

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ,  
PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



METODIKA APLIKACE FRÉZOVACÍHO SOUSTRUŽENÍ  
PŘI HRUBOVÁNÍ ROTAČNÍCH SOUČÁSTÍ

*Autor:* Jindřich Štercl

*Vedoucí:* Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

Červenec 2020



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štercl** Jméno: **Jindřich** Osobní číslo: **475004**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Metodika aplikace frézovacího soustružení při hrubování rotačních součástí**

Název bakalářské práce anglicky:

**Application of turn-milling during roughing of rotary parts**

Pokyny pro vypracování:

Hrubovací operace na rotačních součástech jsou časově náročné a zároveň obtížné kvůli působícím silám. Možným řešením problému je využití technologie frézovacího soustružení, kdy je pevný nástroj nahrazen rotující frézou. Na základě analýzy zdrojů proveďte:

1. Zmapování této technologie - teorie, výpočty.
2. Najděte články s touto tematikou.
3. Zmapujte jak je tom softwarová podpora v CAMEch a dílenském programování.
4. Zjistěte, jak tuto technologii lze aplikovat v našich podmínkách.
5. Pokud to bude možné, proveďte experiment z nasazení této metody a proveďte vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

[https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/application\\_overview/turn\\_millin](https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/application_overview/turn_millin)

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


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

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


Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

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

  
Ing. Jan Tomíček, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce


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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23.6.2020  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta



**Prohlášení autora**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne . . . . .

. . . . .

podpis autora



## **Poděkování**

Chtěl bych mnohokrát poděkovat Ing. Janu Tomíčkoví, Ph.D. za jeho cenné rady a čas, který mi věnoval při tvorbě mé bakalářské práce. Velké díky patří také rodině a přátelům za neutuchající psychickou podporu ve strastiplných chvílích.





**Název práce:** Metodika aplikace frézovacího soustružení při hrubování rotačních součástí

**Autor:** Jindřich Štercl

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

**Abstrakt:** Tato práce se zabývá perspektivní technologií frézovací soustružení. Jsou popsány 3 druhy frézovacího soustružení, síly působící na frézu a vznik tepla při obrábění. Je vysvětlen pojem excentricita, který je stěžejní pro pochopení této technologie. Dále je pozornost věnována chybám tvaru specifickým pro tento druh obrábění a výběru řezných podmínek s cílem omezení tvarových chyb a maximalizaci odběru materiálu. Poté se práce zaměřuje na využití této technologie v podmínkách ČVUT.

**Klíčová slova:** frézovací soustružení, rychlost odběru materiálu, MRR, excentricita, řezné podmínky, chyby tvaru



**Title:** Application of turn-milling during roughing of rotary parts

**Author:** Jindřich Štercl

**Supervisor:** Ing. Jan Tomíček, Ph.D.

**Abstract:** This thesis is about a perspective technology called turn-milling. 3 kinds of turn-milling are described as well as force acting on a milling tool and heat generated during cutting process. The concept of excentricity is explained, which is crucial to understand this technology. The attention is then focused on form errors specific for this type of machining and choice of cutting parameters with consideration of maximizing material removal rate while avoiding form errors. Then, the thesis looks at how turn-milling can be used in CTU facilities.

**Index terms:** turn-milling, material removal rate, MRR, excentricity, cutting parameters, form error



# Obsah

Zadání	iii
Abstrakt	ix
Abstract	xi
Obsah	xiii
Seznam obrázků	xiv
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Druhy FS a tvar třísky</b>	<b>3</b>
2.1 Ortogonální FS . . . . .	3
2.2 Tangenciální FS . . . . .	6
2.3 Koaxiální FS . . . . .	7
<b>3 Excentricita</b>	<b>11</b>
<b>4 Síly působící na frézu</b>	<b>15</b>
<b>5 Zahřívání břitů</b>	<b>17</b>
<b>6 Rychlost odběru materiálu</b>	<b>19</b>
<b>7 Chyby výsledného tvaru</b>	<b>21</b>
7.1 Kruhovitost . . . . .	21
7.2 Hrboly (cusp) . . . . .	21
7.3 Obvodová drsnost . . . . .	23
<b>8 Volba řezných podmínek</b>	<b>25</b>
8.1 Řezné podmínky pro maximální MRR . . . . .	25
8.2 Řezné podmínky s ohledem na cenu a čas . . . . .	27

<b>9</b>	<b>Použití frézovacího soustružení na přístrojích ČVUT</b>	<b>29</b>
9.1	Přístroj a systém . . . . .	29
9.2	Srovnání FS a běžného soustružení . . . . .	30
<b>10</b>	<b>Závěr</b>	<b>33</b>
	<b>Literatura</b>	<b>34</b>

# Seznam obrázků

2.1	Schéma frézovacího soustružení a) z boku b) shora [7]. . . . .	3
2.2	a) Ortogonální frézovací soustružení b) geometrie neodříznuté třísky u ortogonálního frézovacího soustružení [7]. . . . .	4
2.3	Hlavní a vedlejší břít. Převzato z [8], upraveno autorem. . . . .	4
2.4	Řez neodříznutou třískou u ortogonálního frézovacího soustružení [7].	5
2.5	a) Tangenciální frézovací soustružení b) geometrie neodříznuté třísky u tangenciálního frézovacího soustružení [7]. . . . .	6
2.6	Průřez neodříznutou třískou u tangenciálního frézovacího soustružení [7]. . . . .	7
2.7	a) Koaxiální frézovací soustružení b) geometrie neodříznuté třísky u koaxiálního frézovacího soustružení [7]. . . . .	8
2.8	Průřez neodříznutou třískou u koaxiálního frézovacího soustružení [7].	9
2.9	Výsledek měření přesnosti kruhové interpolace [9]. . . . .	10
3.1	Schéma frézovacího soustružení - excentricita [10]. . . . .	11
3.2	Tvar třísky v závislosti na excentricitě a) nízká hodnota excentricity b) vysoká hodnota excentricity [10]. . . . .	12
5.1	Schéma pro analýzu přenosu tepla [11]. . . . .	18
6.1	Grafy závislosti MRR na $a_e$ , $n_w$ , $R_t$ a $R_w$ [7]. . . . .	20
7.1	Kruhovitost [7]. . . . .	22
7.2	Kruhovitost v závislosti na $a_p$ a $r_n$ [7]. . . . .	23
7.3	a) Izometrický pohled b) boční pohled c) horní pohled na součástku obráběnou frézovacím soustružením [7]. . . . .	23
7.4	Graf závislosti výšky hrbolů na $a_e$ , $r_n$ , $R_w$ a $R_t$ [7]. . . . .	24
7.5	a) Obrobek a fréza ve 3D b) šířka záběru c) schéma úhlu $\alpha$ [7]. . . . .	24
8.1	Proces výběru řezných podmínek. Za rovnici (X) si lze dosadit jednu z rovnic 8.4, 8.5 nebo 8.6 podle příslušných podmínek [10]. . . . .	25

8.2	Vliv excentricity a délky vedlejšího ostří na volbu maximálního axi- álního posuvu [10]. . . . .	27
9.1	Schéma revolverové hlavy stroje OKUMA GENOS L200E-MY [14]. . . . .	30



# Kapitola 1

## Úvod

Jednou ze základních technologických operací pro mnohé součásti je soustružení. Mezi jeho výhody patří nenáročnost na vybavení dílny a spolehlivost provozu. Bohužel v některých případech narážíme na jeho úskalí jako například při odebrání velkého objemu materiálu při velmi rozdílných průměrech na jedné součásti nebo při velkých otáčkách součásti, kdy se začínají rozvírat čelisti držící obrobek. V dějinách lidstva je naprosto běžným úkazem, že se člověk snaží nacházet stále chytřejší a rychlejší cesty, jak dosáhnout kýženého výsledku. Jinak tomu není ani ve strojařské praxi. Omezení postihující soustružení se v posledních desetiletích snažíme překlenout tím, že kombinujeme rotační pohyb obrobku a frézy [1].

Obrábění jednoduché, rotačně symetrické součásti pomocí frézovacího soustružení (turn-milling) bylo poprvé popsáno v roce 1990 [2]. Jednou z hlavních výhod této technologie je vysoká produktivita. Ta může být až dvacetinásobná oproti samotnému soustružení [3]. To považuji za hlavní důvod, proč je dobré se tímto tématem zabývat.

U takto vysoké produktivity by se mohl leckdo domnívat, že bude vyvážena velice špatným výsledným povrchem součásti. Ale není tomu tak. Všemi druhy frézovacího soustružení lze dosáhnout velmi dobrého výsledného povrchu za předpokladu, že zvolíme vhodné řezné podmínky. Například tangenciálním frézovacím soustružením lze dosahovat drsnosti  $R_a$  blížíící se té po broušení [3].

Dalším kladem je, že z podstaty této obráběcí metody vyplývá fakt, že řez bude přerušovaný (břity frézy nebudou nepřetržitě v záběru). Z toho plyne tvorba nesouvislé, příznivé třísky a umožňuje to břitům vychladnout, což snižuje opotřebení nástroje a tím prodlužuje životnost břitů [4, 5].

V druhé Kapitole 2 jsou popsány druhy frézovacího soustružení a jejich klady a zápory. Kapitola 3 se zaměřuje na problematiku excentricity. V Kapitole 4 a Kapitole 5 jsou stručně popsány síly a teplo vznikající při frézovacím soustružení (dále jen

FS). Kapitola 6 se věnuje rychlosti odběru materiálu. Kapitola 7 obsahuje informace o možných chybách tvaru a důvodech jejich vzniku a Kapitola 8 se zabývá volbou řezných podmínek. V 9 Kapitole je popsáno vybavení laboratoře, na kterém se dá FS použít a pomocí příkladu je provedeno srovnání klasického soustružení a FS. Kapitola 10 obsahuje shrnutí práce.

# Kapitola 2

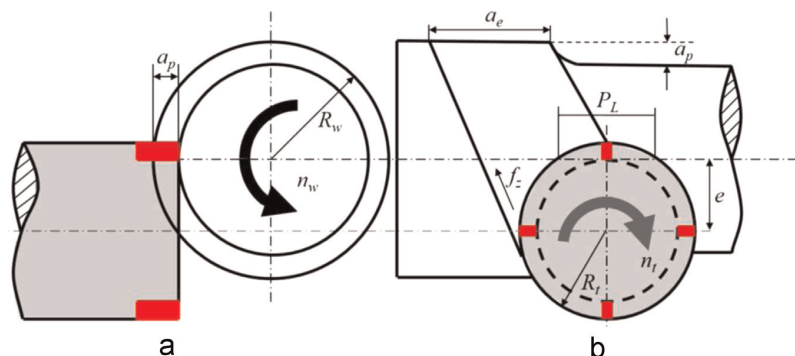
## Druhy FS a tvar třísky

Na rozdíl od klasického soustružení, kdy hlavní řezný pohyb koná obrobek, u FS je tříska odebírána kombinací rotačního pohybu obrobku a rotačního pohybu frézy. To prakticky znamená, že rozeznáváme dva typy posuvu: obvodový a axiální. Obvodový posuv je pohyb frézy okolo obrobku, který je výsledkem rotace obrobku. Axiální posuv je pak translační pohyb frézy rovnoběžný s osou obrobku (u koaxiálního FS kolmo k ose). Vektorovým součtem obou posuvů dostaneme posuv výsledný, který obkresluje šroubovici na povrchu obrobku. Parametry nutné k FS soustružení jsou popsány na Obrázku 2.1. Jsou to hloubka řezu ( $a_p$ ), posuv na zub ( $f_z$ ), posuv na otáčku obrobku ( $a_e$ ), excentricita ( $e$ ), otáčky frézky ( $n_t$ ), poloměr frézy ( $R_t$ ), otáčky obrobku ( $n_w$ ), poloměr obrobku ( $R_w$ ) a šířka záběru ( $P_L$ ). Z Obrázku 2.1 také vyplývá, že výsledný posuv se dá nahradit analogií běžného frézování [6, 7].

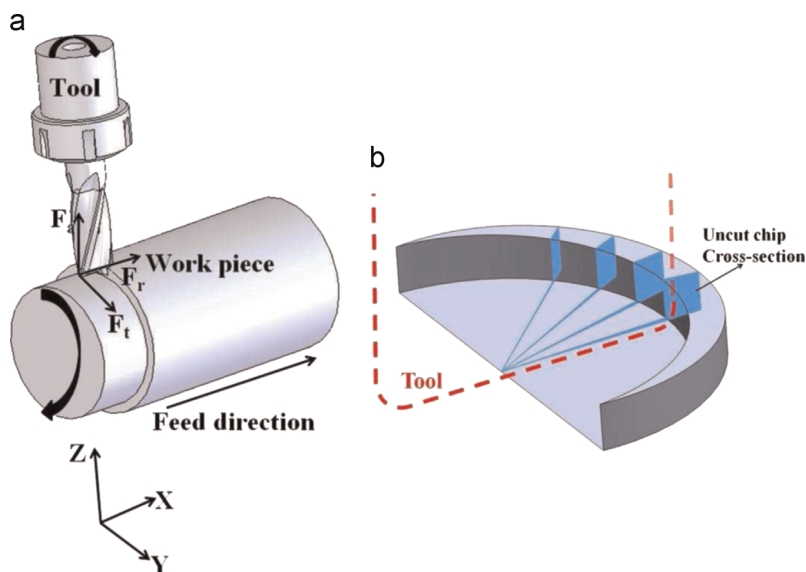
### 2.1 Ortogonální FS

U ortogonálního FS je osa rotace frézy kolmá na osu otáčení obrobku, to je vidět na Obrázku 2.2.

Oproti běžnému frézování se liší v tom, že na řezu se podílí kromě hlavního



Obrázek 2.1: Schéma frézovacího soustružení a) z boku b) shora [7].



Obrázek 2.2: a) Ortogonální frézovací soustružení b) geometrie neodříznuté třísky u ortogonálního frézovacího soustružení [7].



Obrázek 2.3: Hlavní a vedlejší břit. Převzato z [8], upraveno autorem.

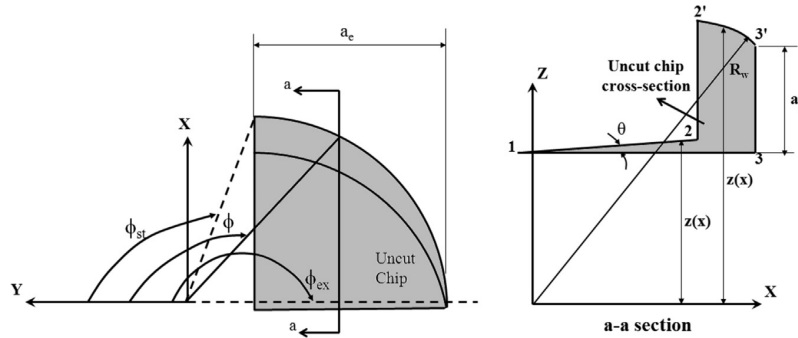
i vedlejší břit (minor cutting edge), naznačeno na Obrázku 2.3. To ovlivňuje síly působící na vřeteno, povrch a výsledný tvar obrobku.

Tvar třísky je stěžejní informace k přesnému popsání procesu. Obrázek 2.3 ukazuje řez neodříznuté, a tedy nezdeformované třísky. Body 1, 2 a 2' spojují výchozí pozici nástroje a body 1, 3 a 3' ukazují konečnou polohu nástroje po jedné otáčce frézy. Řez si lze pomyslně rozdělit na dvě části. První, spodní část, je utvářena vedlejším ostřím a druhá pak bokem frézy. Úsečka 1-2 zastupuje spodní část nástroje ve výchozí pozici a dá se vyjádřit jako

$$z(x) = \tan \theta x + \frac{(R_w - a_p)}{\cos \theta}, \quad (2.1)$$

kde

$$\theta = \frac{2\pi}{mr_n}, \quad (2.2)$$



Obrázek 2.4: Řez neodříznutou třískou u ortogonálního frézovacího soustružení [7].

$x$  je pozice v ose  $X$ ,  $m$  je počet zubů na nástroji a  $r_n$  je poměr mezi otáčkami frézy a otáčkami obrobku ( $n_t/n_w$ ). Úsečka 1-3 zastupuje spodní část nástroje v konečné pozici a můžeme si ji vyjádřit jako

$$z(x) = R_w - a_p. \quad (2.3)$$

Oblouk 2'-3' se vyjádří jako

$$z(x) = \sqrt{R_w^2 - x^2}. \quad (2.4)$$

$X$ -ové souřadnice bodů 1, 2 a 3 jsou dány rovnicemi

$$x_1 = (R_w - a_p) \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.5)$$

$$x_2 = \left\{ \left[ R_t - (R_w - a_p) + \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \tan \theta \right] \sin \theta \right\} \cos \theta \quad (2.6)$$

$$x_3 = R_t, \quad (2.7)$$

kde  $R_t$  je poloměr nástroje. Z těchto rovnic již můžeme odvodit tloušťku třísky pro libovolný úsek třísky. Pro úsek ohraničený úsečkami 1-2 a 1-3 je to

$$h(x) = \tan \theta x + \frac{R_w - a_p}{\cos \theta} - (R_w - a_p). \quad (2.8)$$

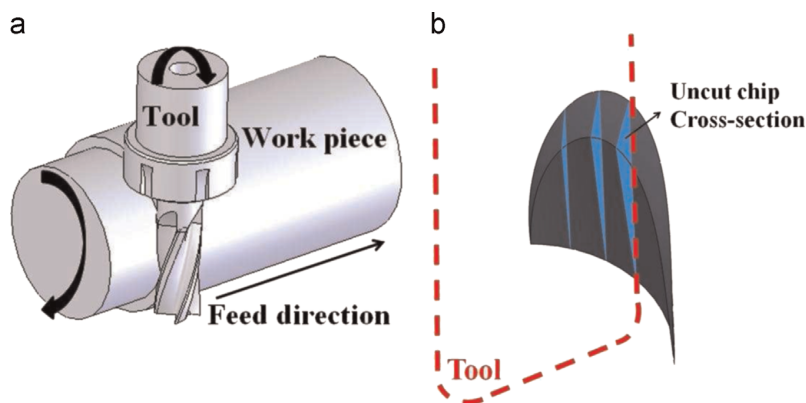
Pro druhý úsek, tedy ten ohraničený obloukem 2'-3' a úsečkou 1-3, si vyjádříme tloušťku třísky rovnicí

$$h(x) = \sqrt{R_w^2 - x^2} - (R_w - a_p). \quad (2.9)$$

Dalším důležitým parametrem ovlivňujícím geometrii třísky je posuv na otáčku ( $a_e$ ), který koresponduje s radiální hloubkou řezu u běžného frézování. Lze z něj určit úhel vstupu do záběru a výstupu ze záběru. Tyto úhly se dají vyjádřit následující dvojicí rovnic:

$$\varphi_{st} = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{R_t - a_p}{R_t}, \quad (2.10)$$

$$\varphi_{ex} = \pi. \quad (2.11)$$



Obrázek 2.5: a) Tangenciální frézovací soustružení b) geometrie neodříznuté třísky u tangenciálního frézovacího soustružení [7].

## 2.2 Tangenciální FS

U tangenciálního FS je, stejně jako u ortogonálního FS, osa rotace frézy kolmá na osu rotace obrobku. Rozdíl je v tom, že u tangenciálního FS je tříška odebrána pouze pomocí boků frézy, což je vidět na Obrázku 2.5, kde je modře naznačen průřez tříškou [7].

Úsečky 1-2, 1-3 a oblouk 2-3 ohraničují neodříznutou tříšku. Čára 1-2 označuje výchozí pozici nástroje a čára 1-3 označuje konečnou pozici nástroje (kde skončí po otočení obrobku o úhel  $\theta$ ). Oblouk 2-3 pak označuje část obvodu obrobku.

Úsečka 1-2 se dá vyjádřit jako

$$z(x) = \tan \theta x + \frac{R_w - \left[ \sqrt{R_t^2 - y^2} - (R_t - a_p) \right]}{\cos \theta}, \quad (2.12)$$

úsečka 1-3 se dá vyjádřit jako

$$z(x) = R_w - \left[ \sqrt{R_t^2 - y^2} - (R_t - a_p) \right] \quad (2.13)$$

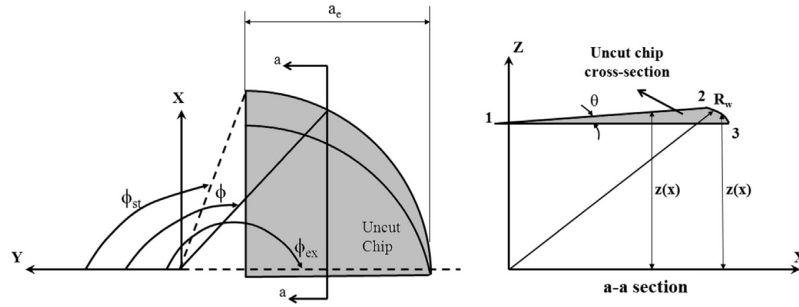
a oblouk 2-3 se vzjádří jako

$$z(x) = \sqrt{R_w^2 - x^2}. \quad (2.14)$$

Podobně jako u ortogonálního FS rozeznáváme u třísky dva regiony. První je mezi body  $x_1$  a  $x_2$ , zatímco druhý je mezi  $x_2$  a  $x_3$ . Hodnoty  $x_1$ ,  $x_2$  a  $x_3$  se dají vyjádřit takto:

$$x_1 = - \left\{ \frac{\sin \theta \left[ R_w - \left( \sqrt{R_t^2 - y^2} - (R_t - a_p) \right) \right]}{\cos \theta + 1} \right\} \quad (2.15)$$

$$x_2 = \cos \theta \sqrt{R_w^2 - \left[ R_w - \left( \sqrt{R_t^2 - y^2} - (R_t - a_p) \right) \right]^2}$$



Obrázek 2.6: Průřez neodříznutou třískou u tangenciálního frézovacího soustružení [7].

$$- \left\{ \sin \theta \left[ R_w - \left( \sqrt{R_t^2 - y^2} - (R_t - a_p) \right) \right] \right\} \quad (2.16)$$

$$x_3 = \sqrt{R_w^2 - \left[ R_w - \left( \sqrt{R_t^2 - y^2} - (R_t - a_p) \right) \right]^2}. \quad (2.17)$$

Úhel vstupu do záběru se u tangenciálního FS vyjádří jako

$$\varphi_{st} = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{a_e}{2R_t} \quad (2.18)$$

a úhel výstupu ze záběru je

$$\varphi_{ex} = \pi - \arcsin \frac{R_t - a_e}{R_t}. \quad (2.19)$$

Na Obrázku 2.6 je vyobrazen průřez neodříznuté třísky, který propojuje dohromady všechny rovnice v této kapitole.

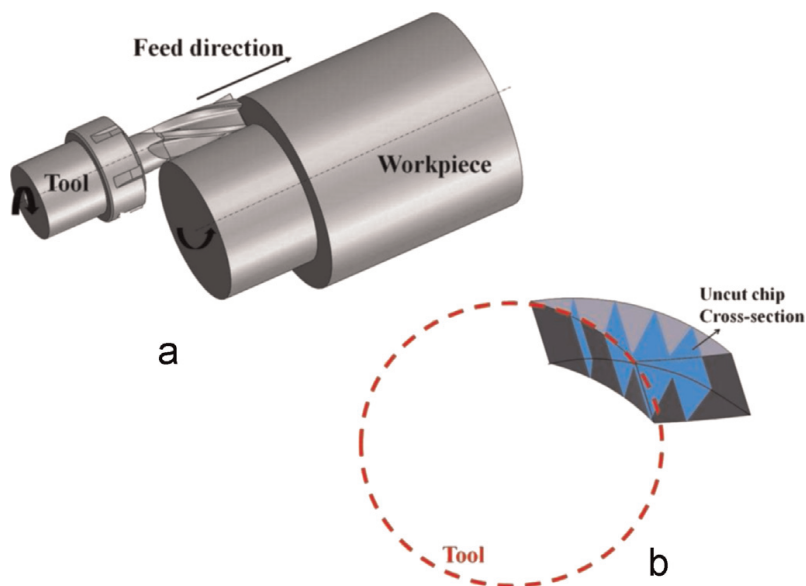
## 2.3 Koaxiální FS

Koaxiální FS (Obrázek 2.7) se vyznačuje se tím, že osy rotace frézy i obrobku jsou vzájemně rovnoběžné. Jako jediný druh FS se dá použít na obrábění vnitřních válcových ploch. Na rozdíl od ortogonálního a tangenciálního FS je průřez třískou ohraničen pouze oblouky 1-2, 1-3 a 2-3. Průřez dělíme stejně jako u předchozích způsobů na dva úseky. První je ohraničen oblouky 1-2 a 1-3 a druhý je ohraničen oblouky 1-3 a 2-3 (Obrázek 2.8). Tloušťka třísky v první oblasti se vyjádří jako

$$h = R_t - R_a, \quad (2.20)$$

kde

$$R_a = \frac{2(R_w + R_t - a_p) \sin(\theta/2) \cos((\pi - \theta) + \varphi)}{2} +$$



Obrázek 2.7: a) Koaxiální frézovací soustružení b) geometrie neodříznuté třísky u koaxiálního frézovacího soustružení [7].

$$\frac{\sqrt{[2(R_w + R_t - a_p) \sin(\theta/2) \cos((\pi - \theta) + \varphi)]^2 - 4 \{ [2(R_w + R_t - a_p) \sin(\theta/2)]^2 - R_t^2 \}}}{2} \quad (2.21)$$

V druhé oblasti se tloušťka třísky vyjádří jako

$$h = R_t - R_e, \quad (2.22)$$

kde

$$R_e = R_t - a_p + \frac{2 \tan^2(\varphi)(R_t - a_p) - 2R_w}{2(1 + \tan^2(\varphi)) \cos(\varphi)} - \frac{\sqrt{[(2 \tan^2(\varphi)(R_t - a_p) - 2R_w)]^2 - 4(1 + \tan^2(\varphi)) \tan^2(\varphi)(R_t - a_p)^2}}{2(1 + \tan^2(\varphi)) \cos(\varphi)}. \quad (2.23)$$

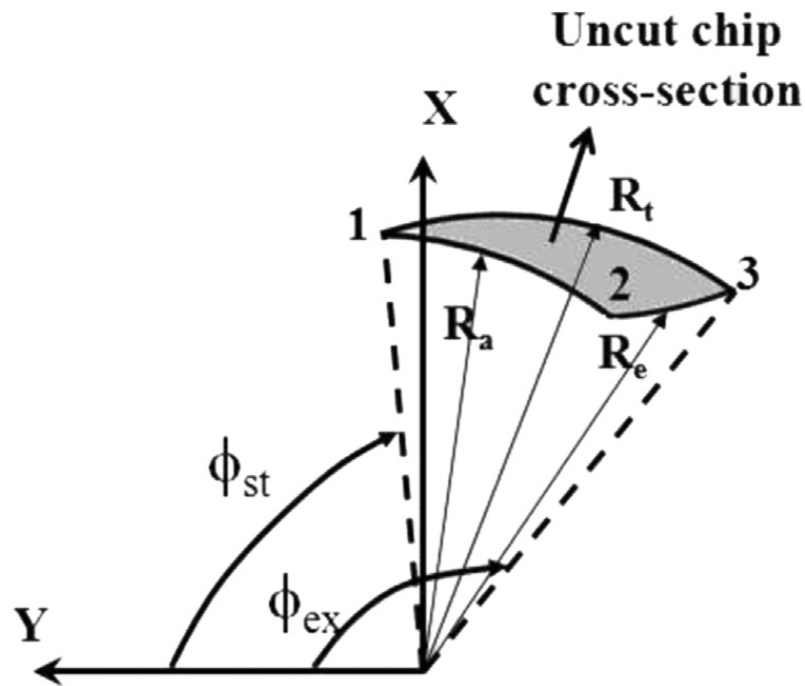
Krajní body třísky jsou u tohoto typu FS určeny přímo vstupním a výstupním úhlem řezu. Ty se v tomto případě určí jako

$$\varphi_{st} = \frac{\pi}{2}, \quad (2.24)$$

$$\varphi_{ex} = \arctan \left( \frac{\sqrt{R_w^2 - \left[ R_w - \frac{R_t^2 - (R_t - a_p)^2}{2(R_t - R_w - a_p)} \right]^2}}{R_t - a_p - \frac{R_t^2 - (R_t - a_p)^2}{2(R_t - R_w - a_p)}} \right). \quad (2.25)$$

Pokud se někdo nad kinematikou tohoto druhu FS zamyslí, může se mu na první pohled zdát, že je naprosto stejný při srovnání s kruhovým interpolovaným frézováním. Ve skutečnosti však bude součástka vyráběná koaxiálním FS přesnější. Je to





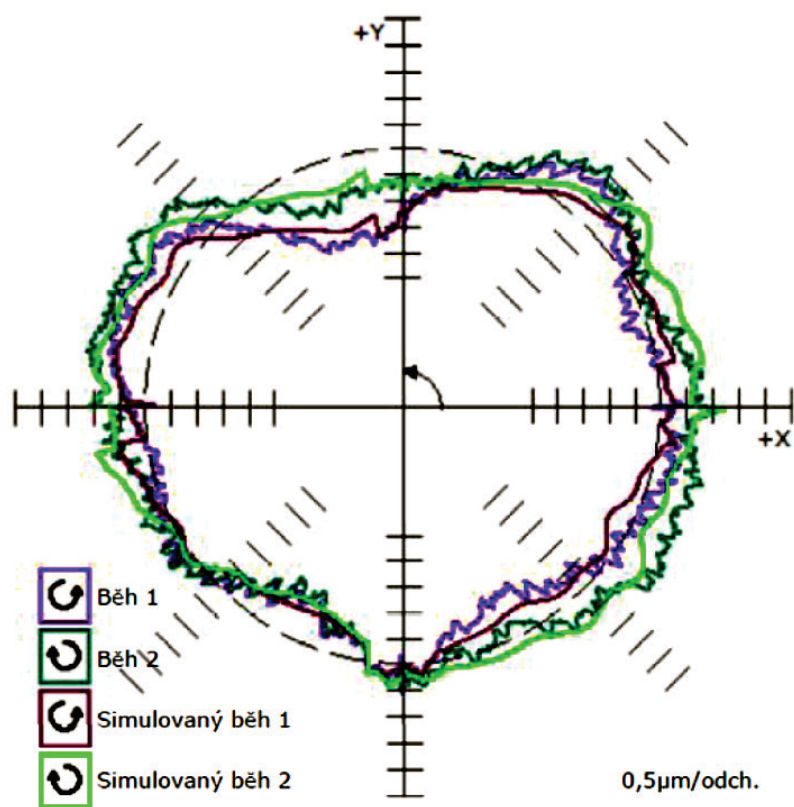
Obrázek 2.8: Průřez neodříznutou třískou u koaxiálního frézovacího soustružení [7].

způsobeno tím, že se frézovací nástroj pohybuje pouze v jedné ose. U kruhové interpolace se však vždy bude vyskytovat chyba způsobená převodem teoreticky hladkého oblouku (popřípadě spirály) do sítě s osami X a Y. Elektromotory ovládající pohyb frézy v těchto směrech pak dokážou nástrojem pohybovat jen s určitou minimální chybou.

Protože na žádném z přístrojů vlastněném ČVUT nebylo měření přesnosti kruhové interpolace provedeno, je zde uveden alespoň jeden diagram výsledku testu, který prováděl Beňo a kol. [9] na stroji podobné konfigurace.

Měření bylo provedeno za konstantní teploty, tlaku a vlhkosti laserovým interferometrem XL-80 a systémem Ballbar QC20-W, obojí od firmy Renishaw. Z testování vychází najevo, že chyba kruhové interpolace měřeného se pohybuje v řádu jednotek mikrometrů (Obrázek 2.9).

Pokud to tedy situace umožňuje, doporučuji použít koaxiální FS namísto kruhového interpolovaného frézování.



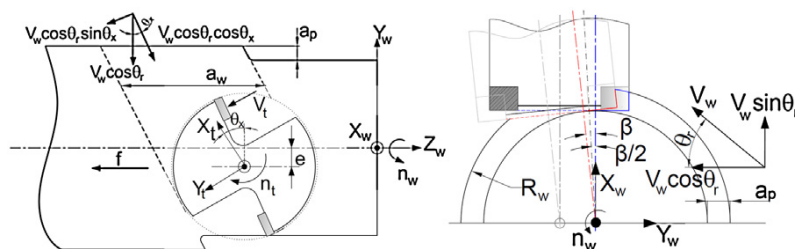
Obrázek 2.9: Výsledek měření přesnosti kruhové interpolace [9].

# Kapitola 3

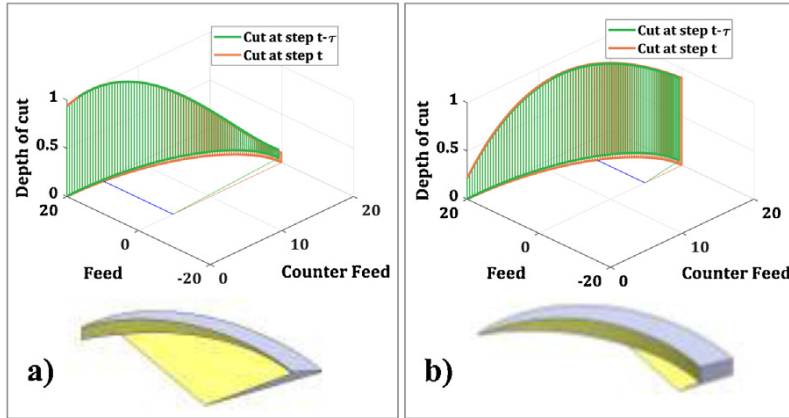
## Excentricita

Zbytek práce bude zaměřen především na ortogonálním FS. Koaxiální FS je pro hrubování nevhodné, protože jím můžeme obrábět pouze do takové hloubky, jak je dlouhá samotná fréza. Tangenciální konfigurace se nehodí z více důvodů. Aby se zabránilo kolizi vřetene a obrobku, musela by se zvolit relativně dlouhá fréza, kterou nemusí každá dílna disponovat. Hlavní omezení však představuje rozsah posuvu vřetena v ose Y. U stroje OKUMA GENOS L200E-MY, který je v halových laboratořích ČVUT, je rozsah v ose Y od +30 mm do -50 mm. Při zvolení frézy o průměru 10 mm, je možné hrubovat obrobek o maximálním průměru 90 mm. Při použití ortogonální konfigurace lze obrábět až do maximálního průměru, který je stroj schopen pojmout, tedy 200 mm. Na jiných strojích s většími průměry obrobku už jiné než ortogonální FS nepřipadá v úvahu.

Excentricita  $e$  je definována jako vzdálenost mezi osou frézovacího nástroje a osou obrobku a má významnou roli v ortogonálním FS. S tím, jak se mění hodnota excentricity, se musí měnit hodnota posuvu na otáčku obrobku  $a_e$  pro zachování kvalitního povrchu a udržení co nejvyššího odběru materiálu. Excentricita může být zvolena v rozmezí od nuly do maximální hodnoty závislé na poloměru obrobku, poloměru frézovacího nástroje, hloubce řezu a rádiu vyměnitelné břitové destičky.



Obrázek 3.1: Schéma frézovacího soustružení - excentricita [10].



Obrázek 3.2: Tvar třísky v závislosti na excentricitě a) nízká hodnota excentricity b) vysoká hodnota excentricity [10].

Tato maximální hodnota se dá určit podle vzorce

$$e_{max} = R_t - r_b + (R_w + r_b) \sin \left[ \cos^{-1} \left( 1 - \frac{a_p}{R_w + r_b} \right) \right], \quad (3.1)$$

kde  $r_b$  je rádius vyměnitelné břitové destičky. V ortogonálním FS se na řezu podílejí jak hlavní, tak vedlejší ostří frézy. Na fríze jsou tedy dvě oblasti, které odebírají materiál a na to, v jakém ho budou odebírat poměru, má zásadní vliv excentricita, viz Obrázek 3.2. Dále je popsána rovnice, kterou použil Berenji na simulaci tvaru neodříznuté třísky:

$$Z_i = \sqrt{R_w^2 - (R_t \sin(\theta_x + \phi_i))^2} - (R_w - a_p), \quad (3.2)$$

kde

$$\theta_x = \arctan \left( \frac{a_e}{2\pi R_w} \right) \quad (3.3)$$

a  $Z_i$  je hloubka řezu, která je závislá na aktuálním úhlu natočení  $\phi_i$  [10].

Z Obrázku 3.2 je vidět, že hloubka řezu během záběru není konstantní a tvar třísky se odvíjí od rozměrů polotvaru a frézy a také zvolené excentricity. Dále je z něj možné vyčíst vývoj hloubky řezu při použití frézy o poloměru 20 mm, kterou se obrábí polotvar o průměru 125 mm. Hloubka řezu byla zvolena 1 mm. V levé části Obrázku 3.2 je vidět tvar neodříznuté třísky při použití excentricity 5 mm, vpravo je pak excentricita 15 mm. Jak již bylo dříve řečeno, řezu se účastní i vedlejší ostří frézy. Na Obrázku 3.2 je vidět, že se zvyšující se excentricitou se snižuje podíl účasti vedlejšího ostří na tvorbě třísky. To se děje až do hraniční hodnoty excentricity  $e_b$ , poté už utváří třísku pouze břit hlavní. Hraniční excentricitu lze popsat rovnicí

$$e_b = R_t - m = R_t - (R_w - a_p) \frac{\theta}{2}, \quad (3.4)$$

kde  $m$  je závislé na poloměru obrobku, hloubce řezu a úhlu  $\phi$  [10].

---

Změnou excentricity se mění množství materiálu odebírané vedlejším ostřím a také úhel záběru, čímž je ovlivněna výsledná geometrie řezu a řezné síly. Zvýšením záběru vedlejšího ostří roste hlavně axiální síla na frézu. To může zejména u štíhlejších polotvarů vést k jejich prohýbání a tím pádem zhoršení jejich výsledného tvaru.



# Kapitola 4

## Síly působící na frézu

FS je operace, při které dochází k přerušovanému řezu. Důsledkem toho jsou periodicky působící řezné síly. Síly u ortogonálního FS popsal Karaguzel [6] s použitím cylindrických souřadnic:

$$dF_{t,j(\varphi,z)} = [K_{tc}h_j(\varphi_j(z)) + K_{te}] dz, \quad (4.1)$$

$$dF_{r,j(\varphi,z)} = [K_{rc}h_j(\varphi_j(z)) + K_{re}] dz, \quad (4.2)$$

$$dF_{a,j(\varphi,z)} = [K_{ac}h_j(\varphi_j(z)) + K_{ae}] dz, \quad (4.3)$$

kde  $z$  je axiální hloubka řezu,  $h$  je tloušťka třísky,  $\phi$  je aktuální pozice, index  $j$  vyjadřuje číslo břitu a  $K_t$ ,  $K_r$  a  $K_a$  jsou řezné koeficienty závislé na řezných podmínkách jako je tloušťka třísky a aktuální řezná rychlost.

Derivace sil jsou pak integrovány v oblasti záběru břitu, čímž lze dosáhnout následujících rovnic:

$$F_t(\phi_j(z)) = \int_{z_{j,1}}^{z_{j,2}} dF_t(\phi_j(z)) dz, \quad (4.4)$$

$$F_r(\phi_j(z)) = \int_{z_{j,1}}^{z_{j,2}} dF_r(\phi_j(z)) dz, \quad (4.5)$$

$$F_a(\phi_j(z)) = \int_{z_{j,1}}^{z_{j,2}} dF_a(\phi_j(z)) dz. \quad (4.6)$$

Tím je získána výsledná tečná, radiální a axiální síla od jednoho břitu na fréze.

Postup, jakým Karaguzel popsal síly působící na vřeteně, je správný, avšak v praxi bude jednodušší provést test pro konkrétní stroj, frézu, materiál a průměr obrobku.





# Kapitola 5

## Zahřívání břitů

Karaguzel se v článku publikovaném v roce 2017 [11] zabýval mimo jiné touto tématikou. Předpokládá, že veškerá mechanická energie se přemění na teplo, a že tepelné vlastnosti materiálu řezných destiček jsou konstantní. Dále uvažuje, že jediným zdrojem tepla je místo vyobrazené na obrázku 5.1 jako červená ploška a ostatní plochy břitové destičky jsou izolované [11].

S těmito předpoklady sestavil rovnici pro přenos tepla

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.1)$$

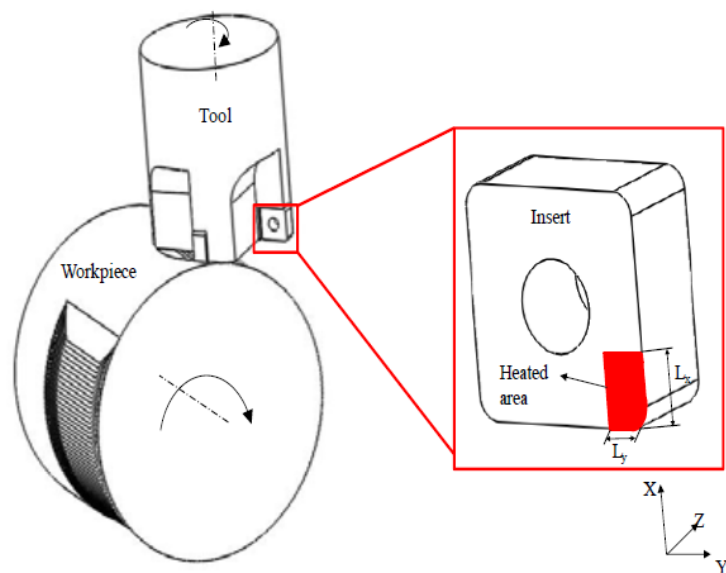
kde  $k$  je tepelná vodivost,  $\rho$  je hustota a  $c_p$  je měrná tepelná kapacita materiálu břitové destičky. Pro tuto diferenciální rovnici byly určeny okrajové podmínky:

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q(x, y, t) \quad z = 0; \quad 0 \leq x \leq L_x; \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad (5.2)$$

kde  $L_x$  a  $L_y$  jsou rozměry červené plošky na břitové destičce na Obrázku 5.1.

Z článku [11] vyplývají dva důležité fakty: teplota poroste se zvyšujícími se otáčkami frézky  $n_t$  a teplota poroste se zvyšujícím se posuvem frézy na otáčku  $a_e$ .

Vzhledem k podobnosti s běžným frézováním lze říct, že pro výpočty teplot na břitech lze použít stávající modely pro frézování.



Obrázek 5.1: Schéma pro analýzu přenosu tepla [11].

# Kapitola 6

## Rychlost odběru materiálu

Doba výroby a cena vyrobených dílů závisí na produktivitě technologie a kvalitě povrchu. Rychlost odběru materiálu (MRR z anglického material removal rate) ukazuje, jaký objem materiálu je odebírán za jednotku času. Přestože lze pomocí FS dosáhnout vysokých MRR, je nutné počítat s některými omezeními, která jsou s tím spojená.

Největším problémem u FS spojeným se zvyšováním MMR je nárůst geometrických nepřesností, jako je například obvodová drsnost nebo vznik takzvaných „hrbolů“ (anglicky cusp). Obvodovou drsnost lze snížit zvýšením poměru otáček  $r_n$  ( $n_t/n_w$ ) a hrbolů se lze zbavit volbou přiměřeného posuvu na otáčku obrobku  $a_e$  a nižší než kritické excentricity  $e$  [10]. Vady výsledného tvaru budou podrobněji popsány v Kapitole 7.

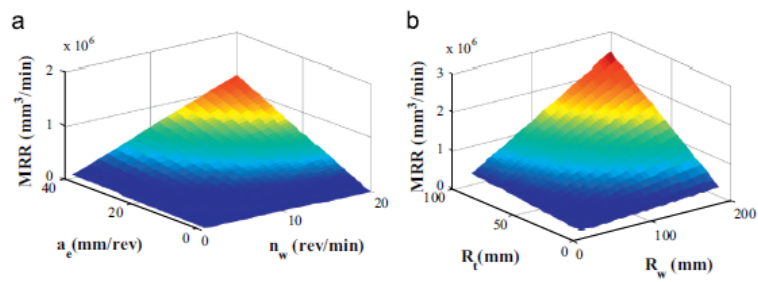
MRR se dá popsat následující dvojicí rovnic:

$$MRR = v_f a_p a_e, \quad (6.1)$$

$$v_f = m n_t f_z, \quad (6.2)$$

kde  $a_e$  je posuv na otáčku obrobku,  $a_p$  je hloubka řezu,  $v_f$  je rychlost posuvu,  $m$  je počet břitů,  $n_t$  jsou otáčky frézy a  $f_z$  je posuv na zub.

Na Obrázku 6.1 jsou vidět plošné grafy, které ukazují závislost MRR na  $a_e$ ,  $n_w$ ,  $R_t$  a  $R_w$ . Pro tento konkrétní případ byla hloubka řezu  $a_p = 5$  mm, excentricita  $e = 21$  mm a na nástroji byly dvě břitové destičky. Z levého grafu nalevo vyplývá fakt, že MRR narůstá se zvyšujícím se  $a_e$  a  $n_w$ . Výjimečně jsou použity pouze otáčky obrobku a ne poměr otáček  $r_n$  (ten totiž ovlivňuje výsledný povrch, ne MRR). Z pravého grafu pak lze vyčíst, že čím větší průměr bude mít jak obrobek, tak fréza, tím vyšší bude rychlost odběru materiálu.



Obrázek 6.1: Grafy závislosti MRR na  $a_e$ ,  $n_w$ ,  $R_t$  a  $R_w$  [7].

# Kapitola 7

## Chyby výsledného tvaru

### 7.1 Kruhovitost

Výsledkem FS není přesný válcový povrch z důvodu současné rotace obrobku a nástroje. Přesněji se dá popsat jako mnohoúhelník, jehož schéma je na Obrázku 7.1.

Na něm je vidět rozdíl mezi požadovaným tvarem a tím skutečným. Tento rozdíl se označuje  $OB - OA$  a u ortogonálního a tangenciálního FS se dá popsat rovnicemi:

$$OA = R_w - a_p, \quad (7.1)$$

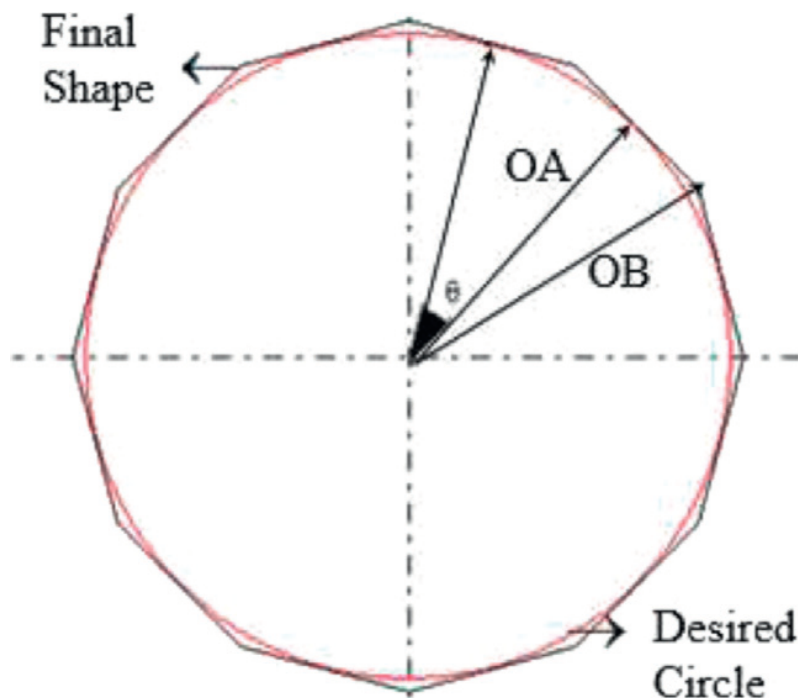
$$OB = \frac{R_w - a_p}{\cos \theta}, \quad (7.2)$$

$$OB - OA = (R_w - a_p) \left( \frac{1}{\cos(\theta/2)} - 1 \right). \quad (7.3)$$

Z rovnic 7.1, 7.2 a 7.3 lze vyvodit, že kruhovitost závisí na několika parametrech, přičemž rozdíl ve výsledku tvoří hloubka řezu  $a_p$  a poměr mezi otáčkami obrobku a otáčkami frézy  $r_n$ . Z grafu na Obrázku 7.2 je vidět, že zdaleka největší vliv na kruhovitost má poměr  $r_n$  a hloubka řezu  $a_p$  je oproti vlivu  $r_n$  zanedbatelná. Z těchto poznatků se dá odvodit, že pro dosažení co nejvýhodnějších hodnot drsnosti, je vhodné volit co největší poměr  $r_n$  (tedy co největší otáčky frézy a co nejmenší otáčky obrobku).

### 7.2 Hrboly (cusp)

Hrboly jsou další vada tvaru, která se vyskytuje při použití FS. Cusp height je výška neobrobeného materiálu na obrobku, která je výsledkem volby průměru nástroje a posuvu na otáčku obrobku (anglicky stepover). Stepover je definován jako ta část



Obrázek 7.1: Kruhovitost [7].

frézovacího nástroje, která se právě účastní řezu. V konvenčním frézování právě stepover a poloměr frézovacího nástroje způsobují hrboly na obrobku. V procesu FS je ekvivalentem stepoveru veličina  $a_e$ . To znamená, že pokud je potřeba zvyšovat MRR pomocí zvýšení posuvu na otáčku obrobku  $a_e$ , je nutné počítat se vznikem hrbolů.

Na obrázku 7.3 je schematicky zobrazena vada zvaná hrboly. S jeho pomocí se lze dobrat následujících rovnic:

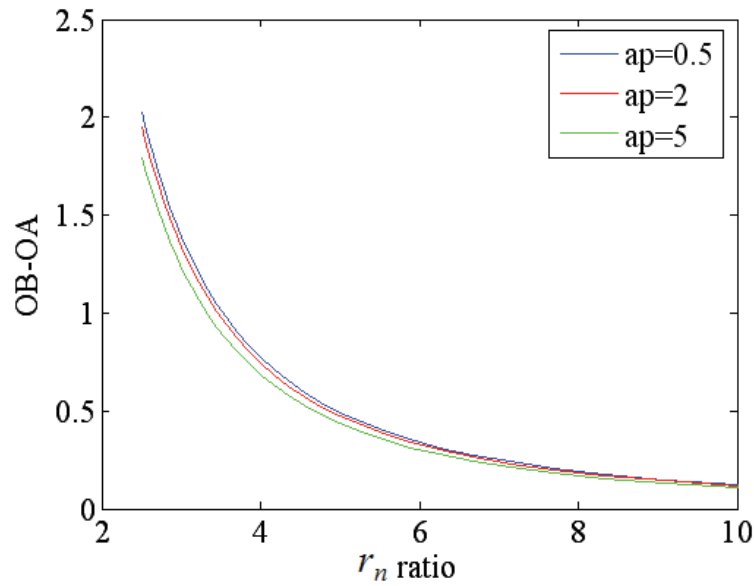
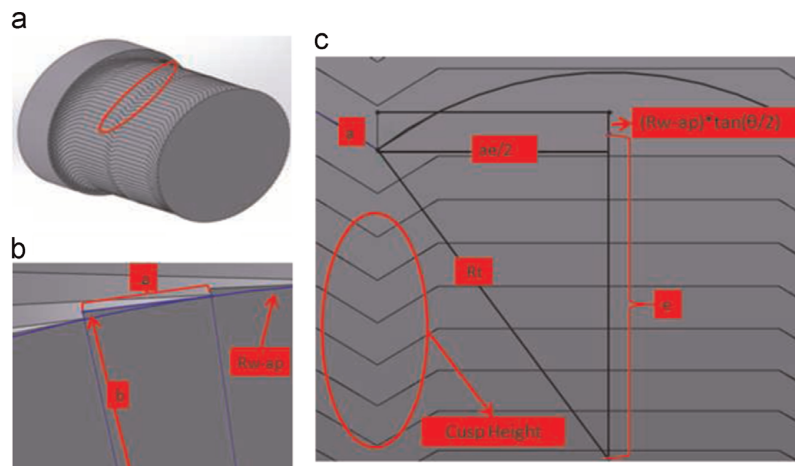
$$a = e + \left[ (R_w - a_p) \tan \left( \frac{180^\circ}{mr_n} \right) \right] - \sqrt{R_t^2 - \left( \frac{a_e}{2} \right)^2}. \quad (7.4)$$

$$b = \sqrt{(R_w - a_p)^2 + a^2}. \quad (7.5)$$

Z těchto dvou rovnic se dá vyjádřit rovnice výšky hrbolů:

$$ch = \sqrt{(R_w - a_p)^2 + \left\{ e + \left[ (R_w - a_p) \tan \left( \frac{180^\circ}{mr_n} \right) \right] - \sqrt{R_t^2 - \left( \frac{a_e}{2} \right)^2} \right\}^2} - (R_w - a_p), \quad (7.6)$$

kde  $R_w$  je poloměr obrobku,  $e$  je excentricita,  $m$  je počet břitů na nástroji a  $R_t$  je poloměr nástroje. Na grafech na Obrázku 7.4 jsou ukázány závislosti výšky hrbolů na různých parametrech.


 Obrázek 7.2: Kruhovitost v závislosti na  $a_p$  a  $r_n$  [7].


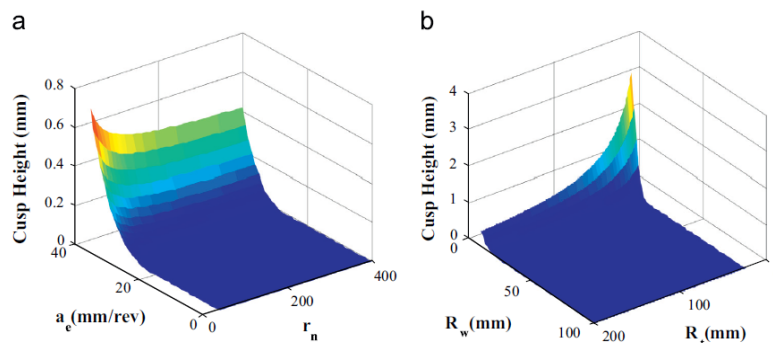
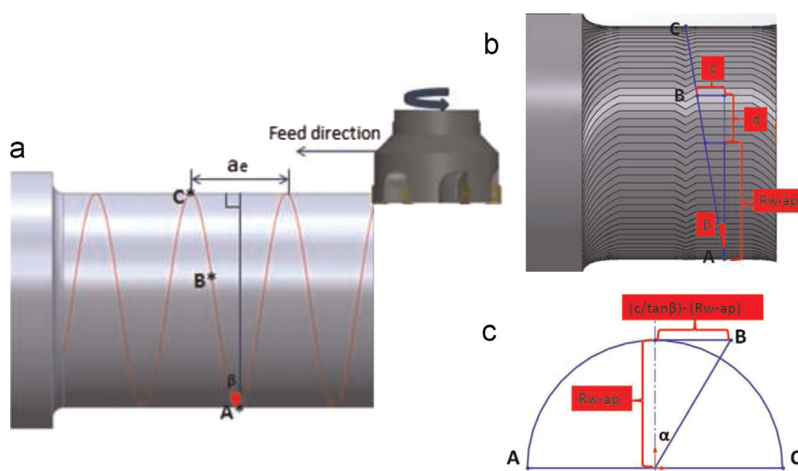
Obrázek 7.3: a) Izometrický pohled b) boční pohled c) horní pohled na součástku obráběnou frézovacím soustružením [7].

### 7.3 Obvodová drsnost

Obráběcí nástroj prochází kvůli současnému pohybu nástroje a obrobku po spirálovité dráze a zanechává tak za sebou materiál [10]. Úhel mezi normálou a touto dráhou značíme  $\beta$  a dá se vypočítat pomocí rovnice

$$\beta = \arctan \left( \frac{a_e}{4(R_w - a_p)} \right). \quad (7.7)$$

Úhel  $\beta$  má výrazný vliv na obvodovou drsnost. Při měření obvodové drsnosti se hrot měřidla pohybuje po kružnici, která je v rovnoběžné rovině s čelem obrobku. Z toho důvodu tak zaznamenává nejen mnohoúhelníkový charakter povrchu, ale také již zmíněné hrboly. Jak je naznačené na Obrázku 7.5, úsečka  $c$  zastává polovinu šířky


 Obrázek 7.4: Graf závislosti výšky hrbolů na  $a_e$ ,  $r_n$ ,  $R_w$  a  $R_t$  [7].

 Obrázek 7.5: a) Obrobek a fréza ve 3D b) šířka záběru c) schéma úhlu  $\alpha$  [7].

záběru

$$c = \sqrt{R_t^2 - \left\{ e + \left[ (R_w - a_p) \tan \left( \frac{180^\circ}{mr_n} \right) \right] \right\}^2}. \quad (7.8)$$

Dále je nutné si vyjádřit úhel  $\alpha$ :

$$\alpha = \arctan \left( \frac{\frac{\sqrt{R_t^2 - \left\{ e + \left[ (R_w - a_p) \tan \left( \frac{180^\circ}{mr_n} \right) \right] \right\}^2}}{\tan \beta} - (R_w - a_p)}{R_w - a_p} \right). \quad (7.9)$$

Při pohledu na Obrázek 7.5 je vidět, že se na jedné přímce nachází body A, B a C. Dokud se bude hrot drsnoměru pohybovat mezi body A a B, bude možné zaznamenat pouze mnohoúhelníkový charakter obrobku. Od bodu B bude možné zaznamenat efekt hrbolů, které jsou zapříčiněny nevhodnou volbou řezných podmínek. Výška hrbolů se bude plynule zvyšovat, dokud nedosáhne v bodě C svého maxima. Teoretická hodnota výsledné obvodové drsnosti i s případnými hrboly se spočítá jako

$$R_{aobv} = \left( \frac{90^\circ + \alpha}{180^\circ} \right) \left[ \frac{(R_w - a_p)}{\cos(\theta/2)} - (R_w - a_p) \right] + \left( \frac{90^\circ - \alpha}{180^\circ} \right) \frac{ch}{2}. \quad (7.10)$$



# Kapitola 8

## Volba řezných podmínek

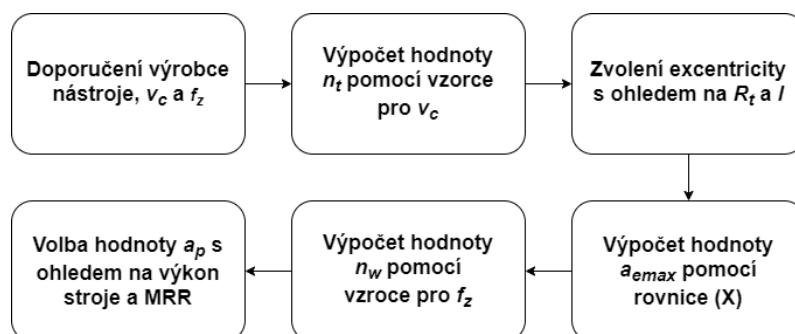
### 8.1 Řezné podmínky pro maximální MRR

V této kapitole je vyložena postup při volbě řezných podmínek u FS. Vzhledem k současnému pohybu frézy a obrobku se zde musí vyhodnotit i parametry, které se nevyskytují u běžných způsobů obrábění. Volba poměru poloměrů obrobku a frézy ( $R_w/R_r$ ) a excentricita  $e$  jsou stěžejní informace pro určení, kdy ještě bude nástroj v záběru. Poměr otáček obrobku a frézy ( $n_t/n_w$ ) je určující faktor pro výsledný povrch a životnost břitových destiček.

Aby bylo možno provést FS, je třeba zvolit hodnoty těchto pěti parametrů: otáčky obrobku  $n_w$ , otáčky nástroje  $n_t$ , axiální posuv  $f$ , hloubka řezu  $a_p$  a excentricita  $e$ . Schéma na Obrázku 8.1 popisuje možný postup při jejich volbě.

Nejdříve je nutno nalézt řeznou rychlost  $v_c$  a posuv na zub  $f_z$  v katalogu výrobce břitových destiček nebo se volí podle zkušeností uživatele. Řezná rychlost se spočítá jako

$$v_c = 2\pi R_t n_t + 2\pi R_w n_w \cos(\theta_r) \sin(\theta_x) \sin(\phi_i), \quad (8.1)$$



Obrázek 8.1: Proces výběru řezných podmínek. Za rovnicí (X) si lze dosadit jednu z rovnic 8.4, 8.5 nebo 8.6 podle příslušných podmínek [10].

kde

$$\theta_x = \arctan\left(\frac{a_e}{2\pi R_w}\right) \quad (8.2)$$

a

$$\theta_r = \tan\left(\frac{R_t \sin(\theta_x + \phi_i)}{R_w - a_p}\right). \quad (8.3)$$

V rovnici pro řeznou rychlost 8.1 však není nutné uvažovat složku rychlosti od otáčení obrobku, protože je vzhledem k rychlosti od otáček nástroje zanedbatelná. Dále jsou zjištěny otáčky obrobku  $n_w$  v závislosti na zvoleném posuvu na zub  $f_z$  a otáčkách frézy  $n_t$ . Musí se však zhodnotit posuv za otáčku obrobku  $a_e$  s ohledem na tvorbu hrbolů. Budou preferována taková  $a_e$ , aby nevznikaly hrboly a aby nebyla využívána celá délka vedlejšího ostří - to totiž způsobuje velké axiální síly na frézu. Ideální posuv na otáčku obrobku  $a_e$  závisí také na geometrii nástroje - jeho poloměru a délce vedlejšího ostří. Pro libovolnou geometrii nástroje a břitů jsou tři možnosti výpočtu  $a_e$  v závislosti na excentricitě. Je zavedeno  $a_{emax}$ . Když je tato hodnota překročena, zůstane na obrobku velké množství neodebraného materiálu v podobě hrbolů [10]. Tyto tři případy se dají popsat následujícími rovnicemi:

$$a_{emax} = l, \text{ pokud } e = 0, \quad (8.4)$$

$$a_{emax} = \sqrt{R_t^2 - (e - m)^2} - \sqrt{(R_t - l)^2 - (e - m)^2}, \text{ pokud } 0 < e < R_t - l + m, \quad (8.5)$$

$$a_{emax} = 2\sqrt{R_t^2 - (e - m)^2}, \text{ pokud } R_t - l + m < e < R_t, \quad (8.6)$$

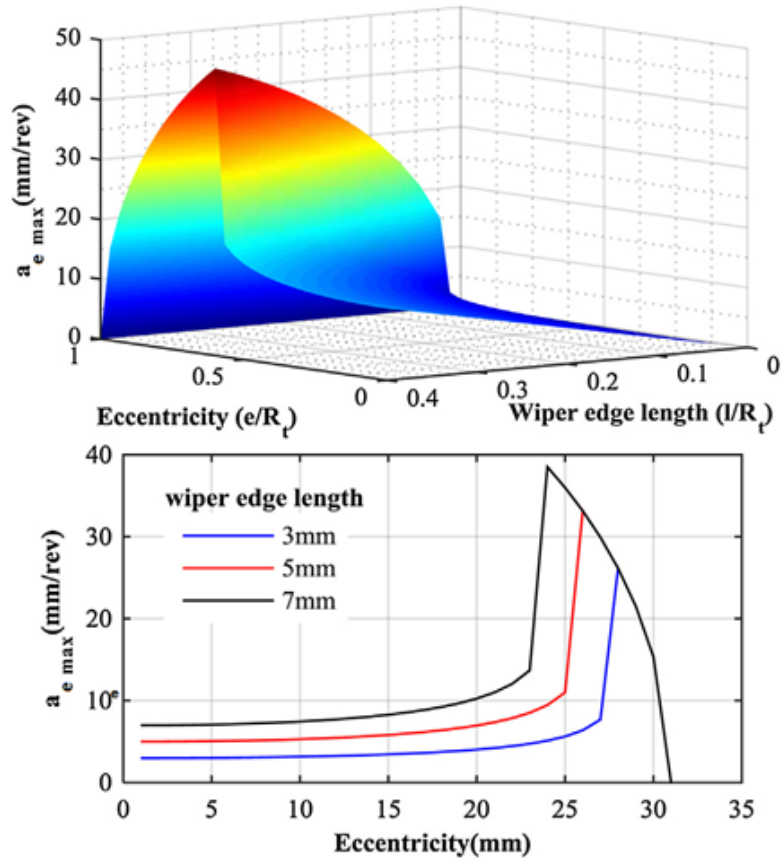
kde  $l$  je délka vedlejšího ostří a  $m$  se popíše rovnicí

$$m = (R_w - a_p) \frac{\theta}{2}. \quad (8.7)$$

Za zmínku stojí také fakt, že pokud se bude zvyšovat hodnot excentricity  $e$  nad úroveň poloměru nástroje, maximální hloubka neodříznuté třísky se začne snižovat. S tím přichází snížení MRR a vady tvaru v podobě hrbolů jsou nevyhnutelné. Proto se doporučuje volit excentricitu ne větší než poloměr frézy. Berenji [10] provedl pokus, z něhož odvodil, že pro zadané dané  $l$  lze nalézt optimální excentricitu  $e$ , která umožní zvolit  $a_{emax}$  tak, aby ještě nevznikaly hrboly. Zmíněný pokus (shrnutý na Obrázku 8.2) byl proveden s nástrojem o poloměru 31,5 mm a byly zvoleny 3 různé délky vedlejšího břitu.

Jakmile je zvoleno  $a_e$ , následuje výpočet otáček obrobku  $n_w$  dosazením do rovnice

$$n_w = \frac{f_z n_t m \cos(\theta_x)}{2\pi(R_w - a_p)}. \quad (8.8)$$



Obrázek 8.2: Vliv excentricity a délky vedlejšího ostří na volbu maximálního axiálního posuvu [10].

Zbývajícím parametrem je hloubka řezu  $a_p$ . Čím větší je hloubka řezu, tím větší je MRR. Je však nutné brát v potaz maximální výkon vřetene a možné vibrace vřetene.

Pro shrnutí, pro zvýšení MRR je nutné zvolit co největší  $a_e$  a  $a_p$ , ale  $a_{e \max}$  však závisí na tvaru břitové destičky (konkrétně na délce vedlejšího ostří  $l$ ),  $R_t$  a požadované kvalitě výsledného povrchu. Dále je faktem, že nejlepším úhlem nastavení pro sekundární břit je  $0^\circ$ .

## 8.2 Řezné podmínky s ohledem na cenu a čas

Většina problémů v reálném světě má ze své podstaty více než jeden cíl. Tak je tomu i u volby řezných podmínek FS. Takový problém, kterého dosáhneme lepšího výsledku v jednom parametru pouze na úkor jiných parametrů, se nazývá Pareto-optimální. K nalezení nejlepšího řešení tohoto typu problému je nutné využít výpočetní techniky [12].

Kara i Berenji využili genetického algoritmu pro nalezení optimálních řezných podmínek. Je důležité říct, že není možné najít výsledek, který by byl dokonalý ve

všech ohledech. Vždy budeme muset nějaké hledisko obětovat [12]. Nejčastěji se bude výrobce rozhodovat, jestli chce úkol splnit za co nejkratší čas nebo s co nejnižšími náklady.

# Kapitola 9

## Použití frézovacího soustružení na přístrojích ČVUT

### 9.1 Přístroj a systém

Jak bylo již zmíněno v Kapitole 3, v laboratořích ČVUT se nachází právě jeden přístroj, na kterém se dá použít frézovací soustružení. Je to OKUMA GENOS L200E-MY. Jedná se o nejmenší CNC soustruh z řady OKUMA GENOS. Je vybaven mimo jiné sklíčidlem schopným pojmout obrobek o průměru 200 mm, koníkem, revolverovou hlavou o dvanácti pozicích, do kterých je možné připojit obráběcí nože a frézovací vřeteno jak v axiální tak v radiální konfiguraci. Revolverová hlava má rozsah v pohybu 100 mm (od +100 mm do -65 mm), 245 mm v ose Z a 80 mm (od +30 do -50 mm) v ose Y [13].

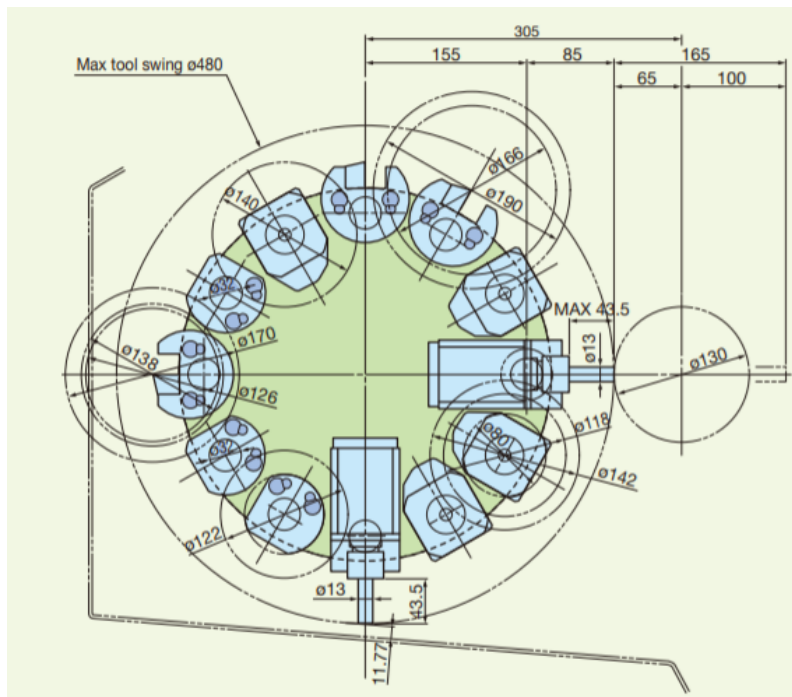
Jeho programovací systém OKUMA OSP-P300LA-e umožňuje v rámci dílenského programování ovládat současně osy C a Z, C a X a osy C, X a Z. Díky tomu lze kromě běžných operací obrábět třeba drážky a kapsy na válcových a kuželových plochách. Bohužel však nenabízí FS jako způsob hrubování válcových součástí [13]. Pokud tedy někdo chce použít FS, musí použít G-kód z Algoritmu 9.1.

Algoritmus 9.1: Výpočet regulačního zásahu.

---

1	M06 T1;	%zvol nástroj na revolverove hlavě na pozici 1
2	G0 G90 X40 Y3 Z7 M13 S3183;	%rychly prejezd na XYZ, roztoc frezu na otacky S
3	M03 S3,29;	%roztoc hlavní vřeteno na otacky S
4	G1 Z-94 F35,53;	%pousv rychlosti F mm/min na pozici Z
5	M13 C500 F1309;	%otoc jednou hlavním vřetenem o 360 stupnu
6	G0 X55;	%vyjed rychlopohybem z rezu na pozici X
7	M05;	%zastav hlavní vřeteno
8	M12;	%zastav frezu
9	G20;	%vrat nástroj na vychozí pozici
10	M00;	%ukonci program

---



Obrázek 9.1: Schéma revolverové hlavy stroje OKUMA GENOS L200E-MY [14].

## 9.2 Srovnání FS a běžného soustružení

V této podkapitole jsou porovnány strojní časy hrubování běžným soustružením a FS. Pro soustružení bude omezujícím faktorem výkon hlavního vřetene, který je 7,5 kW [14]. FS bude omezeno maximálním průměrem frézy, která jde vložit do vřetene. Na Obrázku 9.1 je naznačena tato velikost 13 mm. Běžně jsou však vyráběny frézy o průměru 12 a 16 mm. Pro porovnání v této práci byl použit průměr 12 mm. Pro oba dva způsoby obrábění bude použit polotvar o průměru 130 mm, neboť je to největší možný průměr, který je možné obrábět na dostupném soustruhu. Snížíme jeho průměr na 110 mm na délce 100 mm. Zvolený materiál je nerezová ocel 17 042.2, která má mez pevnosti  $R_m = 880$  MPa [15].

Pro soustružení platí vztah

$$P = F \cdot v_c \quad (9.1)$$

Ten se dá rozepsat jako

$$P = \frac{a_p \cdot f \cdot p \cdot v_c}{60}, \quad (9.2)$$

kde  $P$  je výkon,  $a_p$  je hloubka řezu,  $f$  je posuv na otáčku,  $p$  je měrná řezná síla a  $v_c$  je řezná rychlost. Ze vztahu 9.2 je vyjádřeno  $f$ , za  $P$  je dosazeno již zmíněných 7,5 kW,  $a_p$  je zvoleno 2 mm,  $p$  je přibližně čtyřnásobek  $R_m$  a  $v_c$  je zvoleno 120 m/min. Vyjde tedy

$$f = \frac{60 \cdot 7500}{24 \cdot 880 \cdot 120} = 0,53 \text{ mm/ot.} \quad (9.3)$$

Dále je nutno spočítat otáčky vřetene

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{120 \cdot 1000}{\pi \cdot 130} = 294 \text{ ot/min.} \quad (9.4)$$

Nyní se už dá vypočítat strojní čas jako

$$t = \frac{L \cdot i}{n \cdot f} = \frac{100 \cdot 5}{294 \cdot 0,53} = 3,2 \text{ min,} \quad (9.5)$$

kde  $L$  je obráběná délka a  $i$  je počet přejezdů.

Pro výpočet času hrubování pro FS je nutné využít rovnice z Kapitoly 8 a pro orientaci poslouží schéma na Obrázku 8.1. Nejdříve si pro zvolený nástroj (stopková karbidová fréza s povlakem TiN, průměr 12 mm) najdu vhodné řezné podmínky. Řezná rychlost je  $v_c = 120$  m/min a posuv na zub je  $f_z = 0,071$  mm [16].

Poté je na řadě výpočet otáček frézy:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} = \frac{120 \cdot 1000}{\pi \cdot 12} = 3183 \text{ ot/min.} \quad (9.6)$$

Dále musí být zvolena excentricita. V tomto případě je použita stopková fréza, takže délka břitu  $l$  se rovná poloměru frézy  $R_t$ . Pokud by však byla zvolena nulová excentricita, byla by střední část frézy prakticky „vtlačována“ do obrobku nebo by obráběla velmi nízkou řeznou rychlostí. Proto je dobré pomyslně snížit délku břitu  $l$  (v tomto případě na 3 mm) a s úseky břitů do určitého průměru nepočítat. Je zvolena excentricita  $e = 3$  mm, což odpovídá podmínce v rovnici 8.5. Po dosažení vychází

$a_{emax} = 4,76$  mm. Finální  $a_e$  se musí zvolit menší než to maximální, takže  $a_e = 4,7$  mm.

Nyní se zkombinují rovnice 8.2 a 8.8, vyjádří se z nich  $n_w$  a dosadí se

$$n_w = \frac{f_z \cdot n_t \cdot m \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{a_e}{2 \cdot \pi \cdot R_w}\right)\right)}{2\pi(R_w - a_p)}$$

$$= \frac{0,071 \cdot 3183 \cdot 4 \cos\left(\arctan\left(\frac{4,7}{2 \cdot \pi \cdot 65}\right)\right)}{2 \cdot \pi \cdot (65 - 10)} = 2,615 \text{ ot/min.} \quad (9.7)$$

Jedna otáčka hlavního vřetene trvá

$$\frac{1}{n_w} = \frac{1}{2,615} = 0,382 \text{ min.} \quad (9.8)$$

Pro výpočet strojního času je zapotřebí znát a ještě axiální posuv  $f$ , který lze vypočítat pomocí trojčlenky jako

$$\frac{4,7}{0,382} = \frac{f}{1} \Rightarrow f = 12,30 \text{ mm/min} \quad (9.9)$$

Čas operace se u FS spočítá jako

$$t = \frac{L}{f} + 1 \text{ otáčka} = \frac{100}{12,30} + 0,382 = 8,51 \text{ min.} \quad (9.10)$$

Při takto zvolených řezných podmínkách a se zanedbáním času přejezdů u soustružení, strojní čas u FS je přibližně 2,5 krát delší než u běžného soustružení.



# Kapitola 10

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zmapovat frézovací soustružení, shrnout teorii a výpočty, zjistit, jak je tato technologie podporována v CAMEch a v dílenském programování a jak lze aplikovat v podmínkách Fakulty strojní ČVUT.

Byla provedena důkladná rešerše, na jejíž základě byly popsány 3 druhy FS, problematika excentricity, sil působících na frézu, vzniku tepla při obrábění a vzniku tvarových chyb při nevhodné volbě řezných podmínek a postupem při výběru řezných podmínek za účelem minimalizace chyb.

FS je v podmínkách Fakulty strojní možné použít pouze na stroji OKUMA GENOS L200E-MY, který je sice fyzicky schopen pohybů nutných k provedení FS, softwarová podpora této technologie jako hrubovacího procesu v dílenském programování však není dostatečná. Toto úskálí bylo v práci překonáno využitím G-kódu.

Při porovnávání FS a klasického soustružení vyšlo najevo, že v podmínkách ČVUT nemá zkoumaná technologie takové možnosti jako klasické soustružení. To bylo zjištěno už při početní přípravě experimentu.

Závěrem lze říci, že tato technologie není vhodná pro kusovou výrobu. Je daleko jednodušší součást vysoustružit, protože soustružení je podporováno v naprosto každém CAM softwaru, nemluvě o tom, že se jím dají obrábět polotovary většího průměru. Na akademické půdě, takže i na Fakultě strojní ČVUT, tím pádem nenajde velké využití.

Klasické soustružení tak má před sebou ještě dlouhá desetiletí na pozici hlavního obráběcího procesu při hrubování rotačně symetrických součástí.



# Literatura

- [1] CHOUDHURY, S.K a K.S MANGRULKAR. Investigation of orthogonal turn-milling for the machining of rotationally symmetrical work pieces. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000, 99(1-3), 120-128. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00397-0. ISSN 09240136. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013699003970>
- [2] SCHULZ, H. a G. SPUR. High Speed Turn-Milling — A New Precision Manufacturing Technology for the Machining of Rotationally Symmetrical Workpieces. *CIRP Annals*. 1990, 39(1), 107-109. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61013-0. ISSN 00078506. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607610130>
- [3] NEAGU, C., M. GHEORGHE a A. DUMITRESCU. Fundamentals on face milling processing of straight shafts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, 166(3), 337-344. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.08.006. ISSN 09240136. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013604008714>
- [4] SAVAS, Vedat a Cetin OZAY. Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007, 186(1-3), 279-283. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.09.040. ISSN 09240136. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401360601185X>
- [5] KOPAČ, J. a M. POGAČNIK. Theory and practice of achieving quality surface in turn milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1997, 37(5), 709-715. DOI: 10.1016/S0890-6955(95)00026-7. ISSN 08906955. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695595000267>
- [6] KARAGUZEL, Umut, Mustafa BAKKAL a Erhan BUDAK. Process Modeling of Turn-Milling Using Analytical Approach. *Procedia CIRP*. 2012, 4(1),

- 131-139. DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.024. ISSN 22128271. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827112003150>
- [7] KARAGÜZEL, Umut, Emre UYSAL, Erhan BUDAK a Mustafa BAKKAL. Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015, 91(1), 24-33. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.11.014. ISSN 08906955. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695514001618>
- [8] Fréza válcová čelní krátká, polohrubozubá 420940.500 50x70 HSS (ČSN 222142) - BO-IMPORT s.r.o. BI-IMPORT [online]. Šternberk: BI-IMPORT, 2015 [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: <https://www.bo-import.cz/frezy-hss/frezy-valcove-a-valcove-celni-hss-kuzel-stopka/freza-valcova-celni-kratka-polohrubozuba-420940-500-50x70-hss-csn-222142-1674.html>
- [9] BENO, Matus et al. Circular interpolation and positioning accuracy deviation measurement on five axis machine tools with different structures/Mjerenje devijacija tocnosti kruzne interpolacije i pozicioniranja na petoosnim alatnim strojevima razlicitih konstrukcija. *Tehnički Vjesnik*. 2013, vol. 20, no. 3, s. 479. ISSN 1330-3651.
- [10] RAHIMZADEH BERENJI, Kaveh, Umut KARAGÜZEL, Emre ÖZLÜ a Erhan BUDAK. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish. *CIRP Annals*. 2019, 68(1), 113-116. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.067. ISSN 00078506. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850619300964>
- [11] KARAGUZEL, Umut, Mustafa BAKKAL a Erhan BUDAK. Mechanical and Thermal Modeling of Orthogonal Turn-milling Operation. *Procedia CIRP*. 2017, 58(1), 287-292. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.191. ISSN 22128271. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827117303736>
- [12] KARA, Mehmet Emre a Erhan BUDAK. Optimization of Turn-milling Processes. *Procedia CIRP*. 2015, 33(9), 476-483. DOI: 10.1016/j.procir.2015.06.057. ISSN 22128271. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827115007003>
- [13] GENOS L200E-MY-e. Tatung-okuma [online]. New Taipei City: TATUNG-OKUMA, 2018 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.tatung-okuma.com.tw/en/GENOSL200E-MY-e.html>

- [14] GENOS Series. GENOS Series [online]. New Taipei City: TATUNG-OKUMA, 2010 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.tatung-okuma.com.tw/doc/GENOS-en.pdf>
- [15] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.
- [16] Milling speeds and feeds chart. Carbide end mill store [online]. Fort Mill: The Carbide End Mill Store, 2020 [cit. 2020-07-30]. Dostupné z: <https://www.the-carbide-end-mill-store.com/Feeds-and-Speeds.html>