisto.	kulová fréza stopková ø10 FRANKEN: 3326C.010		160	5000	0,10	0,2	12,10
5/7		Vrtat 4 x díru ø8,4mm do vzd. 9 mm.	šroubovitý vrták ø8,4 GARANT: 113020 8,4		50	1895	0,20		0,25
5/8		Vrtat 4 x zahloubení 3x45°.	kuželový záhlubník ø16 - 90° FRANKEN: 7560T.090016		40	800	0,12		0,43
5/9		Vrtat 6x díru ø6,8mm skrz.	šroubovitý vrták ø6,8 GARANT: 113020 6,4		50	2300	0,18		0,32
5/10		Řezat 6x závit M8.	strojní závitník M8 GARANT: 131120 M8		8	300			0,48
6/1	Ručně odstranit ostřiny a zkontrolovat rozměry.	ruční odjehlovač, mikrometr, hloubkoměr, posuvné měřtko (vše digitální)							
7/1	CNC soustruh Gildemeister CTX 210	Upnout do sklíčidla za ø50 ve vzd. 8 mm.							
7/2		Soustružit upichnout na konečnou délku 22 mm.	sous. nůž vnější upichovací ISCAR: SGFH 32-4; VBD: GFN 4A		140		0,06	4,0	0,42
8/1		Ručně odstranit ostřiny a zkontrolovat rozměry.	ruční odjehlovač, mikrometr, hloubkoměr, posuvné měřtko (vše digitální)						
								<b>Σ</b>	<b>54,64</b>