

# Vliv volby nástroje na parametry řezného procesu

Lukáš Matula

---

Bakalářská práce  
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš MATULA**  
Osobní číslo: **T09444**  
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv volby nástroje na parametry řezného procesu**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická studie na téma
2. Příprava experimentu pro hodnocení řezivosti frézovacích nástrojů
3. Měření výstupních parametrů řezného procesu
4. Vyhodnocení a porovnání nástrojů

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. Brno. Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0

ŘASA, J., GABRIE, V. Strojírenská technologie 3, 1. díl, Metody, stroje a nástroje pro obrábění. Grafikon. Praha. 2000. ISBN 80-7183-207-3

ŠTUPLA, M. CNC Obrábění stroje a jejich programování. BEN, Praha, 2008. ISBN 987-80-7300-207-7

GRZESIK, W. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Elsevier, 2008. ISBN 987-0-08-044534-2

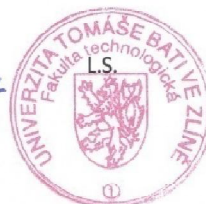
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Bílek, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25. května 2012**

Ve Zlíně dne 13. února 2012

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
děkan



  
prof. Ing. Berenika Hauspířová, Ph.D.  
ředitel ústavu

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 25.5.2012

*Matula*

.....

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užíje-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užití či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zaměřuje na proces frézování a testování různých frézovacích nástrojů. Zkoumá různé typy nástrojů za stejných řezných podmínek. Měřené veličiny jsou řezné síly, které působí na materiál, drsnosti obrobenej plochy v závislosti na čase obrábění a hmotnostní opotřebení nástroje. V práci se nachází základní pojmy a teorie procesu frézování, základní rozdělení nástrojů, materiály nástrojů, opotřebení nástroje a drsnost povrchu.

Klíčová slova:

Frézování, frézovací nástroje, materiály nástrojů, řezné podmínky, řezné síly, jakost povrchu, opotřebení

## **ABSTRAKT**

This work focuses on the process of milling and testing of various milling tools. It examines various types of tools under the same cutting conditions. Measured values are the cutting forces acting on the material, machined surface roughness depending on the machining time and tool wear weight. The work is basic concepts and theories of the milling process, the distribution of basic tools, materials tools, tool wear and surface roughness.

Keywords:

Milling, milling tools, materials tools, cutting conditions, cutting forces, surface finish, wear

## **Poděkování**

Chtěl bych v první řadě poděkovat Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D., který byl vedoucím mé bakalářské práce, za vedení, neocenitelné rady v oblasti strojírenské technologie, ochotu a vynaložený čas a JUDr. Václavu Čmolíkovi, který jako vedoucí správního úseku ve firmě ZPS – FN mně umožnil poskytnout prostředky k samotné praktické části mé práce. Za pomoc při samotném frézování také Ing. Jiřímu Šálkovi.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do is/stag jsou totožné.

Ve Zlíně 25. 5. 2012

.....

Podpis diplomata

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>5</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>7</b>
<b>1 TECHNOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY OBRÁBĚCÍHO PROCESU .....</b>	<b>8</b>
1.1 OBROBEK.....	8
1.2 NÁSTROJ.....	9
1.3 NÁSTROJOVÉ ROVINY A ÚHLY.....	11
1.4 KINEMATIKA ŘEZNÉHO PROCESU .....	13
<b>2 FRÉZOVÁNÍ.....</b>	<b>15</b>
2.1 GEOMETRIE BŘITU FRÉZY .....	16
2.2 KINEMATIKA OBRÁBĚCÍHO PROCESU.....	17
2.3 ŘEZNÉ SÍLY PŘI FRÉZOVÁNÍ .....	19
2.4 MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL.....	20
2.4.1 Indukčností snímače sil.....	20
2.4.2 Kapacitní snímače sil.....	21
2.4.3 Tenzometrické odporové snímače sil .....	21
2.4.4 Magnetické snímače sil.....	22
<b>3 FRÉZOVACÍ NÁSTROJE .....</b>	<b>23</b>
3.1 ROZDĚLENÍ PODLE ZPŮSOBU VÝROBY .....	23
3.2 ROZDĚLENÍ PODLE POČTU DÍLŮ .....	23
3.3 ROZDĚLENÍ PODLE ZPŮSOBU UPNUTÍ .....	24
3.4 ROZDĚLENÍ PODLE SMYSLU OTÁČENÍ .....	26
3.5 ROZDĚLENÍ PODLE GEOMETRICKÉHO TVARU FUNKČNÍ ČÁSTI.....	26
3.5.1 Válcové frézy .....	26
3.5.2 Čelní válcové frézy .....	27
3.5.3 Kotoučové frézy .....	27
3.5.4 Úhlové frézy.....	28
3.5.5 Tvarové frézy .....	28
3.6 DALŠÍ ROZDĚLENÍ FRÉZOVACÍCH NÁSTROJŮ .....	29
<b>4 MATERIÁLY FRÉZ .....</b>	<b>30</b>
4.1 NÁSTROJOVÁ OCEL.....	30
4.2 RYCHLOŘEZNÁ OCEL.....	31
4.3 SLINUTÉ KARBIDY .....	31
4.4 CERMETY.....	32
4.5 ŘEZNÁ KERAMIKA.....	33
4.6 KUBICKÝ NITRID BORU .....	33
4.7 POLYKRISTALICKÝ DIAMANT.....	33
4.8 POVRCHOVÉ POVLAKY NÁSTROJŮ .....	33
<b>5 HODNOCENÍ STRUKTURY POVRCHU .....</b>	<b>35</b>
5.1 DRSNOST POVRCHU .....	35
5.1.1 Střední aritmetická úchylka profilu Ra.....	35
5.1.2 Největší výška profilu Rz.....	35



<b>6</b>	<b>HOSPODÁRNOST OBRÁBĚNÍ.....</b>	<b>36</b>
6.1	OPOTŘEBENÍ BŘITU NÁSTROJE .....	36
6.2	VNĚJŠÍ FORMY OPOTŘEBENÍ.....	36
6.3	PŘÍMÉ MĚŘENÍ HMOTNOSTNÍ METODOU.....	37
6.4	TRVANLIVOST NÁSTROJE.....	37
<b>7</b>	<b>CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE .....</b>	<b>39</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>PARTNEŘI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE .....</b>	<b>41</b>
8.1	ZPS – FRÉZOVACÍ NÁSTROJE A.S.....	41
<b>9</b>	<b>TECHNICKÉ PARAMETRY POUŽITÝCH NÁSTROJŮ, STROJŮ A OBROBKŮ.....</b>	<b>42</b>
9.1	EXPERIMENTÁLNÍ FRÉZY .....	42
9.2	UNIVERZÁLNÍ FRÉZKA FHV – 50 PD.....	46
9.3	DRSNOMĚR MITUTOYO SJ – 301 .....	47
9.4	DYNAMOMETR S TENZOMETRICKÝMI ČLENY .....	48
9.5	MĚŘÍCÍ VÁHA.....	49
9.6	OBRÁBĚNÝ MATERIÁL.....	50
<b>10</b>	<b>PODMÍNKY EXPERIMENTU A METODIKA MĚŘENÍ.....</b>	<b>51</b>
10.1	ŘEZNÉ PODMÍNKY .....	51
10.2	MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL .....	52
10.3	MĚŘENÍ DRSNOSTI PO FRÉZOVÁNÍ .....	53
10.4	MĚŘENÍ HMOTNOSTNÍHO OPOTŘEBENÍ NÁSTROJE .....	53
<b>11</b>	<b>NAMĚŘENÉ HODNOTY .....</b>	<b>54</b>
11.1	SLOŽKY ŘEZNÝCH SIL JEDNOTLIVÝCH FRÉZ.....	54
11.2	ZMĚNA KVALITY OBROBENÉ PLOCHY V ZÁVISLOSTI NA ČASE OBRÁBĚNÍ.....	56
11.3	ANALÝZA HMOTNOSTNÍHO OPOTŘEBENÍ FRÉZ .....	60
<b>12</b>	<b>VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....</b>	<b>62</b>
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>72</b>

## ÚVOD

Obrábění hraje ve strojírenském průmyslu hlavní prioritní roli. Při obrábění můžeme vyrobit z polotovaru hotový výrobek, který má zadanou rozměrovou přesnost, tvar a jakost povrchu obráběných ploch. Obrábění používáme přibližně v jedné třetině všech operací při vlastní výrobě prováděných na obrobku. Hlavní cíle konstruktérů, designérů jsou, aby výsledná součást byla co nejvíce ekonomická, hospodárná a nedocházelo ke zbytečnému znečištění životního prostředí.

V minulosti byly převážně používány konvenční obráběcí stroje, proto při volbě některých parametrů obrábění, např. volba řezných podmínek, byly částečně v kompetenci dělníka, který obsluhoval obráběcí stroj a parametry stroje nastavoval podle svých zkušeností a poznatků z minulosti. V současnosti, kdy v každém průmyslu je nahrazena lidská práce počítači, se využívají číslíkové řízené obráběcí stroje, automatické výrobní stroje a výrobní linky, obráběcí centra nebo integrované výrobní úseky řízené počítači, předává se volba řezných podmínek na technologa, který má plnou zodpovědnost za výrobu, a většina výpočtů a nastavení je vytvořena daným softwarem. Ve strojírenství je frézování jednou z důležitých operací při výrobě rovinných, tvarových ploch výrobků, které se vyrábějí rotujícím nástrojem. Podle tvaru obráběné plochy nebo drážky se volí typ a rozměr nástroje pro frézování.

V této bakalářské práci se zabývám tématem s názvem Vliv volby nástroje na parametry řezného procesu. Cílem je seznámit čtenáře s problematikou frézování, výběru vhodného nástroje podle parametrů řezného procesu. Bakalářská práce je rozdělena na dvě části, teoretickou část a praktickou část. Jednotlivé kapitoly jsou uspořádány tak, aby byla co nejlépe pochopena tato problematika. Pro lepší porozumění a pochopení jsou zde umístěny obrázky, tabulky a grafy.

V teoretické části se zabývám teorií obrábění, frézováním, frézovacími nástroji, drsností obrobené plochy a hospodárností obrábění. V teorii obrábění jsou vysvětleny základní pojmy, jako jsou obrobek, nástroj, fyzikální podstata vzniku třísky, řezné roviny, úhly, řezné prostředí. V kapitole frézování vysvětluji základní druhy frézování, řezné síly, které při frézování vznikají, a principy měření těchto sil. V nástrojových materiálech jsou shrnuty materiály, které se uplatňují při výrobě těchto nástrojů. V části frézovací nástroje jmenuji a popisuji základní nástroje a jejich případné použití. V kapitole o drsnosti povrchu je zmíněno několik typů a způsobů měření jakosti povrchů obrobených otvorů.

V praktické části se zabývám vyhodnocením a diskusí nejen parametrů obrobené plochy, hmotnostního opotřebení nástroje, ale také získanými daty pomocí dynamometru při řezném procesu u fréz vyrobených firmou ZPS – Frézovací nástroje.

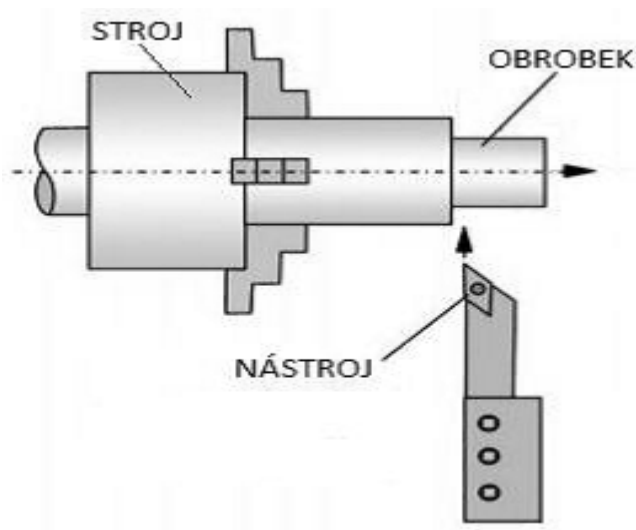
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 TECHNOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY OBRÁBĚCÍHO PROCESU

Obrábění je technologický proces, při kterém dochází k oddělování částic materiálu obro-  
bku břitem nástroje. Proces fyzikálně-mechanického oddělování materiálu lze nazvat jako  
řezání nebo také řezný proces. Podle způsobu, jakým oddělujeme materiál, se rozděluje na  
řezný proces kontinuální (soustružení, vrtání, vyvrtávání), diskontinuální (hoblování, obrá-  
žení) a cyklický (frézování, broušení). Reálný řezný proces probíhá za určitých řezných  
podmínek, které jsou součástí obráběcích podmínek. Polotovar je materiál, který se bude  
teprve obrábět a může být:

- normalizovaný (tyče, plechy, pásy, trubky, dráty, válcové profily)
- nenormalizovaný (odlitky, vylisky, svarky, výkovky)

Proces obrábění probíhá v soustavě stroj - nástroj – obrobek (Obr. 1).



Obr. 1 Soustava stroj - nástroj – obrobek [1]

## 1.1 Obrobek

Při obráběcím procesu lze charakterizovat z geometrického hlediska 3 základní plochy:

- *obráběná*

Plocha, na které se odehrává řezný proces. Z této plochy je odebrán nadbytečný materiál.

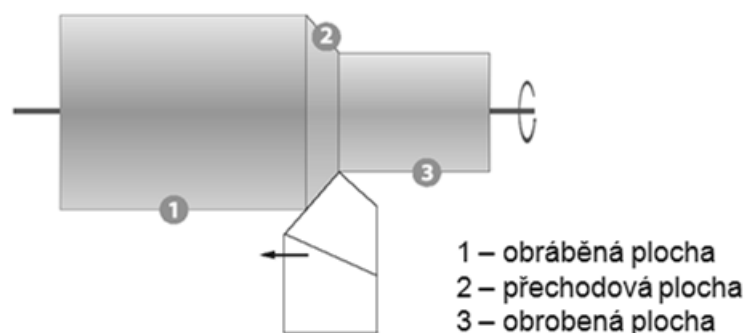
- *obrobená*

Plocha, která představuje prioritní výstup obráběcího procesu a je určena svými rozměry, tvarem, polohou, strukturou povrchu a vlastnostmi povrchové vrstvy.

- *přechodová*

Plocha vzniká působením ostří nástroje během zdvihu nebo otáčky nástroje, či obrobku během samotného řezného procesu.

Tyto 3 základní plochy jsou znázorněny při podélném soustružení níže (Obr. 2).



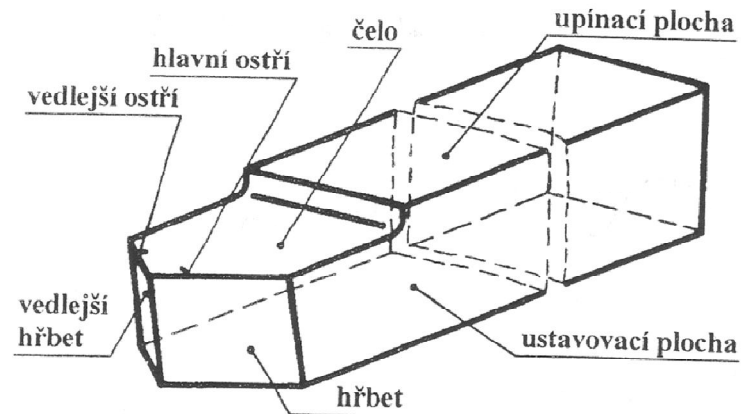
Obr. 2 Základní plochy na obrobku

Obecně lze říci, že dané parametry obrobených plochy jsou všeobecně chápány jako soubor technologických faktorů, které vznikají na základě parametrů stroje, nástroje, obrobku, upínačů a hlavně řezných podmínek. V neposlední řadě nesmíme opomenout, že technologické vlivy na parametry obrobené plochy v závislosti na jejich charakteru lze členit na systematicky konstantní (chyba v seřízení stroje, odchylka rozměru a tvaru nástroje), systematicky proměnné (opotřebení a únava nástroje vlivem tepelné deformace prvků obráběcího ústrojí), náhodné (nesprávná volba materiálu, nesprávný výpočet přídávku na obrábění). [2]

## 1.2 Nástroj

Nástroj je možné zjednodušeně popsat jako iniciátor řezného procesu. Při styku s obrobkem dochází k obrábění. Nástroj má tvar klínu, který usnadňuje vnikání do obráběného materiálu zapichovacím způsobem a následuje odebrání materiálu. Nástroj se skládá z řezné části a upínací. Do řezné části nástroje řadíme pracovní část, kterou nazýváme břit. Břit je ohraničen plochou hřbetu a plochou čela, po které odchází během obrábění tříška.

V místě, kde se protínají plochy čela a hřbetu, se bavíme o ostří. Pracovní (řezná) část nástroje má zpravidla hlavní a vedlejší ostří, hlavní a vedlejší hřbet, špičku a čelo (Obr. 3.) Nástroj je upínán za upínací část (stopka) nástroje, která je tvořena upínací plochou, boční plochou a ložnou plochou (základna).



Obr. 3 Soustružnický nůž [1]

#### Obráběcí nástroj tvoří:

*Osa nástroje* – je teoretická přímka s určeným geometrickým vztahem k povrchu nástroje. Je důležitá pro výrobu, upnutí a ostření nástroje. Tato přímka protíná střed stopky nebo upínací díry nástroje. Většinou je kolmá či rovnoběžná k danému povrchu nástroje.

*Základna* – je plocha části stopky nástroje, která je obvykle kolmá či rovnoběžná k základní rovině nástroje. Je důležité si uvědomit, jakou má nástroj základnu, abychom jej správně zorientovali a umístili během jeho výroby, kontroly a ostření. Ovšem ne každý nástroj má přesně definovanou základnu.

*Stopka* – část nástroje určena pro upnutí.

*Upínací díra* – součet vnitřních ploch tělesa sloužící pro upnutí nástroje.

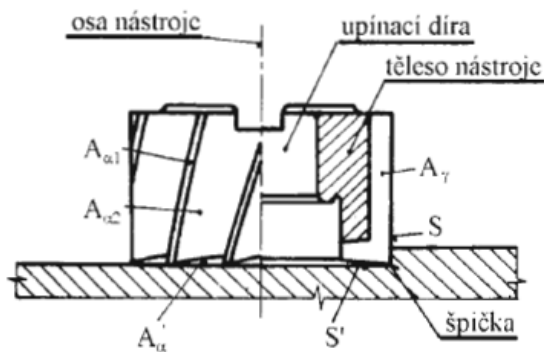
*Čelo* – plocha nebo souhrn ploch, po kterých odchází tříska. Rozdělujeme čelo hlavní a čelo vedlejší.

*Řezná část (břit)* – je část řezné části nástroje ohraničená plochou hřbetu a plochou čela, po které odchází během obrábění tříska. Může být spojena s hlavním tak i vedlejším ostřím.

*Hřbet* – plocha nebo souhrn ploch, které se přimykají k ploše řezu. Existuje hlavní a vedlejší hřbet.

*Nástrojové ostří (ostří)* – přechodová část břitu mezi čelem a hřbetem. Existuje nástrojové ostří hlavní a nástrojové ostří vedlejší.

*Špička* – spojnice (zaoblená přechodová část) mezi hlavním a vedlejším ostřím. [2]

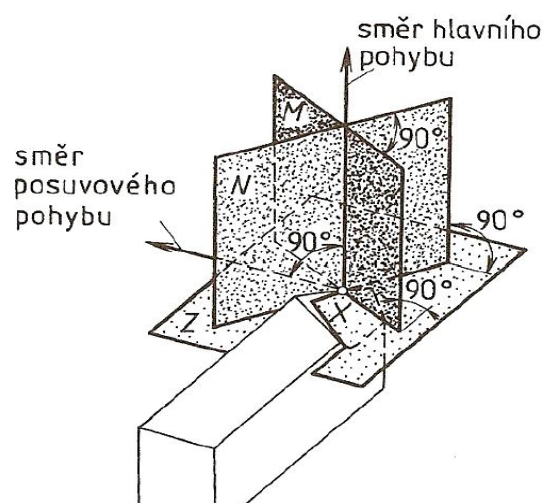


Obr. 4 Čelní nástrčná fréza [4]

### 1.3 Nástrojové roviny a úhly

Geometrie nástroje je důležitá pro konstrukci, výrobu, kontrolu a ostření. Roviny, které jsou obsaženy na nástroji, se nazývají nástrojové roviny. Úhly jsou nepostradatelným parametrem pro identifikaci geometrické polohy hřbetu, čela, ostří. Nástrojové úhly jsme schopni definovat v nástrojové souřadnicové soustavě, kdežto pracovní úhly se definují v pracovní souřadnicové soustavě. Zde uvedené definice rovin a grafická znázornění jsou dále upřesněny pro pravý ubírací soustružnický nůž (Obr. 5.).

M - ortogonální rovina, N - rovina hlavního ostří, Z - základní rovina, X - vybraný bod, ve kterém se určuje daná geometrie břitu



Obr. 5 Roviny nástroje [2]



*Ortogonalní rovina (M)* je rovina kolmá k základní rovině i rovině hlavního ostří a protíná zvolený bod X, ve kterém měříme dané geometrii břítu.

*Rovina hlavního ostří (N)* je tečná rovina k bodu v hlavním ostří X, tedy v bodě, ve kterém určuje geometrii břítu. Rovina hlavního ostří je kolmá k rovině základní.

*Základní rovina (Z)* je rovina procházející bodem X v hlavním ostří, který jsme si zvolili a je kolmá na směr řezného pohybu.

### Nástrojové úhly

#### *V ortogonalní rovině*

úhel hřbetu  $\alpha$  – úhel mezi tečnou rovinou plochy hřbetu a rovinou N,

úhel břítu  $\beta$  – úhel mezi tečnou rovinou plochy čela s tečnou rovinou plochy hřbetu,

úhel čela  $\gamma$  – úhel mezi tečnou rovinou plochy čela a roviny Z,

– může dosahovat kladné (+ $\gamma$ ) nebo záporné (- $\gamma$ ) hodnoty:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ \quad (1)$$

úhel řezu  $\delta$  – úhel mezi tečnou rovinou plochy čela a roviny N:

$$\alpha + \beta = \delta \quad (2)$$

#### *V základní rovině*

úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa$  – úhel mezi rovinou N a směrem posuvu nástroje,

úhel nastavení vedlejšího ostří  $\kappa'$  – úhel mezi rovinou N' a směrem posuvu nástroje,

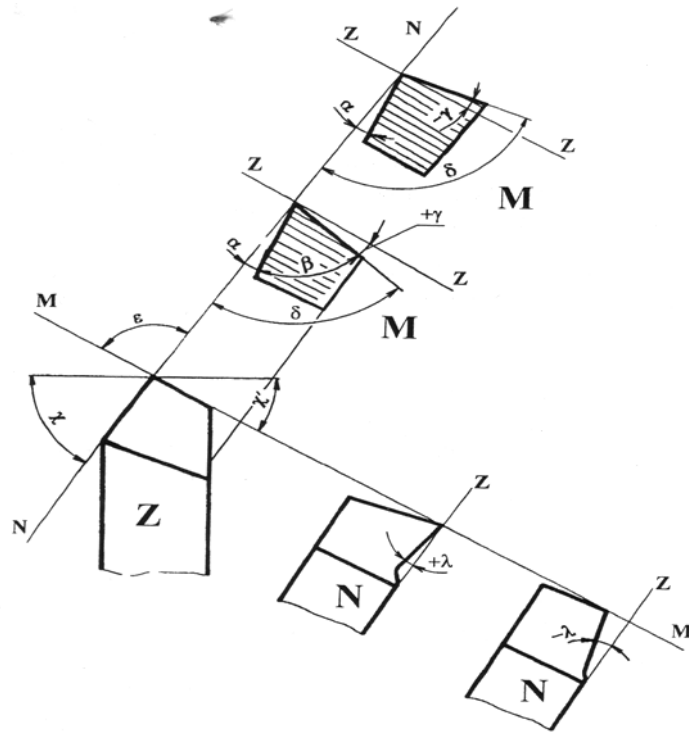
úhel špičky nástroje  $\varepsilon$  – úhel mezi rovinou N a N':

$$\kappa + \kappa' + \varepsilon = 180^\circ \quad (3)$$

#### *V rovině hlavního ostří*

úhel sklonu ostří  $\lambda$  – úhel mezi tečnou přímkou ostří a rovinou Z

– Může dosahovat kladné (+ $\lambda$ ) nebo záporné (- $\lambda$ ) hodnoty [2]



Obr. 6 Pracovní úhly řezného nástroje [1 ]

#### 1.4 Kinematika řezného procesu

Řezný pohyb se uskutečňuje mezi nástrojem a obrokem. Vzniká díky určité relativní rychlosti nástroje nebo obrobku po určité dráze. Ve většině případů je pohyb tvořen dvěma složkami.

- Hlavní řezný pohyb

Hlavní pohyb vykonávaný na stroji mezi obrobkem nebo nástrojem. Při soustružení je to rotační pohyb obrobku, při hoblování je to přímočarý pohyb obrobku, při obrábění je to přímočarý pohyb nástroje.

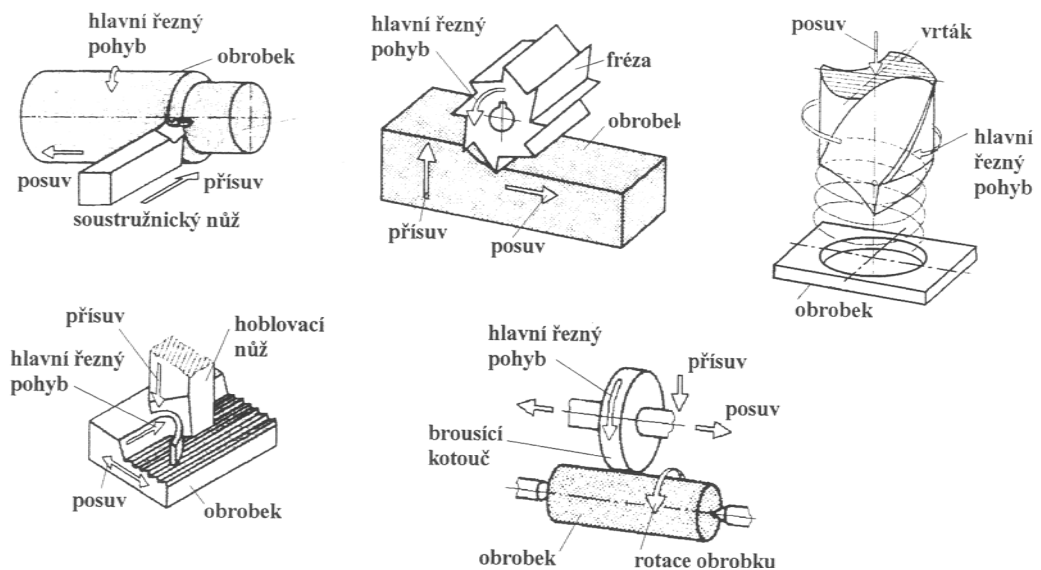
- Vedlejší řezný pohyb

Vedlejší řezný pohyb je jednoduše řečeno pohyb kolmý na hlavní řezný pohyb obráběcího stroje. Vedlejší řezný pohyb je specifikován jako posuv. Vykonává jej nástroj nebo obrobek. Podle působení vedlejšího řezného pohybu se bavíme o posuvu podélném, příčném, kruhovém, plynulém, přerušovaném. [1]

Velikost posuvu se vyjadřuje:

- délkou dráhy  $f$  ( $s$ ) v mm na jednu otáčku vřetene, je-li posuv odvozen od hlavního řezného pohybu
- délkou dráhy  $f_z$  ( $s_z$ ) v mm na jeden zub nástroje, např. frézy, pily, výstružníku, je-li posuv odvozen od hlavního řezného pohybu
- posuvová rychlost  $v_f$  [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ] pokud je posuv odvozen od vedlejšího řezného pohybu, např. pracovní stůl frézky, rychlost posuvu  $v_f = f_z \cdot z \cdot n$ , pokud je posuv odvozen od hlavního řezného pohybu, např. support soustruhu
- přísuv je velikost přísunového pohybu
- hloubka řezu je záběr ostří měřený kolmo na směr posuvového pohybu. Obvykle je to vzdálenost mezi obráběnou a obrobenou plochou. [1]

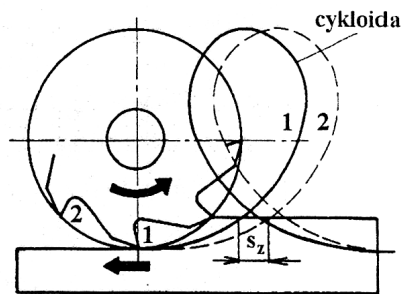
Na Obr. 6 jsou znázorněny základní obráběcí procesy soustružení, frézování, vrtání, hoblování, broušení.



Obr. 7 Druhy obráběcích procesů [2]

## 2 FRÉZOVÁNÍ

Frézování je třískové obrábění, kterým se obrábějí rovinné i tvarové plochy otáčejícím se vícebitovým nástrojem - frézou. Hlavní řezný pohyb je rotační a vykonává jej nástroj. Tento pohyb je dán řeznou rychlostí, která závisí na materiálu nástroje. Vedlejší řezný pohyb koná obvykle obrobek a může být přímočarý (pohyb v ose X, Y, Z) nebo kruhový. Výsledným řezným pohybem je tedy cykloida Obr. 7. U moderních frézovacích strojů jsou posuvné pohyby plynule měnitelné a mohou se realizovat ve všech směrech (obráběcí centra, víceosé CNC frézky). Řezný proces je přerušovaný, každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky. [2]



Obr. 8 Cykloida [3]

Na (Obr. 9) lze vidět důležité oblasti, které vznikají na povrchu obrobku.

*Obráběná plocha* - jedná se o plochu, z níž se odebírá vrstva materiálu, která se mění v třísku.

*Plocha řezu* - plocha, která se vytváří na obrobku hlavním a vedlejším břitem nástroje a tvoří přechod mezi obráběnou a obrobenou plochou.

*Obrobená plocha* - nově vytvořený povrch, vzniklý odebráním vrstvy materiálu.

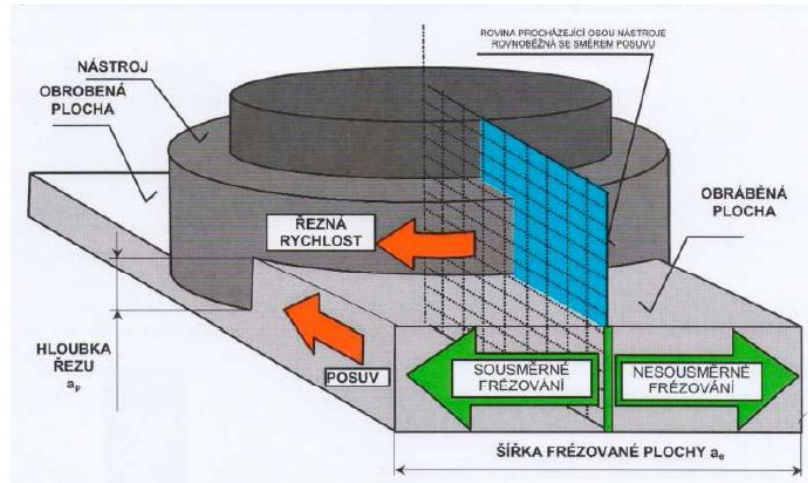
*Řezná rychlost* - jedná se o rychlost hlavního rotačního pohybu, kterou při frézování vykonává nástroj (u nástrojů s úhlem  $\kappa_r = 90^\circ$  je řezná rychlost nezávislá na hloubce řezu  $a_p$ ).

Vypočte se ze vztahu:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (4)$$

Kde:  $v_c$  = řezná rychlost [m/min]  $D$  = průměr nástroje [mm]

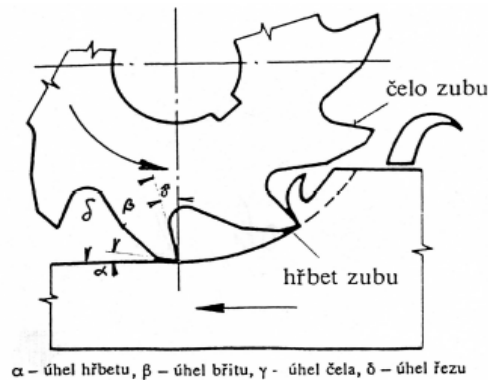
$n$  = počet otáček vřetene [1/min]



Obr. 9 Schéma frézování [2]

## 2.1 Geometrie břitu frézy

Aby břit mohl odebírat třísky, musí k tomu být náležitě upraven. Každý zub má klínovité provedení zakončené břitem, tvořeným dvěma plochami (čelem a hřbetem), v jejichž průsečíku vznikne ostří, které má schopnost odřezávat třísky. Čím ostřejší klín břit má, tím snadněji vniká do materiálu.[6]



Obr. 10 Geometrie břitu frézy [6]

Vzájemná poloha ploch břitu nástroje a obrobku vytváří soustavu úhlů, kterým říkáme geometrie břitu. Hodnoty jednotlivých úhlů jsou závislé na druhu obráběného materiálu a u normalizovaných fréz mají stanovenou hodnotu - příklady jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Geometrie břitu fréz [6]

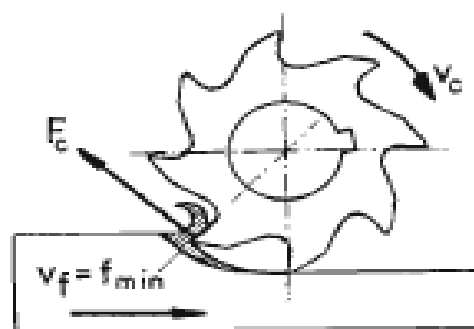
Obráběný materiál	Úhel čela $\gamma$ (°)	Úhel hřbetu $\alpha$ (°)
ocel do pevnosti 600 MPa	12 - 20	5 - 8
ocel do pevnosti 850 MPa	8 - 12	4 - 6
šedá litina do tvrdosti 120 HB	6 - 10	5 - 6
šedá litina nad tvrdost 180 HB	4 - 20	3 - 5
měď	12 - 20	5 - 6
mosaz, bronz	0 - 12	4 - 8
lehké slitiny	15 - 30	8 - 12
plasty	0 - 15	4 - 6

## 2.2 Kinematika obráběcího procesu

### Nesousledné frézování

Směr otáčení frézy a směr posuvu nejsou shodné. Fréza se otáčí proti směru posuvu (Obr. 8). Břit vniká do materiálu při nulové tloušťce odřezávané vrstvy a z řezu vychází při maximální tloušťce třísky, která je úměrná posuvu na zub  $f_z$ . Výsledná řezná síla směřuje ven z obrobku, proto klademe vyšší nároky na upnutí materiálu. Při záběru se břit nástroje „sklouzne“ po obráběné ploše => horší drsnost obrobenej plochy.

- Menší opotřebení šroubu a matice
- Nemusí se vymezovat vůle mezi posuvným šroubem a maticí stolu stroje
- Trvanlivost nástroje nezávisí na okujích a pod. [2]



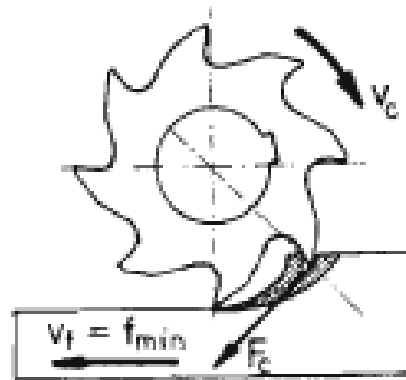
Obr. 11 Nesousledné frézování [3]

### Sousledné frézování

Fréza se otáčí ve směru posuvu, průřez třísky se mění od maximální hodnoty do 0. Při sousledném frézování lze dosáhnout lepší drsnosti obráběné plochy. Výsledná řezná síla působí obvykle směrem dolů do obrobku, proto jsou kladeny menší nároky na upnutí. Výkon při sousledném frézování je vyšší o 30 až 50% než při nesousledném frézování při

stejně trvanlivosti nástroje. Při obrábění vznikají nepotřebné rázy, které vznikají při záběru každého zubu do materiálu. Sousedné frézování lze provádět jen na přizpůsobených strojích, které mají vymezenou vůli a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu frézy nebo mají pohon řešen pomocí kuličkových šroubů. Při nepoužití vůle způsobuje nestejný posuv, při němž může dojít k degradaci nástroje, ale i stroje.

- Vyšší trvanlivost břitů
- Menší sklon ke chvění
- Menší sklon k tvoření nárůstků
- Menší drsnost obrobenej plochy [3]

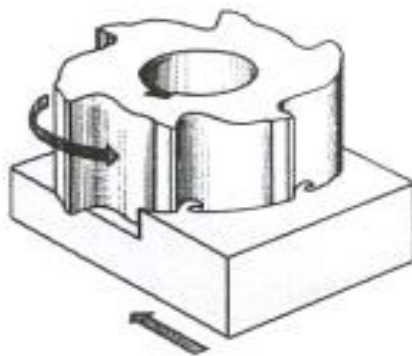


Obr. 12 Sousedné frézování [3]

### Čelní frézování

Osa frézy je kolmá k obráběné ploše. Materiál je odebírán břity na obvodu, ale současně i břity na čelní ploše frézy. Tloušťka odebírané třísky se mění od minima do maxima podle daného průměru frézy a šířky obráběné plochy. Čelní frézování je ze všech tří způsobů nejvýkonnější, protože současně zabírá více zubů. Z toho vyplývá, že lze volit větší posuv stolu. V případě použití poměru šířky frézované plochy  $B$  k průměru frézy  $D$  a polohu osy frézy vzhledem k danému materiálu lze frézování čelní také rozdělit na dva způsoby (Obr. 10).

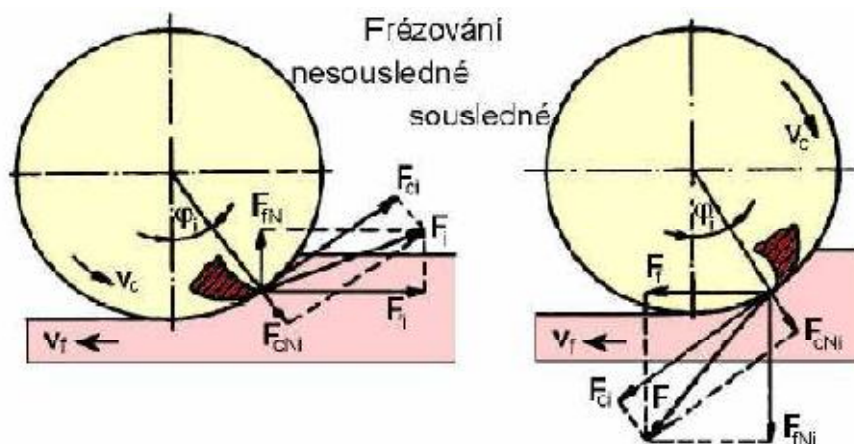
- Symetrické – průměr frézy je větší než šířka materiálu
  - plocha materiálu je obrobena na jeden posuv
- Nesymetrické – průměr frézy je menší než šířka materiálu
  - plocha materiálu je obrobena na více posuvů [2]



Obr. 13 Čelní frézování [3]

### 2.3 Řezné síly při frézování

Při specifikaci řezných sil při frézování se vychází ze silového poměru na jednom břitu, který je v poloze určené úhlem  $\varphi_i$ . Pro válcové frézování nástrojem s přímými zuby se celková řezná síla působící na břitu  $F_i$  rozkládá na složky  $F_{ci}$  a  $F_{cNi}$ , resp. na složky  $F_{fi}$  a  $F_{fNi}$ . [7]



Obr. 14 Řezné síly [7]

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

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (5)$$

Měrná řezná síla  $k_{ci}$  se vyjádří pomocí vztahu:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (6)$$

Po dosazení a úpravě:



$$F_{ci} = C_{FC} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^x \varphi_i \quad (7)$$

Při čelním frézování se řezná síla  $F_{ci}$  vyjádří obdobným postupem:

$$F_{ci} = k_{ci} \cdot A_{Di} = k_{ci} \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi_i \quad (8)$$

$$k_{ci} = \frac{C_{FC}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{FC}}{(f_z \cdot \sin \kappa_r \cdot \sin \varphi_i)^{1-x}} \quad (9)$$

$$F_{ci} = C_{FC} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin \kappa_r^{x-1} \cdot \sin^x \varphi_i \quad (10)$$

Protože frézy jsou v převážné většině vícebřité nástroje, je při frézování vždy vzáběru několik zubů současně. Výsledné síly pak závisí na počtu zubů v záběru a na okamžité poloze zubu frézy vzhledem k obrobku. Z hlediska potřebného kroutícího momentu a výkonu na vřetenu frézky je pak důležitá celková řezná síla  $F_c$ , která se pro válcové frézování vypočítá podle vztahu: [7]

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{FC} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad (11)$$

Pro čelní frézování:

$$F_c = \sum_{i=1}^{n_z} F_{ci} = C_{FC} \cdot a_p \cdot f_z^x \cdot \sin^{x-1} \kappa_r \cdot \sum_{i=1}^{n_z} \sin^x \varphi_i \quad (12)$$

Počet zubů v záběru se pro válcové frézování vypočítá podle vztahu:

$$n_z = \frac{\varphi_{max}}{360} \cdot z \quad (13)$$

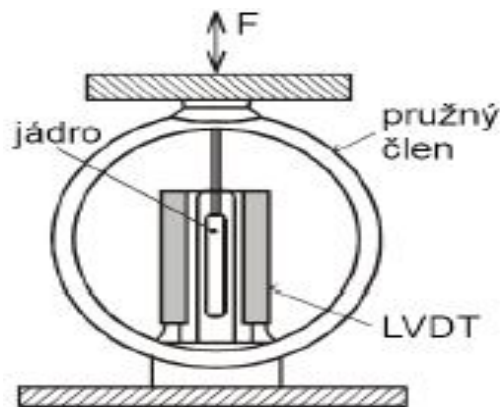
Pro čelní frézování

$$n_z = \frac{\psi}{360} \cdot z \quad (14)$$

## 2.4 Měření řezných sil

### 2.4.1 Indukčností snímače sil

Jsou tvořeny deformačním členem, který změnou svého tvaru způsobí posun jádra v dutině cívky. Pro rozsahy 10 N až 106 N se používají snímače ve spojení s prstencovým pružným členem dle obrázku. Jsou to snímače pasivní. Jejich přesnost je 1 až 3 %. [10]



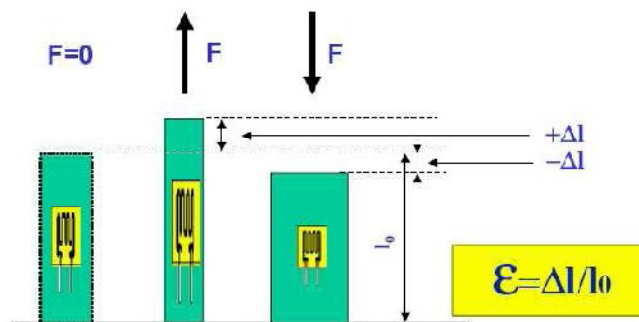
Obr. 15 Prstencový pružný člen [7]

#### 2.4.2 Kapacitní snímače sil

Pracují na principu změny kapacity vlivem síly. Deformační člen má většinou tvar desky, která zároveň tvoří jednu elektrodu kondenzátoru. Působením síly se mění vzdálenost mezi elektrodami a tím i kapacita kondenzátoru. Jejich nevýhodou je poměrně malá změna kapacity v závislosti na působící síle a tedy malý výstupní signál. Také tyto snímače jsou pasivní. [26]

#### 2.4.3 Tenzometrické odporové snímače sil

Pracují na principu pružné deformace měřícího členu působící silou. Deformace se měří odporovými tenzometry kovovými nebo polovodičovými. [10]



Obr. 16 Tenzometrické snímače sil [7]

Základní rozdělení odporových tenzometrů

- kovové – drátkové, fóliové, vrstvené
- polovodičové – monokrystalické, polykrystalické

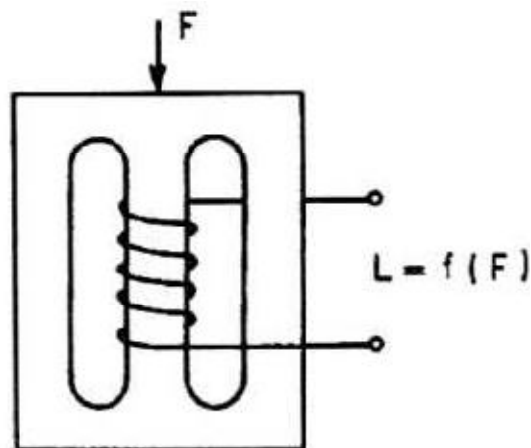
Rozsah měřených sil u těchto snímačů je 1 N až desetitisíce N. U některých typu se dosahuje přesnosti až 0,04 %.

#### 2.4.4 Magnetické snímače sil

Činnost snímačů je založena na stanovení magnetických změn magnetických veličin vyvolaných deformacemi feromagnetických materiálu uspořádaných v magnetických obvodech, v jejichž důsledku se mění impedance magnetického obvodu nebo vlastní či vzájemná indukčnost cívek. Pro měření síly jsou nejdůležitější principy magnetoanizotropie a magnetostrikce.

*Magnetostrikční snímače:*

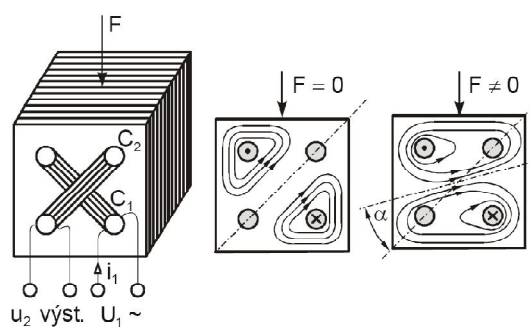
Využívají jevu, který vlivem deformací vyvolaných vnějšími silami (tlakem) mění permeabilitu feromagnetika a tím i velikost indukovaného napětí do cívky. [7]



Obr. 17 Magnetostrikční snímače [7]

*Magnetoanizotropní snímače:*

Využívá se deformace magnetického pole při deformaci feromagnetika. Snímač má dvě vinutí, která jsou na sebe kolmá. Při působení síly dojde k anizotropnímu rozložení permeability. Snímače jsou vhodné pro velké síly, řádově MN. [7]



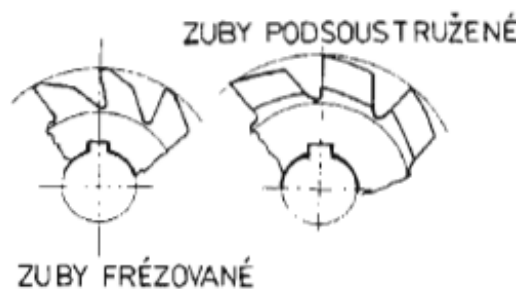
Obr. 18 Magnetoanizotropní snímač [7]

### 3 FRÉZOVACÍ NÁSTROJE

Frézy jsou několikabřité nástroje, jejichž břity jsou uspořádány na válcové, kuželové nebo jiné tvarové ploše, u čelních fréz také na čelní ploše. Frézy můžeme rozdělit do několika jednotlivých skupin. Třídění s rozlišení vychází z mnoha hledisek uvedených v ČSN, zejména z hlediska jejich obráběcích vlastností a využití v praxi.

#### 3.1 Rozdělení podle způsobu výroby

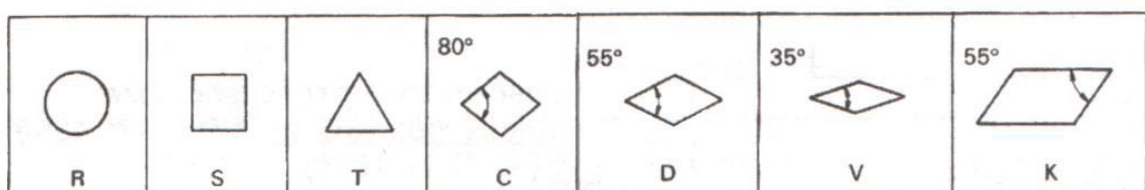
Rozeznáváme frézy s frézovými zuby (brouší se na čele i na hřbetu, používají se pro jednodušší tvary) a frézy s podsoustružovanými nebo podbrušovanými zuby (hřbet zubu tvoří Archimédova spirála, často mají nulový úhel čela, brouší se jen na čele, používají se pro složité tvarové plochy). [3]



Obr. 19 Způsob výroby fréz [3]

#### 3.2 Rozdělení podle počtu dílů

- Celistvé – fréza je vyrobena z jednoho kusu, většinou jsou vyráběny z rychlořezné oceli, při použití větších průměrů a délek frézy více ekonomicky náročné
- Dělené – nástroj je většinou tvořen dvěma nástrčnými válcovými frézami
- S vyměnitelnými břitovými destičkami – destičky se připevňují na materiálově méně kvalitní tělo frézy, které lze k tělu přivařit, připájet nebo mechanicky upnout. Jedná se o praktický a ekonomický způsob. Jsou vyráběny ze slinutých karbonů nebo řezné keramiky. Tvary destiček lze vidět na Obr. 20. [3]



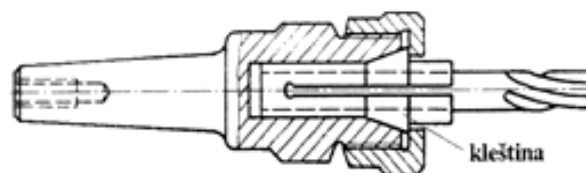
Obr. 20 Tvary vyměnitelných destiček [3]

### 3.3 Rozdělení podle způsobu upnutí

Fréza musí být spolehlivě upnuta, aby při práci neházela a tím nevznikaly na obráběném povrchu nežádoucí stopy. Pro správné upnutí fréz existuje celá řada upínacích prvků, které jsou normalizovány podle daných norem.

#### *Stopkové frézy*

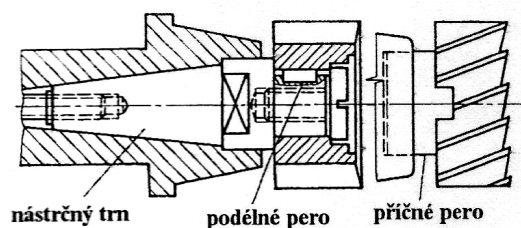
K upínání stopkových fréz se používají normalizované zakončení na frézách např. Morse kužel, drážka. S kuželovou upínací částí se upínají přímo do dutiny vřetene (pokud mají menší kužel, než je ve vřetenu, používáme redukční pouzdra). Stopkové frézy s válcovou upínací částí se upínají pomocí speciální hlavičky s kleštinou (Obr. 21). [3]



Obr. 21 Kleština [3]

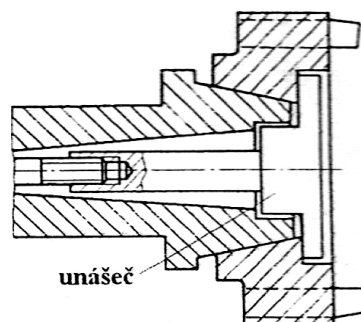
#### *Frézovací hlavy*

K upnutí čelních fréz malého průměru a frézovacích hlav se používají trny s podélným nebo příčným perem, které slouží k zajištění (Obr. 22).



Obr. 22 Frézovací hlava [3]

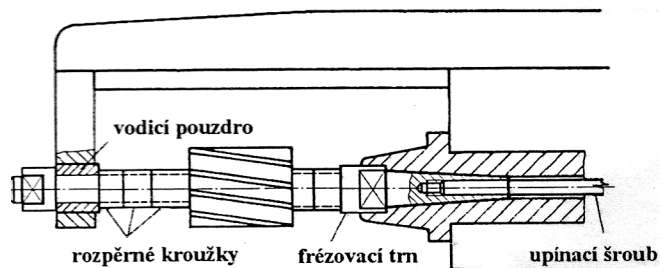
Velké čelní frézy se upínají na vnější kužel a zajišťují se unášečem a šroubem.



Obr. 23 Frézovací hlava [3]

*Nástrčné frézy*

Nástrčné válcové frézy, které se používají na vodorovných obráběcích strojích, jsou upnuty na dlouhé frézovací trny, které jsou zakončeny kuželovou stopkou. Ta je vsazena do dutiny vřetena a druhým koncem je uložena v podpěrném ložisku ramene obráběcího stroje. Na válcové části trnu je vyrobena drážka pro pero. Při nastavení požadované polohy nástroje používáme rozpěrné vymezovací kroužky. [3]



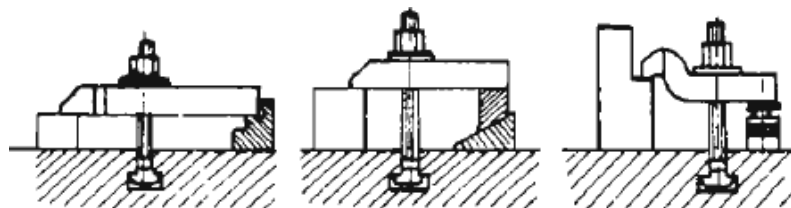
*Obr. 24 Upínání nástrčných válcových fréz [3]*

V neposlední řadě klademe důraz na správné, pevné a bezpečné upnutí obrobku. Při špatném upnutí obrobku může dojít k nevratným poškozením nástroje, popřípadě stroje, protože velké řezné síly se snaží obrobek uvolnit nebo vysunout z upnutí. V malosériové výrobě a kusové výrobě se menší obrobky upínají do klasických strojních svěráků nebo pomocí upínek a šroubů na stůl. Svěráky lze ovládat ručně, pneumaticky nebo hydraulicky. Válcové obrobky lze také upevnit pomocí prizmatického vedení (Obr. 21). [3]



*Obr. 25 Prizmatické vedení [3]*

V sériové výrobě nebo k upnutí rozměrnějších obrobků používáme různé upínky, opěry a rozpěrky, kterými lze docílit přímé upnutí na drážky stolu. [3]



*Obr. 26 Upnutí obrobku [3]*

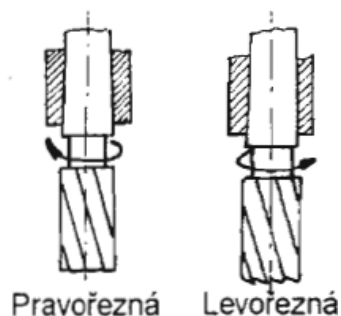
### 3.4 Rozdělení podle smyslu otáčení

Základní rozdělení podle smyslu otáčení je na pravořezné nebo levořezné.

*Pravořezná fréza* se otáčí ve směru hodinových ručiček při pohledu od vřetene, aby axiální řezný tlak směřoval do vřetene. Řezná hrana fréz má většinou levou šroubovici.

*Levořezná fréza* se točí proti směru hodinových ručiček při pohledu od vřetene. Řezná hrana fréz má pravou šroubovici.

U složitých frézovacích hlav má jedna fréza pravou, druhá levou šroubovici. Tímto uložením fréz zanikají axiální síly, které při obrábění vznikají. [3]

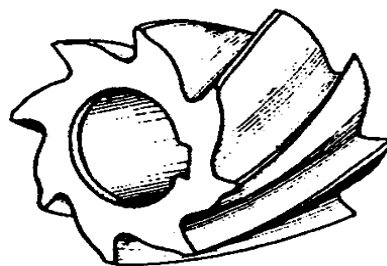


Obr. 27 Otáčení fréz [3]

### 3.5 Rozdělení podle geometrického tvaru funkční části

#### 3.5.1 Válcové frézy

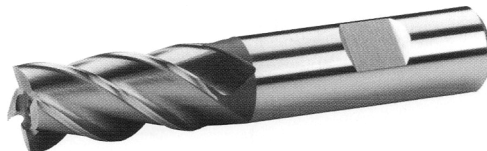
U těchto fréz se zuby nacházejí pouze na obvodě, tyto frézy lze použít pro frézování rovinných ploch rovnoměrných s osou nástroje. Při použití fréz na hrubování se používají frézy, které jsou opatřeny drážkami pro dělení třísek, což nám způsobuje vyšší výkon. Válcové frézy jsou většinou nástrčné. [11]



Obr. 28 Válcová fréza [3]

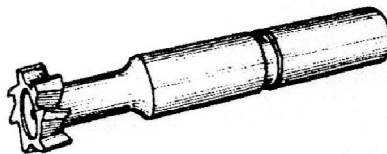
### 3.5.2 Čelní válcové frézy

U těchto nástrojů se zuby nachází na obvodě, ale i na jedné čelní ploše frézy. Čelní válcovou frézou lze zhotovovat výrobky rovinné, kolmé nebo i rovnoběžné plochy na osu nástroje. Velké čelní frézy nazýváme frézovací hlavy, malé čelní válcové frézy nazýváme stopkové. [11]



*Obr. 29 Čelní válcová fréza [8]*

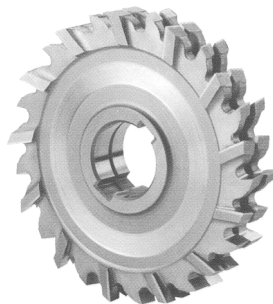
Do této skupiny lze taky zařadit frézy drážkovací (drážkovacími frézami se nejčastěji vyrábí drážky pro pera) nebo frézy pro „T“ drážky (při výrobě „T“ drážky nejdříve vyfrézujeme střed drážky kotoučovou nebo drážkovou frézou a potom frézujeme tvar drážky). [11]



*Obr. 30 Drážkovací fréza [8]*

### 3.5.3 Kotoučové frézy

Používají se převážně pro výrobu drážek, zářezů a vybrání. Zuby jsou umístěny na obvodu i na obou čelech. Požadavkem většinou je, aby frézy měly stejnou šířku i po přestření, proto se dělají dělené a rozměr se nastaví pomocí ocelových vložek. Zuby na obvodu bývají obvykle střídavě v pravé a v levé šroubovici. Výhodou těchto fréz je dobrý odvod třísek. Pilové kotouče se využívají především na dělení materiálu a pro úzká vybrání. [11]

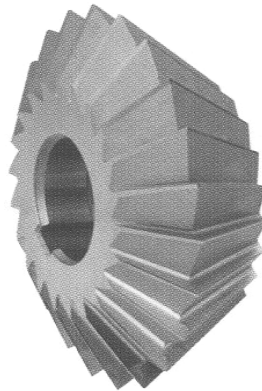


*Obr. 31 Kotoučová fréza [8]*



### 3.5.4 Úhlové frézy

Používají se pro frézování různých úhlových profilů. Můžeme vyrábět např. úkosy, sražení, rybinová vedení, zubové mezery fréz nebo výstružníků. Tvary fréz mohou být souměrné, nesouměrné (jsou určeny pro frézování drážek), jednostranné nebo oboustranné. Frézy mohou být nástrčné nebo stopkové. [11]



Obr. 32 Úhlová fréza [8]

### 3.5.5 Tvarové frézy

Zachovávají stálý tvar a úhel hřbetu i po mnohonásobném ostření (ostření se provádí pouze na čele). Tohoto ostření dosáhneme podsoustružením nebo podbroušením tvaru zubu. Podsoustružování se může provádět radiálně, axiálně nebo šikmo. Tento způsob se provádí na speciálních strojích, kde je pohyb nože řízen vačkou.[11]



Obr. 33 Tvarová fréza [4]

### 3.6 Další rozdělení frézovacích nástrojů

Vzhledem k průměru frézy a počtu zubů lze rozdělit frézy na:

- Jednozubé
- Polohrubozubé
- Hrubozubé

Abychom docílili klidný chod fréz, počet zubů se volí takový, aby současně řezaly nejméně dva zuby.

Podle směru zubů vzhledem k ose rotující frézy se rozdělují na:

- Frézy s přímými zuby
- Frézy se zuby ve tvaru šroubovice

Zuby ve šroubovici vnikají do záběru postupně, takže řezný proces je plynulý a klidnější.

Sklon šroubovice je  $10^\circ$  až  $45^\circ$  a někdy i více. [4]

## 4 MATERIÁLY FRÉZ

Při volbě materiálu nástroje a jeho zpracování je základním požadavkem dobrá a spolehlivá práce konstruovaného nářadí. Při obrábění je řezná hrana namáhána na ohyb či tlak většinou za vysoké teploty. Působením difuze, adheze a abraze vzniká otěr řezných ploch. Materiál nástroje musí těmto vlivům odolávat. Materiál nástroje musí odolávat vysokým teplotám, mít velkou tvrdost, stálost, odolnost proti opotřebení a spolehlivost při tepelném zpracování. Celkové vlastnosti řezného materiálu, které ovlivňují jeho vhodnost k obrábění, se nazývají řezivost. [9]

### 4.1 Nástrojová ocel

Rozdílný způsob namáhání (např. mechanické, tepelné) funkční části obráběcího nástroje vyžaduje rozdílné vlastnosti (fyzikální, mechanické) nástrojových ocelí, které jsou zajištěny vhodným zpracováním, kdy je nástroj rozdílně tepelně zpracován nebo legován.

**Požadované vlastnosti všech nástrojových materiálů jsou:**

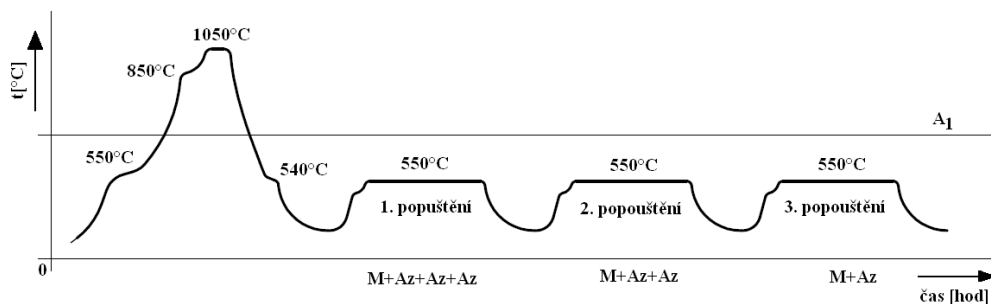
- Tvrdost a pevnost
- Odolnost proti opotřebení
- Houževnatost
- Řezivost
- Kalitelnost a prokalitelnost
- Odolnost proti ohýbání[2]

*Tab. 2 Rozdělení nástrojové oceli [9]*

Označení oceli	Význam třetí číslice v základní značce oceli	
19 0xx 19 1xx 19 2xx	Dvojčíslí ze 3. a 4. Číslice vyjadřuje střední obsah uhlíku	Nelegované nástrojové oceli
19 3xx	Manganové, vanadové, křemikové oceli	Legované nástrojové oceli
19 4xx	Chrómové oceli	
19 5xx	Chrómmolybdenové oceli	
19 6xx	Niklové oceli	
19 7xx	Wolframové oceli	
19 8xx	Rychlořezné oceli	
19 9xx	Volné	

## 4.2 Rychlořezná ocel

Tato ocel obsahuje velký obsah wolframu. Mohla by být zařazena mezi wolframové oceli. Kvůli své značné odlišnosti je však zařazena do vlastní samotné skupiny. Obsahuje přísadové prvky, W, Co, Cr, Mo, V a další. Rychlořezné oceli obsahují méně než 1% uhlíku. Podle obsahu legujících prvků jsou vhodné pro řezné nástroje na obrábění ocelí, ocelí na odlitky o vysoké pevnosti a těžkoobrobitelných materiálů. Součet legovaných prvků je většinou vyšší než 10%, tvrdost nástroje se pohybuje v rozmezí 64 až 68 HRC. Jsou charakteristické vysokou lomovou pevností. Rychlořezná ocel je houževnatá a v žíhaném stavu je snadno obrobitelná. Nástroje z rychlořezné oceli snášejí teplotu bříty až do 700°C. Oproti nástrojovým ocelím nelegovaným se vyznačují mnohonásobným zvýšením řezné rychlosti (2-3x zvýšené). Existují 3 výkonnostní skupiny (Pro běžný výkon, výkonné, vysoce výkonné). [9]



Obr. 34 Tepelné zpracování RO [9]

## 4.3 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy jsou vyráběny práškovou metalurgií. Vyrábějí se z karbidů těžkých kovů: karbidu wolframu (WC), karbidu tantalu (TaC), karbidu titanu (TiC) a nízkotavitelného kobaltu. Slinuté karbidy nejsou slitinou, nýbrž směsí dvou a více fází. Po výrobě nástroje ze slinutého karbidu už není možné další zpracování. Vyznačují se svou vysokou tvrdostí, dají se tvarově a rozměrově upravovat jen pouze broušením, elektroerozivním obráběním či lapováním. Slinuté karbidy jsou vyráběny ve tvaru destiček normalizovaných tvarů a velikostí, které jsou následně připájeny nebo mechanicky upevněny na řeznou část plochy. Tyto destičky mají několik ostří, které lze otáčením postupně využít. Po opotřebení všech ostří se destička nedá používat (nedá se ostřit) a vyřadí se. Nevýhodou slinutých karbidů je poměrně malá tepelná stabilita a velká křehkost, která si vyžaduje pevnou soustavu stroj - nástroj - obrobek. Řezné vlastnosti slinutých karbidů jsou významně zlepšovány povlakováním. [9]

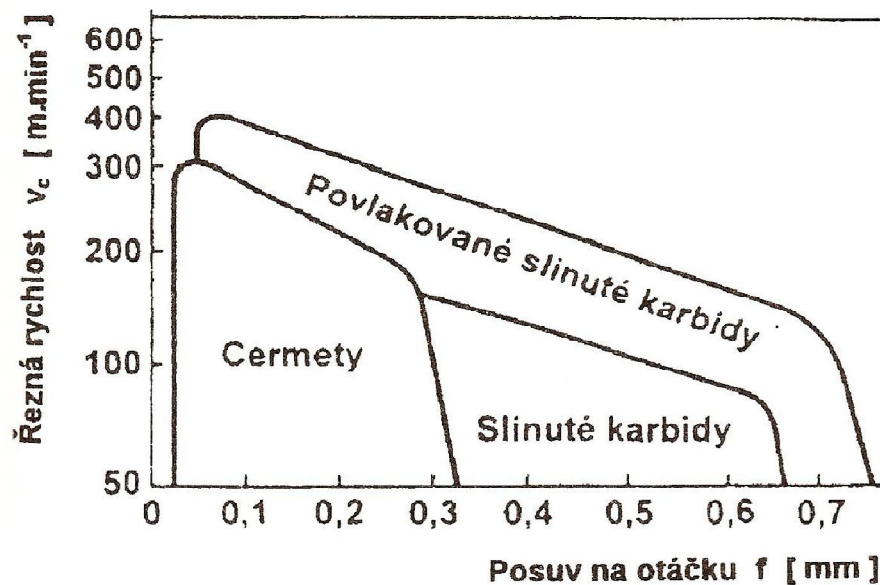
Tab. 3 Rozdělení SK [12]

Skupina slinutých karbidů	Oblast použití, barva
P	Pro obrábění houževnatých materiálů s tvářenou třískou (oceli, oceli na odlitky, temperované litiny) Barva: modrá
M	Pro univerzální použití k obrábění všech druhů litin, ocelí a těžko obrobitelných slitin Barva: žlutá
K	Pro obrábění materiálu s drobnou třískou (šedé litiny, kalené oceli, plasty) Barva: červená

Dále se slinuté karbidy dělí v každé skupině podle mechanických vlastností číselným označením (01, 10, 20, 30, 40...)

#### 4.4 Cermety

Tyto řezné materiály obsahují tvrdé částice (TiC, TiN, TiCN, TaN) v kovovém pojivu (Co, Ni, Mo), které jsou vyráběny práškovou metalurgií. Kovové částice zabezpečují vysokou tvrdost a s tím se také zvyšuje odolnost materiálu proti deformaci. Cermety nemají takovou houževnatost jako SK, ale vyznačují se vysokou tepelnou odolností, odolností proti otěru hřbetu a tvorbě výmolu na čele. Součinitel tření je ovlivněn nekovovými složkami, které ho výrazně snižují. Používají se proto především na dokončovací operace jako jsou jemné soustružení atd. V praxi se mezi cermety počítají materiály na bázi karbidu titanu, nitridu titanu a karbonitridu. Vyrábí se ve formě vyměnitelných destiček pro frézování, řezání závitů a soustružení.[9]



Obr. 35 Oblasti řezných podmínek při soustružení běžných ocelí [2]

## 4.5 Řezná keramika

Keramické řezné materiály jsou materiály používané pro specifické účely. Při výrobě keramiky je používána základní surovina oxid hlinitý (levný) nebo nitrid křemíku. Řezná keramika se jako SK a cermety vyrábí práškovou metalurgií rovnou slinováním lisovaných prášků do tvaru řezných destiček. Nevýhodou je velmi nízká pevnost v ohybu, z toho vyplývá, že nejsou vhodné pro přerušované obrábění řezem a k obrábění větších průřezů třísek. V porovnání se slinutými karbidy jsou keramické řezné materiály při stejné tvrdosti mnohem odolnější proti otěru. Břit snáší pracovní teplotu až 1200 °C a může být použit při řezných rychlostech 300-1600 m.min<sup>-1</sup>. Destičky z keramických řezných materiálů se po otupení všech řezných hran (6 až 8) neostří, dále se nepoužívají a vyhazují se. [9]

## 4.6 Kubický nitrid boru

Zaujímá po nejtvrdějším diamantu druhé místo v tvrdosti řezných materiálů. Výhodou KNB je vysoká odolnost proti opotřebení, kdy pracovní teplota při obrábění může dosahovat vysokých teplot až kolem cca 1000°C. Břítových destiček z KNB se využívá zejména při obrábění tvrdých materiálů, kalených nástrojových ocelí, kobaltových a niklových slitin, žáruvzdorných materiálů. Uplatnění lze najít i při dokončovacích operacích obrábění. Využití je především u broušení. [9]

## 4.7 Polykrystalický diamant

Používá se pro obrábění neželezných kovů a nekovových materiálů jako např. hliníku a jeho slitin, mosazi, bronzu, titanu a jeho slitin. Perspektivní je jeho využití v obrábění dřevěných materiálů. Jedná se většinou o materiály, jejichž teplota tavení leží pod 700°C. Diamant se vyznačuje nízkou teplotní stálostí, při překročení teploty 650°C se mění na grafit. Možné další použití je při výrobě řezných destiček, kde se nanáší vrstva PKD na kruhovou destičku ze slinutého karbidu. [2]

## 4.8 Povrchové povlaky nástrojů

*TiN* - standardní vrstva použitelná univerzálně. Ve srovnání s nepovlakovanými nástroji vykazuje o 300-400 % větší trvanlivost ostří. Lze používat jen s chlazením.

*TiCN (multivrstva)* - vykazuje vysokou tvrdost a současně dobrou houževnatost. Vyniká nízkým koeficientem tření. Poupžitelná pro frézování vysoce pevných ocelí.

Má nižší teplotní stabilitu, je nutné chlazení např. emulze.

*TiAlN (multivrstva)* - vyznačuje se vysokou tvrdostí za vyšších teplot, dobrou odolností proti oxidaci a nízkou tepelnou vodivostí. Univerzální použití s důrazem na vysokorychlostní obrábění bez chlazení. Vhodné pro frézování tvrdých materiálů.

*AlTiN* - s podobnými vlastnostmi a dokonce s vyšší tvrdostí než TiAlN, značná tepelná stabilita, pro nejnáročnější operace. Výborných výsledků vykazuje s kombinací oceli HSSE-PM. [8]

Tab. 4 Povlaky nástrojů [8]

Povlak	Barva	Nanotvrdost [GPa]	Tloušťka vrstvy [μm]	Koeficient tření*	Max. teplota použití [°C]
TiN	zlatá	24	1-7	0,55	600
TiCN	bronzověhnědá	32	1-4	0,2	400
TiAlN	fialovočerná	30	1-4	0,6	700
AlTiN	černá	38	1-4	0,7	900

## 5 HODNOCENÍ STRUKTURY POVRCHU

### 5.1 Drsnost povrchu

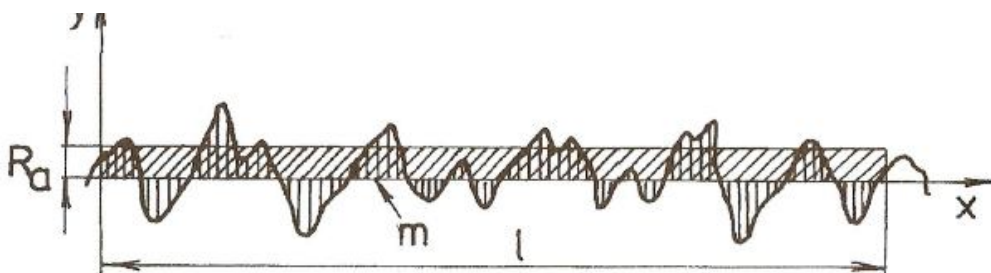
Drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které mohou vznikat při výrobě nebo jejím vlivem. Mezi drsnost lze zahrnout vady povrchu např. nepravidelné nerovnosti na povrchu, které se vyskytují jen ojediněle (rysky, trhlinky, důlky apod.). Drsnost povrchu je závislá na druhu obrábění, technologických podmínkách a druhu obráběného materiálu. Měření drsnosti povrchu probíhá porovnáním se vzorkovým etalonem nebo změřením hodnot udávajících charakteristiku drsnosti povrchu.[2] Mezinárodní norma uvádí tyto parametry drsnosti povrchu:

#### 5.1.1 Střední aritmetická úchylka profilu $R_a$

Střední aritmetická úchylka je určena vztahem:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (15)$$

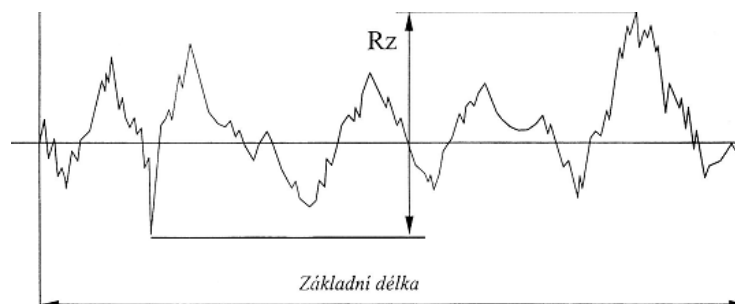
kde  $l$ .....základní délka  $y$ ..... absolutní úchylka profilu v rozsahu základní délky



Obr. 36 Grafické znázornění  $R_a$  [13]

#### 5.1.2 Největší výška profilu $R_z$

Je definovaná jako součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.



Obr. 37 Největší výška profilu  $R_z$  [13]



## 6 HOSPODÁRNOST OBRÁBĚNÍ

### 6.1 Opotřebení břitu nástroje

Při technologickém procesu vzniká mezi materiálem a nástrojem velké množství tepla, které se vyvíjí na ploše čela a hřbetu nástroje. Tepelné zatížení vysoce namáhá materiál břitu nástroje a například při frézování mohou vytvářet dynamický faktor v okamžiku, kdy jeden břit z materiálu vystupuje a opět do něj vniká. Opotřebení je postupně probíhající proces, kde se zvyšuje poloměr ostří. Z toho vyplývá, že se mění geometrie břitu a drsnost plochy čela a hřbetu. Rozeznáváme základní druhy opotřebení. [2]

#### *Otěr stykových ploch*

- Abrazivní otěr – způsobují tvrdé částice obráběného materiálu, jejichž tvrdost je vyšší než některé částice břitu nástroje. Celková tvrdost materiálu nástroje je podstatně vyšší.
- Adhezní otěr – vzniká působením vysokých tlaků vlivem nerovností pracovních ploch břitu. Na nerovnostech vznikají bodové mikrosvary. Při pohybu třísky vůči nástroji dochází k narušování mikrosvarů a k úbytku materiálu nástroje.
- Difuzní otěr – vzniká při vysokých teplotách nad 800°C, kde dochází k difuzi (výměna atomů). Vznikají nové tuhé roztoky a sloučeniny, čímž jsou ovlivněny vlastnosti materiálu.

#### *Plastická deformace*

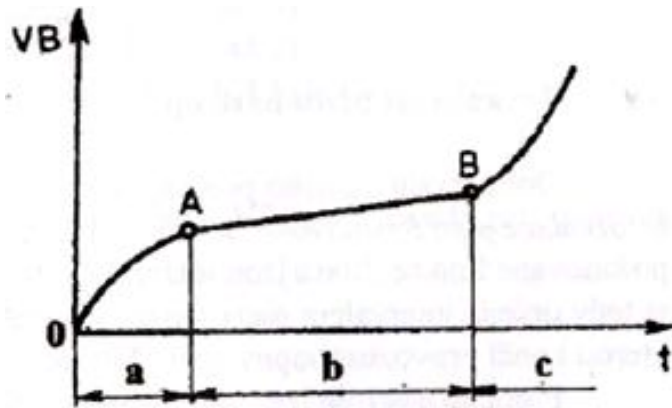
Objevuje se u materiálů a nízkou tepelnou vodivostí jako např. dřevo, kůže, plasty. Vzniklé teplo se hromadí v nástroji a s tlakem vyvolá plastickou deformaci břitu. Lavinovitý otěr vzniká výhradně na hřbetu nástroje.

#### *Křehký lom*

Objevuje se u slinutých karbidů a keramického materiálu, při práci přerušovaným řezem, přetížením nástroje v ohybu, kde okamžitě vzniká zvýšený řezný odpor.[2]

### 6.2 Vnější formy opotřebení

Opotřebení se projevuje většinou ve formě výmolů na čele a nepravidelnou ploškou na hřbetě. Jako hlavní měřítko bereme opotřebení na hřbetě, protože opotřebení na čele je špatně měřitelné. K otupení hřbetu nástroje probíhá ve třech charakterizujících oblastech.

Obr. 38 Závislost  $VB=f(t)$  [2]

*a) Oblast zrychleného záběhového opotřebení*

Výrazné opotřebení na počátku operace vlivem nerovností ostří a vysokých tlaků tzv. vyhlazení nástroje.

*b) Oblast lineárního opotřebení*

Plynulé rovnoměrné opotřebení po vyhlazení ostří a vyrovnání tlaků.

*c) Oblast zrychleného nadměrného opotřebení*

Dochází k němu po dosažení určité hranice otupení a vede až k porušení celistvosti nástroje. Nastává zrychlené opotřebení tzv. lavinovité opotřebení.[2]

### 6.3 Přímé měření hmotnostní metodou

Jako míru opotřebení zde bereme úbytek hmotnosti řezného břitu. Tuto metodu nelze použít přímo během procesu obrábění na obráběcím stroji, ale je poměrně přesná a váhový rozdíl určuje míru opotřebení. Nevýhodou je, pokud se při obrábění tvoří nárůstek. Potom zůstává část břitu ulpěná na destičce a znemožňuje přesné určení hmotnostního úbytku na nástroji. Lze ji použít téměř výhradně u nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami se zřetelem na malé úbytky hmoty při otupování nástroje.

### 6.4 Trvanlivost nástroje

Doba od začátku práce nástroje do jeho výměny. Jde tedy o dobu, po kterou je nástroj schopen pracovat do hospodárného opotřebení (kdy jsou náklady na ostření a výměnu nejmenší). Řezná rychlost, posuv, hloubka řezu a úhel řezu mají významný vliv na trvanlivost

nástroje. Poruchy nástroje lze rozdělit dle různých hledisek postupné, náhlé. Při výpočtu doby trvanlivosti platí následující vztah:[2]

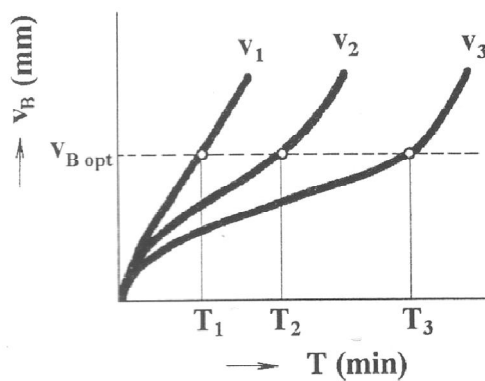
$$T = C_T \cdot v_c^{-m} \tag{16}$$

kde  $C_T$  = konstanta vyjadřující vliv ostatních řezných podmínek

$T$  = trvanlivost břitu

$v_c$  = řezná rychlost

$m$  = experimentálně zjištěný exponent

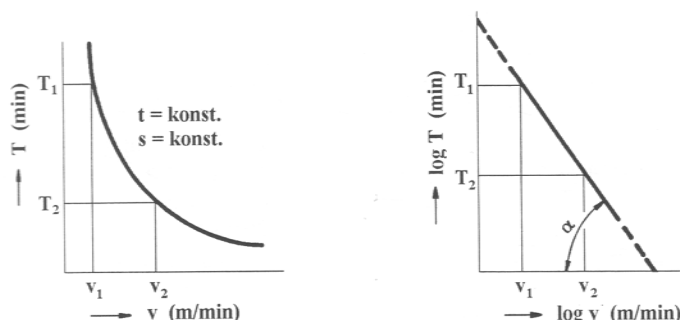


Obr. 39 Průběh závislosti  $VB = f(t)$  [2]

Známe-li hodnotu trvanlivosti  $T_1$  pro řeznou rychlost  $v_1$ , můžeme pro rychlost  $v_2$  určit trvanlivost  $T_2$  ze vztahu:

$$T_1 \cdot v_1^m = T_2 \cdot v_2^m = T_n \cdot v_n^m \tag{17}$$

Vyneseme-li tuto závislost do závislosti  $T - v$ , dostaneme exponenciální křivku, která má v logaritmických souřadnicích přímkový průběh. Hodnota exponentu  $m$  udává zápornou hodnotu směrnice přímky  $m = -\text{tg}\alpha$ . [2]



Obr. 40 Průběh závislosti  $T=f(v_c)$  [2]

## 7 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním cílem bakalářské práce je porovnat různé válcové čelní frézy vyrobené firmou ZPS - FRÉZOVACÍ NÁSTROJE. Frézy se budou lišit geometrií, druhem materiálu a použitím. Nástroji se bude obrábět na univerzální frézce FHV – 50 PD s použitím dynamometru. Hodnocení zkoušek bude obsahovat hodnoty řezných sil, drsnosti obrobených ploch a hmotnostní opotřebení fréz, které jsme docílili frézováním. Výsledkem experimentu bude stanovení neoptimálnějšího typu frézy, jejíž provoz bude nejvýhodnější, nejehospodárnější pro daný obráběný materiál za daných konstantních řezných podmínek.

# **I. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 8 PARTNEŘI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### 8.1 ZPS – Frézovací nástroje a.s.

Tradice výroby fréz sahá již do 30. let 20. století, kdy byla výroba nástrojů jednou z částí strojírenské výroby koncernu Baťa. Počátkem 50. let byla na základě předešlých zkušeností zahájena výroba nástrojů z rychlořezných ocelí (HSS). Tato produkce již spadala pod Závody přesného strojírenství, které jsou známy pod zkratkou ZPS a ve světě se proslavily především výrobou obráběcích strojů. V roce 1992 vznikla uvnitř ZPS a.s. dceřiná společnost ZPS - FRÉZOVACÍ NÁSTROJE. Od června roku 2001 je samostatnou akciovou společností v privátním vlastnictví. Společnost má tři výrobní divize, divize frézy, divize tepelného zpracování a divize vrtáky. Firma je největším tuzemským výrobcem fréz kvůli vysoké kvalitě výrobků, příznivé ceně. K největším exportním regionům v Evropě patří Německo a Rusko. Společnost má certifikovaný systém managementu jakosti dle normy ČSN – EN ISO 9001 : 2008. Firma spolupracuje v okolí s vysokými a středními školami, zejména s katedrou materiálového inženýrství na FT Baťovy univerzity ve Zlíně a Fakultou strojního inženýrství VUT v Brně.

#### ZPS – FN divize frézy

Divize frézy se sídlem v 71. budově průmyslového areálu ve Zlíně se zabývá výrobou fréz z klasických rychlořezných ocelí a nástrojů vyrobených práškovou metalurgií. Nabídka vyrobených fréz je široká od válcových, drážkovacích, kotoučových, pilových, úhlových nebo kopírovacích fréz. Ve firmě lze vyrobit i frézy speciální na objednávku dle individuálních představ zákazníka. Většina hlavních důležitých operací je prováděna na obráběcích centrech od firem Junker a Walter. Velkou výhodou firmy je sousední budova, kde se nachází divize tepelného zpracování, kde mohou být frézy dále tepelně zpracovány, např. kalení, popouštění, iontová a plazmová nitridace.

## 9 TECHNICKÉ PARAMETRY POUŽITÝCH NÁSTROJŮ, STROJŮ A OBROBKŮ

V této kapitole budu popisovat jednotlivé použité experimentální frézy a použité stroje, kterými jsou frézka, drsnoměr, dynamometr, digitální váha.

### 9.1 Experimentální frézy

Frézy jsem zvolil po vzájemné konzultaci s vedoucím práce Ing. Ondřejem Bílkem, Ph.D. Zvolené frézy byly válcové čelní s jednotným  $\varnothing$  12mm provedené v kratší výrobní variantě. Při výběru fréz byl brán ohled na materiál obroku, který byl v našem případě hliník. Výběr fréz se lišil podle odlišných kritérií jako např. různé počty zubů, různé materiály nebo použití. Firma ZPS vybrané frézovací nástroje pro experiment poskytla bezplatně.

Tab. 5 Přehled testovaných nástrojů a jejich označení

Označení nástroje	CODE nástroje	Rozměr	Materiál nástroje
1.	110418.120	$\varnothing$ 12x26	HSSCo8
2.	140205.120	$\varnothing$ 12x26	HSSCo5
3.	120517.120	$\varnothing$ 12x26	HSSEPM
4.	120508.120	$\varnothing$ 12x26	HSSCo5

Tab. 6 Katalogový list frézy č. 1

Fréza č.1					
Rozměr (mm)	D k10	l	L	d h6	z
		12	26	83	12
Materiál	HSSCo8				
Úhly	$\gamma$	25°			
	$\lambda$	40°			
Směry frézování	↓				
	↘				
	→				
Typ	W				
Upnutí	DIN 1835B				
Hmotnost (g)	57,832				
Použití	1,12				

Tab. 7 Katalogový list frézy č. 2

Fréza č.2					
Rozměr (mm)	D k10	l	L	d h6	z
		12	26	83	12
Materiál	HSSCo5				
Úhly	$\gamma$	12°			
	$\lambda$	40°			
Směry frézování	↓				
Typ	N				
Upnutí	DIN 1835A				
Hmotnost (g)	63,056				
Použití	1,2,3,4				

Tab. 8 Katalogový list frézy č. 3

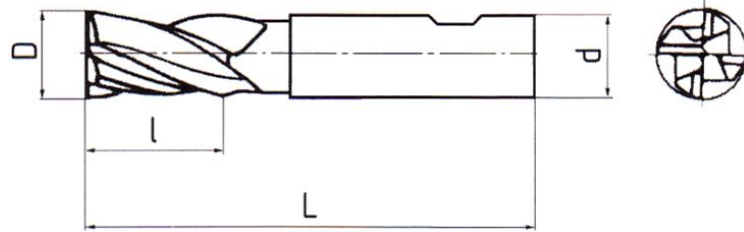
Fréza č.3					
Rozměr (mm)	D k10	l	L	d h6	z
		12	26	83	12
Materiál	HSSE PM				
Úhly	$\gamma$	12°			
	$\lambda$	30°			
Směry frézování	↓				
	↘				
	→				
Typ	N				
Upnutí	DIN 1835B				
Hmotnost (g)	61,286				
Použití	1,2,3,4,5,6,7,9,10,12,13				

Tab. 9 Katalogový list frézy č. 4

Fréza č.4					
Rozměr (mm)	D k10	l	L	d h6	z
		12	26	83	12
Materiál	HSSCo8				
Úhly	$\gamma$	8°			
	$\lambda$	30°			
Směry frézování	↓				
	↘				
	→				
Typ	N				
Upnutí	DIN 1835A				
Hmotnost (g)	60,940				
Použití	1,2,3,4,6,7,9,10,12				



Na Obr. 41 lze vidět ukázkou kótování základních rozměrů fréz, jako jsou průměr upínací části, průměr obráběcí části, celková délka nástroje, délka řezné části.



Obr. 41 Kótování rozměrů fréz

#### Charakteristika materiálů fréz

- HSS Co8

Vysoce výkonná ocel s dobrou houževnatostí a výbornou teplotní odolností. Vhodná především pro frézování vysoce pevných materiálů, austenitických ocelí, ocelí pro tváření za tepla. Použito u frézy č. 1, 4.

- HSS Co5

Vysoce výkonná rychlořezná ocel s dobrou houževnatostí pro frézy a frézování materiálů do pevnosti 1200 MPa. Použito u frézy č. 2.

- HSSE PM

Vysoce výkonná ocel vyrobená pomocí práškové metalurgie. Má homogenní strukturu, která se projevuje vyšší rozměrovou stálostí a trvanlivostí ostří nástroje. Vhodná pro obrábění vysoce pevných a těžce obrobitelných materiálů jako např. titanu a jeho slitin. Frézy jsou standardně dodávány s povlakem AlTiN, k experimentálnímu měření byla dodána fréza bez povlaku. Použito u frézy č. 3.

V Tab. 10 můžeme vidět přehled ocelí, ze kterých firma ZPS – FN své frézy vyrábí, jejich označení v normách ČSN, DIN, EN a AISI, dále procentuální chemické složení jednotlivých přísadových prvků. Velmi důležitá vlastnost u jednotlivých druhů ocelí je tvrdost. Firma udává tvrdost měřenou podle metody Rockwella (ČSN 42 0373) HRC. Tvrdost je určena diamantovým kuželem (C = cone) při celkovém zatížení 1500 N.

Tab. 10 Charakteristika ocelí

Označení	Norma				Chemické složení (%)						Tvrдость
	ČSN	DIN	EN	AISI	C	Cr	Mo	V	W	Co	
HSS	19 830	1.3343	ENHS 6-5-2	M 2	0,90	4,1	5,0	1,8	6,4		62-65HRc
HSSE	PN 422993		ENHS 6-5-3		1,15	4,1	3,1	3,1	6,5		63-67HRc
HSS Co5	19 852	1.3243	ENHS 6-5-2-5	M 35	0,92	4,1	5,0	1,9	6,4	4,8	63-67HRc
HSS Co8		1.3247	ENHS 2-10-1-8	M 42	1,10	3,9	9,2	1,2	1,4	7,8	63-68HRc
HSSE-PM			ENHS 6-5-3-8		1,28	4,2	5,0	3,1	6,4	8,5	64-67HRc

Typy fréz

- Typ W

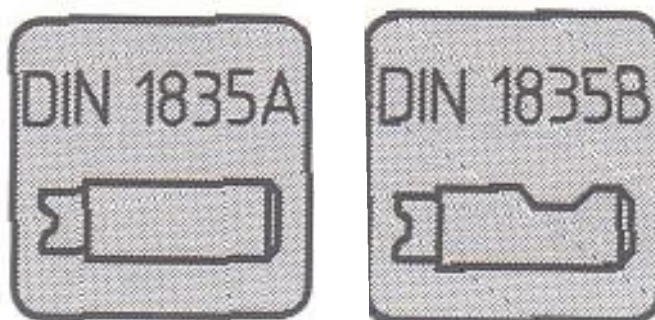
Pro obrábění měkkých materiálů, např. hliníku a neželezných kovů.

- Typ N

Universální použití, vhodné pro materiály do pevnosti 900 MPa.

Způsoby upnutí

- Hladká válcová stopka dle DIN 1835 A
- Válcová stopka s ploškou (Weldon) dle DIN1835 B



Obr. 42 Způsoby upnutí použitých fréz

V tabulce Tab. 11 lze vidět vysvětlení jednotlivých čísel v katalogových listech fréz v řádku použití.

*Tab. 11 Použití fréz*

Skupina	Materiál	Pevnost	Příklad	Skupina	Materiál	Pevnost	Příklad
1.	Automatové a konstrukční oceli	≤ 600MPa	11500 11109	8.	Litina	≤ 240HB	422430
2.	Konstrukční alité oceli	≤ 850MPa	11050 422650	9.	Nerezavějící oceli	≤ 850MPa	17041
3.	Nástrojové oceli nízkolegované	≤ 1100MPa	19662 422865	10.	Slitiny Cr - Ni	≤ 850MPa	17242
4.	Zušlechtěné oceli	≤ 900MPa	16240	11.	Slitiny Cu - Zn, Cu - Sn	≤ 800MPa	423025 423018
5.	Nástrojové oceli vysocolegované	≤ 1100MPa	19436	12.	Hliník, Al - Si slitiny	≤ 500MPa	424254 424203
6.	Nástrojové azušlechtěné oceli	≤ 600MPa	15241 19552	13.	Titan, Slitiny titanu	≤ 1200MPa	DIN 3.7124 DIN 3.7165
7.	Litina	≤ 240HB	422415 422420				

## 9.2 Univerzální frézka FHV – 50 PD

Pro frézování byla použita univerzální frézka s digitálním odměřováním FHV – 50 PD, která má velmi tuhou konstrukci a disponuje chladícím systémem. Stroj je používán pro velký rozsah běžných i přesných operací, lze ho použít jak pro vrtání, tak pro frézování kovových i nekovových dílců. Má vertikální, horizontální, ale i úhlové vřeteno. Stojan s podstavou slouží jako vedení konzoly. Na zadní straně stojanu je hnací mechanismus horizontálního vřetene. Příčný a podélný stůl je umístěn na svisle se pohybující konzole. Regulace posuvu lze vykonat ručně nebo strojně. Frézka se uplatňuje v menších a středních výrobních provozech jako jsou např. nástrojařské a údržbářské dílny.



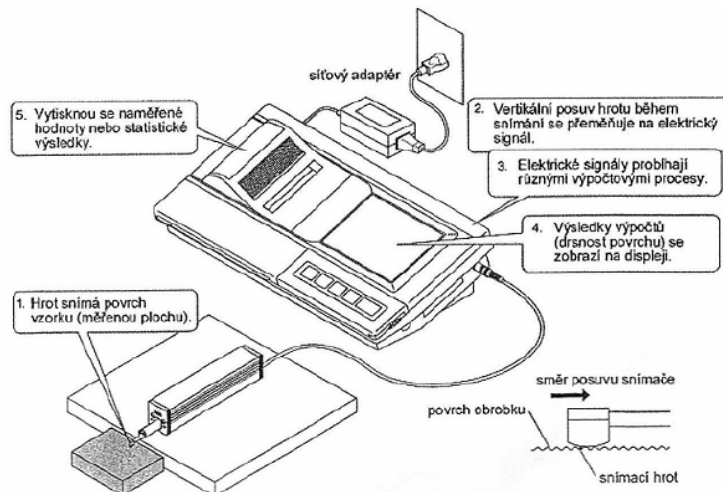
Obr. 43 Frézka FHV – 50 PD

Tab. 12 Technické údaje frézky

Frézka FHV – 50 PD	
Výrobní číslo	2004/018
Rok výroby	2004
Rozměry frézky	1280x1100x1920mm
Hmotnost	700kg
Otáčky vertikál. vřetene	115-1750ot./min
Otáčky horizontál. vřetene	60-1350ot./min
Příkon motoru vertikál.	0,85 - 1,5kW
Příkon motoru horizontál.	1,5kW
Napětí	3/N PE AC/400 V 50Hz
Rozsah rychlosti posuvu	10 - 300mm/min.
Pracovní zdvih v ose Z	300mm

### 9.3 Drsnoměr Mitutoyo SJ – 301

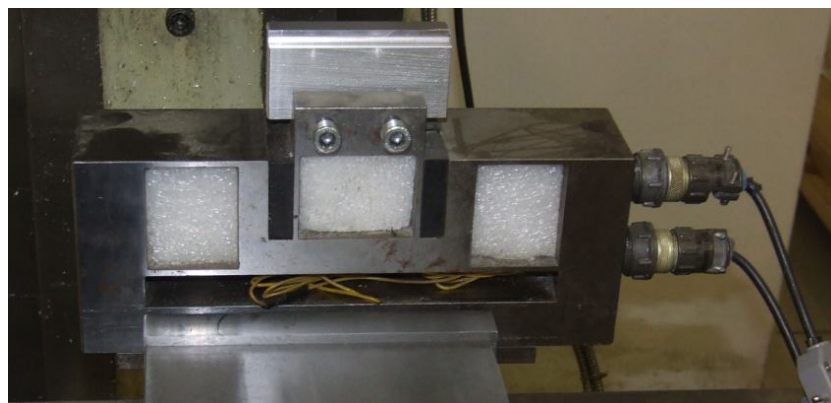
Měření drsnosti povrchu bylo prováděno na přístroji Mitutoyo SJ – 301. Tento měřicí přístroj je určen na měření v dílenském prostředí. Svým snímacím hrotem dokáže měřit strukturu povrchu a charakterizovat ji za pomoci řady parametrů podle různých národních a mezinárodních norem. Výsledky měření se zobrazí digitálně a graficky na speciální na dotek citlivé ovládací obrazovce a pomocí vestavěné tiskárny se vytisknout. Snímací hrot tohoto přístroje zaznamenává i nejjemnější nepravidelnosti povrchu vzorku. Drsnost povrchu se vypočítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu, ke kterému dochází, když snímací hrot přejíždí přes nepravidelnosti povrchu. Poloha snímacího hrotu vůči obrobku musí být zajištěna tak, aby posuv měření byl rovnoběžně s povrchem obrobku. [14]



Obr. 44 Mitutoyo SJ – 301

#### 9.4 Dynamometr s tenzometrickými členy

K měření složek řezných sil byl použit dílenský dynamometr s tenzometrickými členy vyroben v laboratořích školy UTB Tomáše Bati ve Zlíně v roce 2007. Lze měřit síly v ose  $F_x$  a  $F_y$  a s připojením přídatného zařízení taky vibrace nástroje. Maximální možné měřené zatížení je  $F_x = 440 \text{ N}$ ,  $F_y = 1478,48 \text{ N}$ .



Obr. 45 Dynamometr

Po upnutí dynamometru do upínacího zařízení stroje (svěrák, magnetický stůj atd.) je spojen s měřicí aparaturou SPIDER 8 od firmy HOTTINGER BALLDWIN MESSTECHNIK. Spider 8 je osmikanálová měřicí ústředna řízená pomocí osobního počítače přes port tiskárny nebo sběrnici RS 232. Měřicí ústředna je určena pro elektrická měření mechanických veličin (dráha, zrychlení, síla, tlak, teplota) prováděná pomocí odporových tenzometrů, induktivních snímačů a potenciometrů. Všechny kanály ústředny mají svůj vlastní A/D převodník, který je schopen měřit s frekvencí převodu od 1 až do 9600

vzorků/s (od 1 až do 9600 Hz). Software pro vyhodnocení v osobním počítači se jmenuje BEAM SPIDER 8.



Obr. 46 A/D převodník

## 9.5 Měřicí váha

Pro měření hmotnostního opotřebení nástrojů byla použita digitální přesná váha značky Helago AND GF – 200 EC.



Obr. 47 Měřicí váha Helago

Tab. 13 Parametry použité váhy

Měřicí váha Helago AND GF – 200 EC	
Kapacita od	0,02g
Kapacita do	210g
Dílek	0,001g
Přesnost	0,01g
Rozměr misky	128x128mm

## 9.6 Obráběný materiál

Pro samotný experiment byl použit materiál EN AW 5083. Z polotovaru byl připraven obrobek o rozměrech 80,5 x 82 x 40,5 mm (pro zkoušku řezných sil o rozměrech 80,5 x 15 x 40,5 mm).

*EN AW 5083 (slitina AlMg4,5Mn0,7)*

Materiál středně pevný, velmi dobře chemicky odolný, nevytvrzovatelný. Velmi dobrá leštitelnost, velmi dobrá odolnost ke korozi. Svařitelnost vyhovující, svařené spoje jsou korozně odolné téměř jako základní materiál. Obrobitelnost řeznými nástroji je snížena u materiálu v měkkém stavu a vyhovující v tvrdším stavu. Použití na středně namáhané konstrukce, jež mají odolávat korozi a mořské vodě.

*Tab. 14 Materiál EN AW 5083*

Mechanické vlastnosti		
Mez kluzu	[MPa]	100-125
Pevnost v tahu	[MPa]	260-270
Tažnost As	[%]	12
Fyzikální vlastnosti		
Objemová hmotnost	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,66
Modul pružnosti	[GPa]	70
Elektrická vodivost	[m/Ω.mm <sup>2</sup> ]	16-19
Tepelná vodivost	[W/m.K]	110-140

## 10 PODMÍNKY EXPERIMENTU A METODIKA MĚŘENÍ

### 10.1 Řezné podmínky

Při výběru řezných podmínek, jako je řezná rychlost, otáčky vřetene, hloubka řezu, jsem vycházel ze základních vztahů pro tyto podmínky, kde vstupní parametry byly průměr frézky  $d = 12$  mm a rozsah otáček frézky 60-1350 ot./min.

$$\text{Řezná rychlost} \quad v_c = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{1000} [\text{m/min}] \quad (18)$$

$$\text{Posuvová rychlost} \quad v_f = f_z \cdot n \cdot z [\text{mm/min}] \quad (19)$$

$$\text{Aritmetický průměr} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i [\text{mm/min}] \quad (20)$$

$$\text{Směrodatná odchylka} \quad s = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (21)$$

Po výpočtu daných parametrů při maximálních otáčkách frézky byla zjištěna řezná rychlost  $v_c = 50,9$  [m/min]. Doporučené katalogové podmínky firmy ZPS - FN jsou pro daný frézovaný materiál uvedeny v Tab. 15., z čehož vyplývá, že mnou naměřené hodnoty nejsou v doporučeném rozmezí. Tento parametr může ovlivnit kvalitu frézované plochy, kterou výrobce fréz zaručuje při daných optimálních podmínkách.

Tab. 15 Doporučené řezné rychlosti

Obráběný materiál	Pevnost	Příklad	v [m/min]			
			HSS	HSS Co5	HSS Co8	HSSE - PM
Hliník, Al - Si slitiny	≤500MPa	DIN 3.3211 424254	140-240	160-250	160-300	240-450



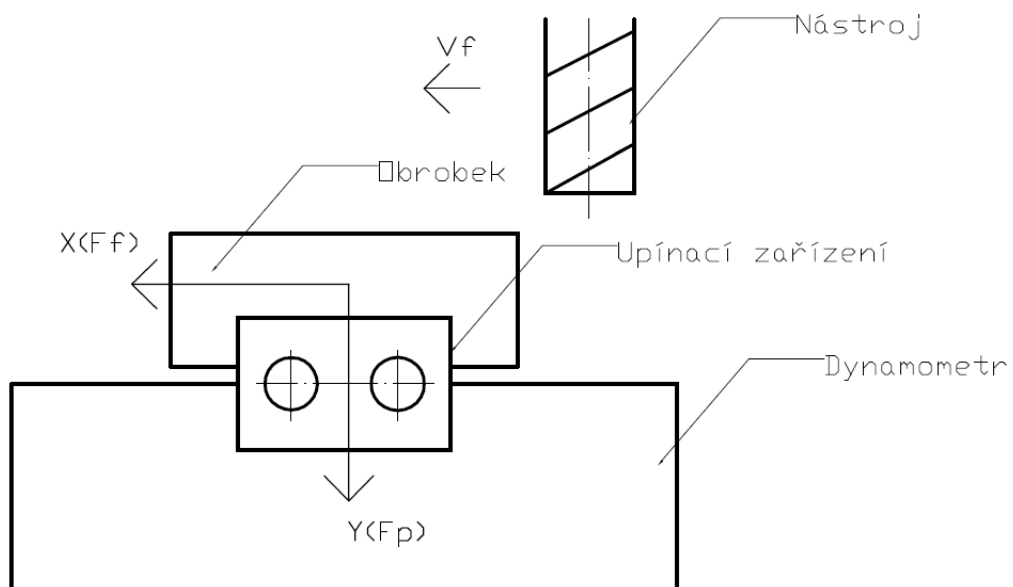
Při výběru posuvu jsem nevycházel z daného vzorce, protože je závislý na počtu zubů frézy. Vlastní měření totiž probíhalo u všech fréz za konstantních řezných podmínek. Po diskusi s Ing. Ondřejem Bílkem, Ph.D. jsme stanovili posuv  $v_f = 100$  [mm/min] a hloubku řezu  $a_p = 6$  mm a  $a_e = 6$  mm. Frézování ve všech měřeních bylo sousledné a chlazení obráběné materiálu nebylo použito.

Tab. 16 Řezné podmínky

axiální hloubka řezu	$a_p$	[mm]	6
radiální hloubka řezu	$a_e$	[mm]	6
otáčky	$n$	[1/mm]	1350
řezná rychlost	$v_c$	[m/min]	50,9
posuvová rychlost	$v_f$	[mm/min]	100

## 10.2 Měření řezných sil

Dílenský dynamometr s tenzometrickými členy byl upnut do svěráku frézky. Předem připravený zkušební materiál byl upnut pomocí dvou šroubů do dynamometru a kabely propojeny s notebookem a A/D převodníkem.



Obr. 48 Měření řezných sil

Po spuštění software BEAM SPIDER 8 v osobním počítači byla nejprve provedena kalibrace a nastavení os  $X(F_f)$  – síla posuvová a  $Y(F_p)$  – síla pasivní. Hodnota zápisu (interval, krok) při mém měření byla nastavena na 0,01 sekundy. Měření bylo provedeno za předem daných konstantních řezných podmínek a všechny jednotlivé frézy byly měřeny 5 krát za

sebou. V softwaru byl vyhodnocen grafický průběh, maximální, minimální hodnoty složek řezných sil.

### 10.3 Měření drsnosti po frézování

Při měření těchto hodnot jsem využíval přístroj (drsnoměr) Mitutoyo SJ – 301. Před samotným měřením bylo nejprve provedeno základní nastavení přístroje, jako je norma měření a výsledné vyhodnocené údaje (v mém případě to byly parametry Ra a Rz). Po nastavení těchto parametrů byla provedena kalibrace podle návodu použití od výrobce na předem přiloženém vzorku, který má parametry drsnosti  $R_a = 3,05 \mu\text{m}$  a  $R_y = 9,9 \mu\text{m}$ .



Obr. 49 Kalibrace drsnoměru

Všechny jednotlivé drsnosti frézy byly měřeny 10krát po různých časových intervalech frézování. Řezné podmínky byly po dobu všech měření konstantní. Po jednotlivém obrábění byl materiál odepnut ze svěráku a následovalo měření boční a vodorovné plochy k fríze. Přístroj vyhodnotil předem nastavené údaje, které byly zapsány do programu Excel, kde byly následně zhodnoceny. Zde vznikla možnost využít výtisk průběhu drsnosti a vlnitosti měřeného materiálu. Po naměření údajů byl materiál upnut znovu do svěráku frézky a měření pokračovalo dál.

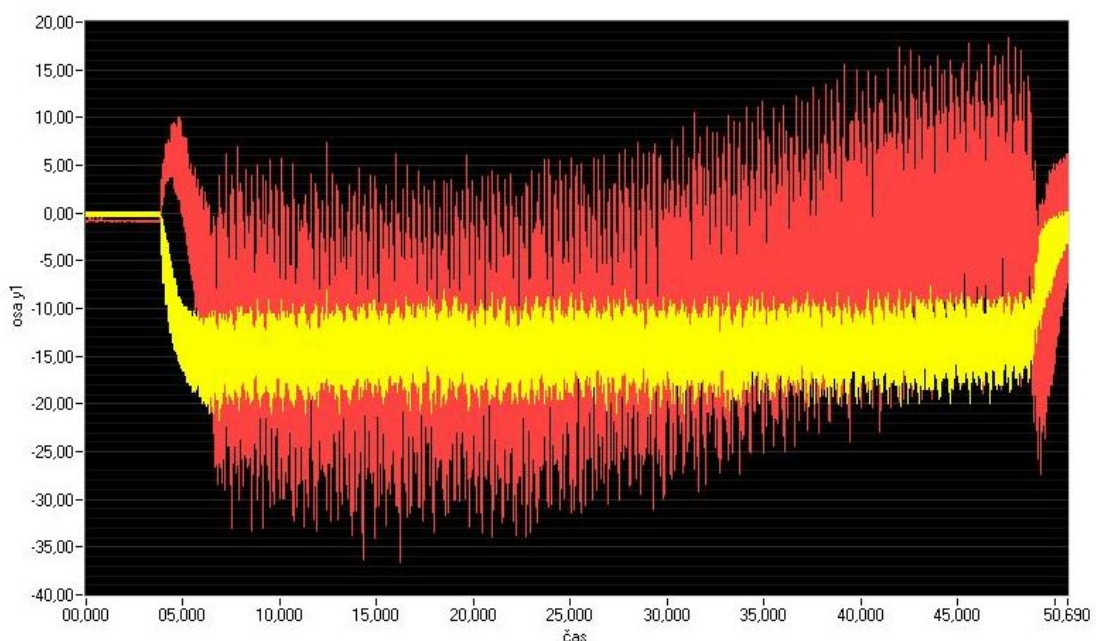
### 10.4 Měření hmotnostního opotřebení nástroje

Měření bylo provedeno na váze Helago AND GF – 200 EC s rozlišitelností 0,001g. Před každým měřením jsem váhu vynuloval, pokud její display neukazoval nulové hodnoty. Vážení probíhalo na začátku experimentu, kdy fréza ještě nebyla použita. Další měření jsem prováděl po různých časových intervalech obrábění a to vždy 5krát a zapsal do programu Excel. Pře samotným vážením byla fréza odepnuta vždy z kleštiny stroje a očištěna stlačeným vzduchem pro větší přesnost měření, kdy by mohlo být měření zkresleno případnými nečistotami na fríze. Po změření hodnot jsem frézu pečlivě upnul do kleštiny frézky a znovu provedl nastavení (vynulování) osy Z.

## 11 NAMĚŘENÉ HODNOTY

### 11.1 Složky řezných sil jednotlivých fréz

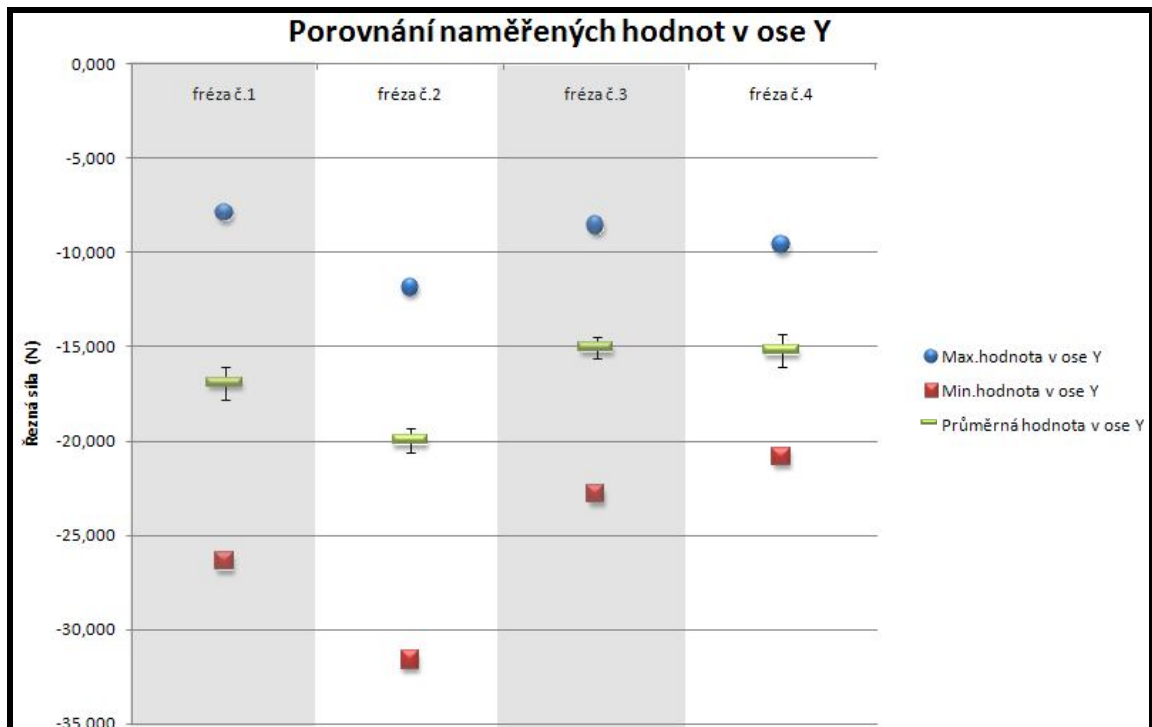
Ze softwaru po měření bylo vyhodnoceno grafické znázornění průběhu řezných sil viz. Obr. 50, kde žlutá složka znázorňuje sílu Y ( $F_p$ ) a červená složka znázorňuje sílu X ( $F_f$ ). Na obrázku lze vidět místa náběhu a výběhu nástroje, které ovlivňují případnou analýzu řezných sil. Protože největší deformace je při maximální síle, vložil jsem záznam z měření vygenerovaný softwarem do programu Microsoft Excel, odstranil části náběhu, výběhu a pomocí funkce maximum a minimum jsem našel tyto hodnoty, které dynamometr zapsal. Těmto maximálním hodnotám sil (mínus znamená, že se jedná o tlakové namáhání) náleží největší deformace a samozřejmě největší opotřebení nástroje. Průměrné hodnoty jednotlivých řezných sil při měření jsem získal pomocí aritmetického průměru z ustáleného stabilizovaného úseku, aby nebyla hodnota zkreslena náběhem a výběhem nástroje.



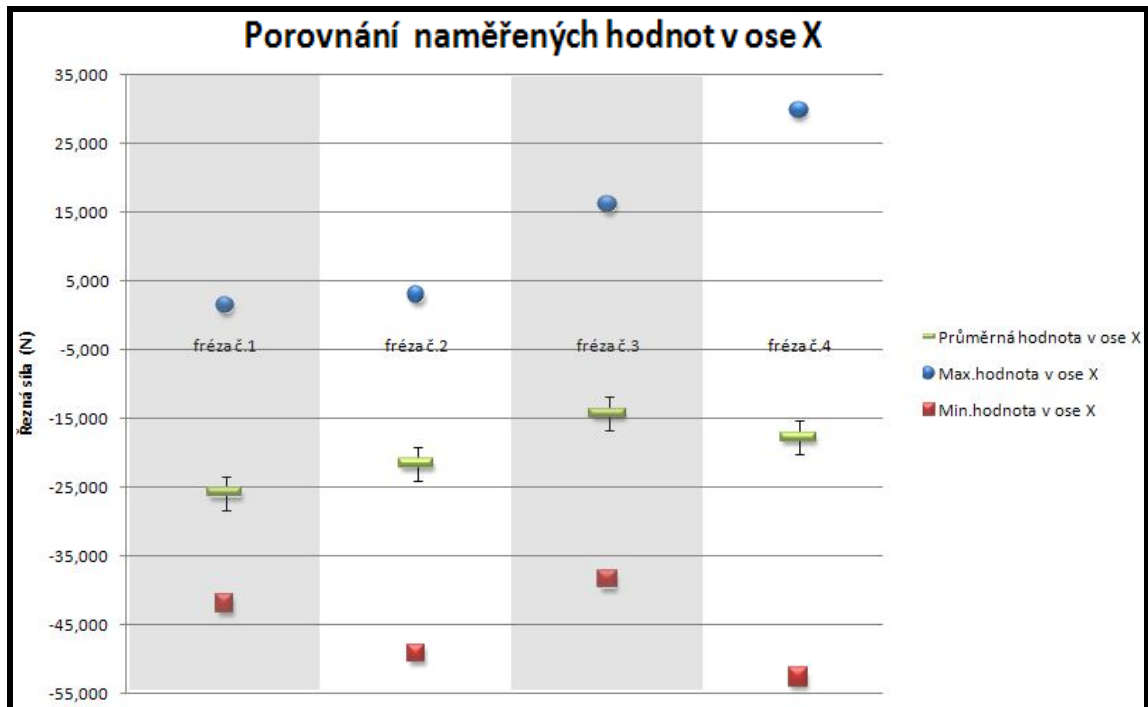
Obr. 50 Grafický průběh řezných sil

Tab. 17 Naměřené řezné síly

Měření	Hodnoty	fréza č.1		fréza č.2		fréza č.3		fréza č.4	
		Osa Y [N]	Osa X [N]	Osa Y [N]	Osa X [N]	Osa Y [N]	Osa X [N]	Osa Y [N]	Osa X [N]
1.	Maximální	-7,682	1,747	-11,864	3,137	-8,794	14,939	-9,164	23,892
	Minimální	-26,947	-42,374	-33,245	-52,618	-23,983	-37,967	-21,390	-50,682
	Průměrná	-17,341	-27,516	-20,679	-21,648	-15,558	-12,489	-15,255	-17,075
2.	Maximální	-7,400	0,835	-12,498	3,631	-9,164	15,921	-9,905	28,246
	Minimální	-26,947	-42,036	-30,799	-49,903	-23,242	-38,984	-20,206	-56,129
	Průměrná	-15,773	-26,938	-19,977	-21,826	-15,383	-15,295	-16,234	-20,503
3.	Maximální	-8,423	0,492	-11,757	2,560	-7,682	17,788	-9,164	24,910
	Minimální	-26,947	-41,019	-31,392	-47,257	-21,019	-36,542	-21,390	-53,635
	Průměrná	-17,916	-23,015	-19,986	-19,506	-14,020	-14,707	-14,740	-16,353
4.	Maximální	-7,340	1,865	-11,757	2,323	-8,126	16,274	-9,491	38,950
	Minimální	-25,465	-40,816	-30,058	-47,321	-23,576	-40,042	-21,019	-53,635
	Průměrná	-16,032	-26,301	-18,799	-21,833	-15,104	-14,131	-13,825	-18,159
5.	Maximální	-8,650	2,323	-11,387	3,154	-9,164	15,753	-10,276	33,541
	Minimální	-25,835	-44,275	-32,874	-48,955	-22,501	-39,327	-20,206	-49,850
	Průměrná	-17,552	-25,547	-20,457	-23,183	-15,190	-15,074	-16,022	-16,999
Průměr		-7,899	1,452	-11,853	2,961	-8,586	16,135	-9,600	29,908
		-26,428	-42,104	-31,674	-49,211	-22,864	-38,572	-20,842	-52,786
		-16,923	-25,863	-19,980	-21,599	-15,051	-14,339	-15,215	-17,818
Směrodatná odchylka		0,538	0,681	0,361	0,466	0,590	0,935	0,434	5,637
		0,646	1,235	1,214	1,977	1,043	1,216	0,537	2,266
		0,857	1,568	0,650	1,183	0,539	1,006	0,878	1,462



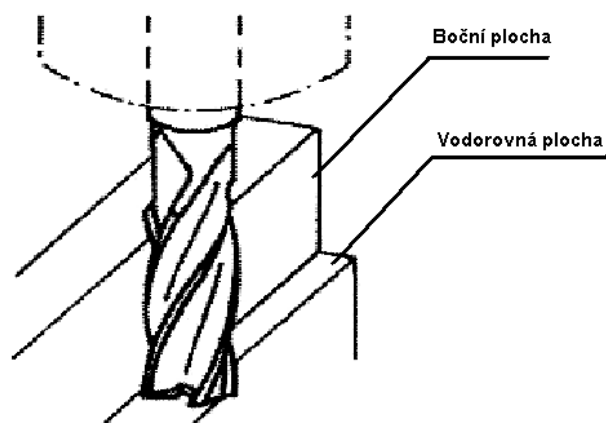
Obr. 51 Porovnání naměřených hodnot v ose Y



Obr. 52 Porovnání naměřených hodnot v ose X

## 11.2 Změna kvality obrobené plochy v závislosti na čase obrábění

Na Obr. 53 lze vidět znázorněné a popsané plochy, u nichž byla měřena drsnost vzniklá po frézování. Parametry drsnosti  $R_a$  a  $R_z$  v Tab. 18, Tab. 19, Tab. 20, Tab. 21 vznikly z aritmetického průměru z pěti hodnot po každém měření. (viz. P I, P II, P III, P IV)



Obr. 53 Schéma měřených ploch

Tab. 18 Drsnost plochy po fréze č. 1

Fréza č.1					
Počet měření	Čas obrábění(s)	vodorovná plocha		boční plocha	
		Ra( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )	Ra( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )
1.	45	1,03	6,42	0,53	1,96
2.	90	0,95	3,66	0,51	1,92
3.	135	0,99	4,28	0,69	2,20
4.	225	1,22	7,75	0,65	4,02
5.	315	1,16	6,61	0,79	3,73
6.	405	1,24	7,17	0,7	4,32
7.	540	1,73	5,47	0,83	4,45
8.	675	1,89	6,57	1,10	4,59
9.	855	2,52	16,66	0,92	5,42
10.	1035	3,17	13,42	1,05	5,64

Tab. 19 Drsnost plochy po fréze č. 2

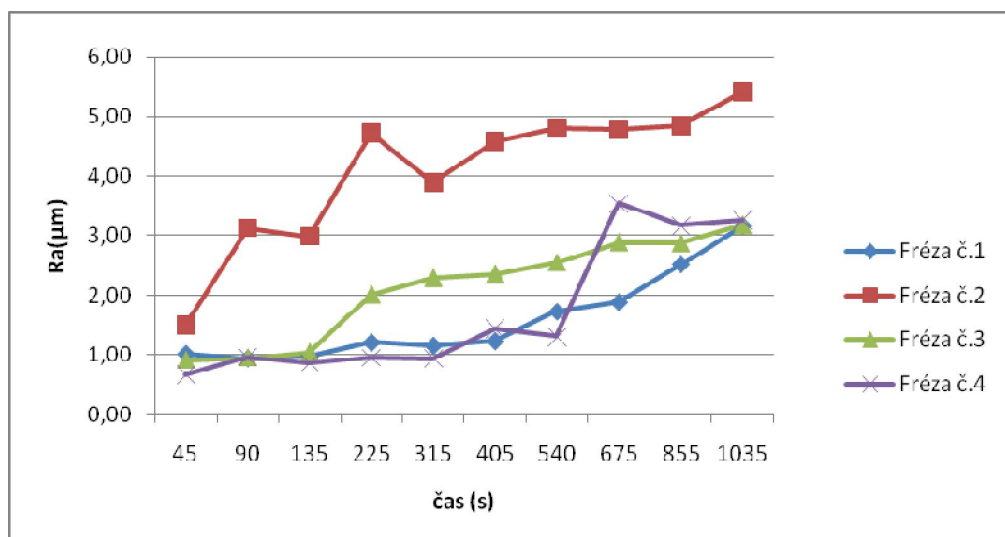
Fréza č.2					
Počet měření	Čas obrábění(s)	vodorovná plocha		boční plocha	
		Ra( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )	Ra( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )
1.	45	1,49	7,77	0,49	2,91
2.	90	3,13	14,96	0,56	3,21
3.	135	2,99	16,50	0,82	4,18
4.	225	4,72	19,64	0,99	4,69
5.	315	3,88	19,64	1,09	4,90
6.	405	4,58	19,62	1,19	5,63
7.	540	4,80	20,62	1,44	6,60
8.	675	4,78	20,38	1,74	7,73
9.	855	4,83	23,90	1,65	7,89
10.	1035	5,41	24,90	2,04	7,95

Tab. 20 Drsnost plochy po fréze č. 3

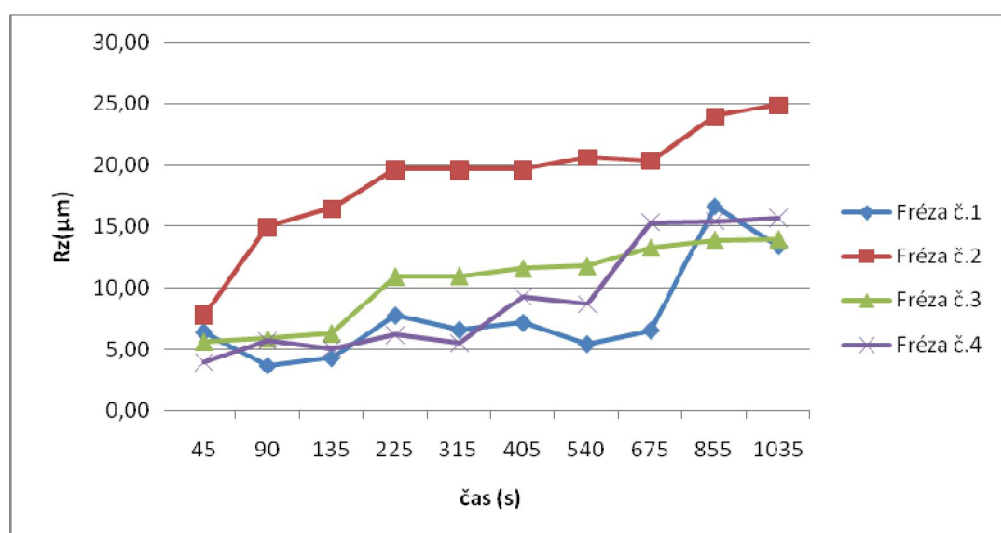
Fréza č.3					
Počet měření	Čas obrábění(s)	vodorovná plocha		boční plocha	
		Ra( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )	Ra( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )
1.	45	0,91	5,67	0,66	3,54
2.	90	0,96	5,93	0,57	2,81
3.	135	1,04	6,35	0,74	3,44
4.	225	2,01	10,93	0,73	3,83
5.	315	2,29	10,97	0,72	4,25
6.	405	2,36	11,56	0,89	4,79
7.	540	2,55	11,77	0,98	4,97
8.	675	2,89	13,29	1,06	6,21
9.	855	2,88	13,94	1,06	4,86
10.	1035	3,18	14,00	1,09	7,07

Tab. 21 Drsnost plochy po fríze č. 4

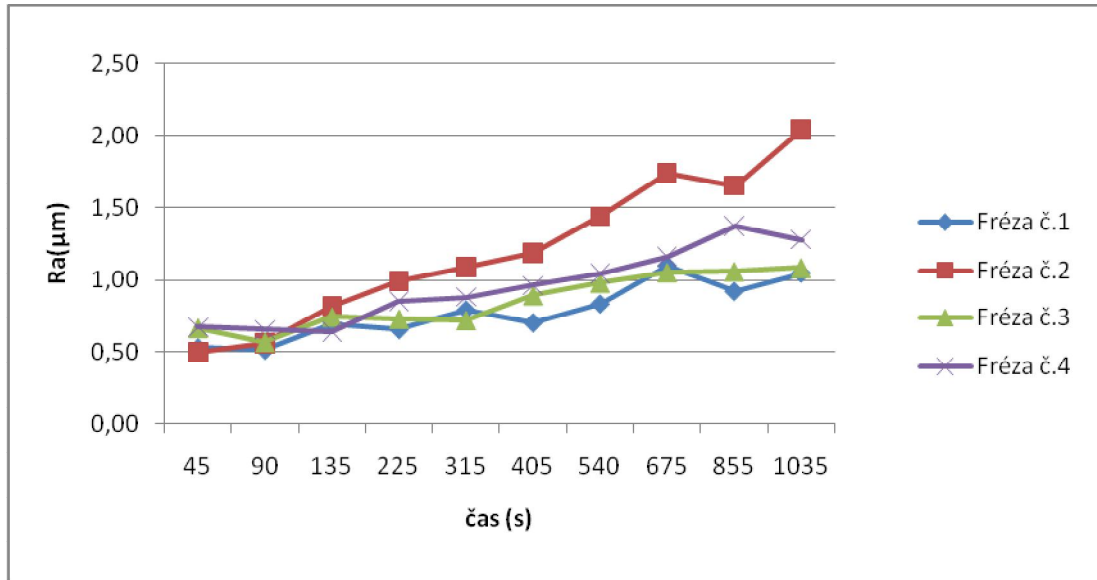
Počet měření	Čas obrábění(s)	Fréza č.4			
		vodorovná plocha		boční plocha	
		Ra( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )	Ra( $\mu\text{m}$ )	Rz( $\mu\text{m}$ )
1.	45	0,67	3,91	0,67	3,51
2.	90	0,97	5,69	0,65	2,96
3.	135	0,88	5,06	0,64	3,21
4.	225	0,97	6,19	0,86	4,43
5.	315	0,95	5,49	0,88	4,60
6.	405	1,44	9,28	0,97	4,73
7.	540	1,31	8,66	1,05	4,87
8.	675	3,55	15,35	1,16	6,06
9.	855	3,17	15,45	1,38	6,35
10.	1035	3,26	15,71	1,28	7,22



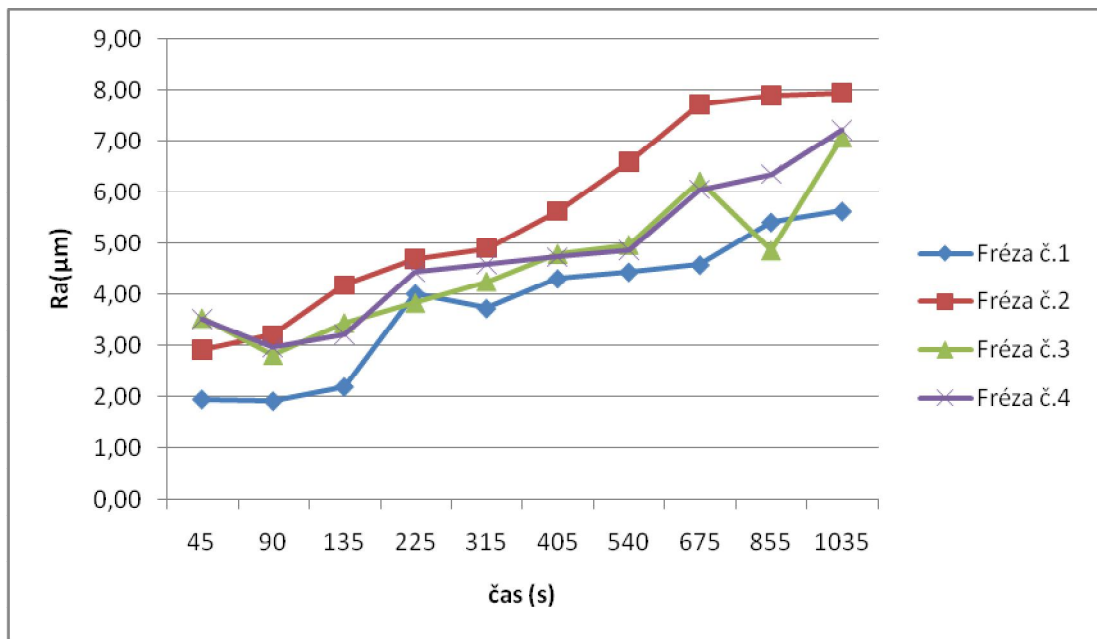
Obr. 54 Závislost parametru drsnosti Ra na čase vodorovné plochy



Obr. 55 Závislost parametru drsnosti Rz na čase vodorovné plochy



Obr. 56 Závislost parametru drsnosti Ra na čase boční plochy



Obr. 57 Závislost parametru drsnosti Rz na čase boční plochy



### 11.3 Analýza hmotnostního opotřebení fréz

Uvedené hmotnostní hodnoty v tabulkách byly vypočítány z aritmetického průměru pěti měření po každém frézování.

Tab. 22 Hmotnostní opotřebení frézy č. 1

Fréza č.1		
Počáteční hmotnost frézy		57,832g
Počet měření	Čas obrábění(s)	Hmotnost frézy (g)
1.	45	57,835
2.	90	57,834
3.	135	57,835
4.	225	57,834
5.	315	57,835
6.	405	57,834
7.	540	57,833
8.	675	57,833
9.	855	57,832
10.	1035	57,833

Tab. 23 Hmotnostní opotřebení frézy č. 2

Fréza č.2		
Počáteční hmotnost frézy		63,056
Počet měření	Čas obrábění(s)	Hmotnost frézy (g)
1.	45	63,055
2.	90	63,055
3.	135	63,056
4.	225	63,057
5.	315	63,056
6.	405	63,056
7.	540	63,054
8.	675	63,054
9.	855	63,057
10.	1035	63,053

Tab. 24 Hmotnostní opotřebení frézy č. 3

Fréza č.3		
Počáteční hmotnost frézy		61,286
Počet měření	Čas obrábění(s)	Hmotnost frézy (g)
1.	45	61,286
2.	90	61,286
3.	135	61,286
4.	225	61,286
5.	315	61,285
6.	405	61,286
7.	540	61,285
8.	675	61,284
9.	855	61,287
10.	1035	61,286

Tab. 25 Hmotnostní opotřebení frézy č. 4

Fréza č.4		
Počáteční hmotnost frézy		60,940
Počet měření	Čas obrábění(s)	Hmotnost frézy (g)
1.	45	60,939
2.	90	60,941
3.	135	60,940
4.	225	60,940
5.	315	60,940
6.	405	60,940
7.	540	60,940
8.	675	60,940
9.	855	60,939
10.	1035	60,940

## 12 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Při měření řezných sil vznikajících při frézování a následném vyhodnocení naměřených dat bylo zjištěno, že maximální síla v ose Y (resp. síla pasivní) byla naměřena u frézy č. 2 v hodnotě - 31,674 N. Znaménko mínus znamená, že na frézovaný materiál působila síla tlaková. Největší průměrná vypočítaná hodnota v ose Y tedy i největší opotřebení a deformace nástroje byla u frézy č. 2. Tyto nevyhovující hodnoty lze odůvodnit při náhledu do katalogového listu nástroje, který uvádí, že fréza není určena pro frézování hliníkového materiálu a nástrojem je možné frézovat jen boční plochy. Nejmenší naměřené hodnoty měla fréza č. 3, kdy její průměrná hodnota řezných sil měla hodnotu - 15,051 N. U vyhodnocení v ose X (resp. síla posuvová) bylo zpracování výsledků obtížnější. Vznikaly síly jak tlakové, tak i tahové. Největší řezné síly byly naměřeny u frézy č. 4 v hodnotách 29,908 N a - 52,786 N. Tyto maximální hodnoty vznikly s největší pravděpodobností tím, že fréza č. 4 měla při porovnání s ostatními nástroji nejmenší úhel čela  $\gamma = 8^\circ$ . U ostatních nástrojů byl úhel čela  $12^\circ$  a  $25^\circ$ . Nejmenší řezné síly v ose X byly zjištěny u frézy č. 1.

Při analýze kvality povrchu obrobené plochy v závislosti na čase obrábění byly zjištěny parametry Ra a Rz bočních a vodorovných ploch. U bočních ploch se parametry nelišily, ale největší hodnoty byly naměřeny na konci frézování u frézy č. 2 (Ra = 2,04  $\mu\text{m}$ , Rz = 7,95  $\mu\text{m}$ ) a nejmenší u frézy č. 1 (Ra = 1,05  $\mu\text{m}$ , Rz = 5,64  $\mu\text{m}$ ). U vodorovných ploch byla zjištěna velká odchylka v parametrech Ra a Rz u frézy č. 2 (Ra = 5,42  $\mu\text{m}$ , Rz = 24,90  $\mu\text{m}$ ), protože fréza není určena pro obrábění vodorovných, ale jen pro frézování bočních ploch. Nejmenší hodnoty byly zjištěny u frézy č. 3 (Ra = 3,18  $\mu\text{m}$ , Rz = 14,00  $\mu\text{m}$ ). Při porovnání závislosti kvality povrchu na čase obrábění lze vidět z Obr. 54, Obr. 55, Obr. 56, Obr. 57, že fréza č. 1 má velmi pozvolný nástup opotřebení nástroje s porovnáním s ostatními nástroji. Z toho můžeme usoudit, že fréza má větší trvanlivost a dokáže obrábět s požadovanými parametry delší pracovní dobu.

Při měření hmotnostního opotřebení, které jsem prováděl po různých časových intervalech, kdy konečný strojní čas všech fréz byl 1035 s, byly zjištěny jen nepatrné odchylky hmotnosti daných fréz k naměřené počáteční hodnotě. Tyto odchylky jsou v řádech tisícín a největší naměřená odchylka byla zjištěna u frézy č. 2, kde hmotnost frézy měla rozmezí od 63,053 g do 63,057 g. Tento rozptyl mohl vzniknout tak, že na povrchu se vytvořily tzv. bodové mikrosvary způsobené vysokou teplotou a tlakovou silou (tzv. adhezní otěr). Odchylky mohly být způsobeny i špatným postupem měření nebo špatným očištěním materiálu.

lu. Před vlastním měřením jsem předpokládal, že hmotnostní opotřebení bude u jednotlivých fréz více viditelné. Na základě toho nelze určit, která fréza má větší trvanlivost. Při prodloužení strojního času až do řádu hodin, frézováním do jiného materiálu nebo obráběním všemi směry, by změny hmotnosti byly více patrné. Práce za těchto podmínek však nemohla být provedena z důvodu finančního a materiálového zabezpečení studentské dílny.

## ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem se zabýval vlivem volby nástroje na parametry řezného procesu. Frézování je třískové obrábění vícebřitým nástrojem - frézou. Používá se pro obrábění rovinných a tvarových ploch. Frézovací nástroje lze rozdělit do několika různých kategorií a jejich volba je důležitá na tvar a kvalitu výsledného obrobku.

Cílem této práce bylo porovnat čtyři druhy čelních válcových fréz vyrobených firmou ZPS – FN, určit, které z těchto nástrojů vyvolají nejmenší řezné síly, vyfrézují nejkvalitnější obrobenou plochu a mají nejmenší opotřebení po určitém čase. Samotný experiment probíhal za předem zvolených konstantních řezných podmínek (Tab. 16). Experimentální část jsem prováděl na dílenské frézce FHV – 50PD. Řezné síly byly měřeny dvousložkovým tenzometrickým dynamometrem, hmotnostní opotřebení bylo určováno na dílenské digitální váze a drsnost obrobené plochy byla hodnocena pomocí drsnoměru.

Hodnoty jednotlivých řezných sil jsem shrnul do přehledných grafů (Obr. 51, Obr. 52). V grafech lze porovnat různé velikosti zatížení jednotlivých fréz. Po vyhodnocení bylo zjištěno, že nejmenší řezné síly v ose Y vznikaly u frézy č. 3 a v ose X u frézy č. 1. Při hodnocení kvality obrobené plochy v závislosti na čase obrábění bylo zjištěno, že nejméně kvalitní plocha vzniká po frézování frézy č. 2 a podle grafů lze určit, že fréza č. 1 má pozvolný nástup opotřebení => větší trvanlivost a dokáže obrábět s požadovanými parametry delší pracovní dobu. Při měření hmotnostního opotřebení nebyly naměřeny výrazné úbytky materiálu, proto nelze zjistit, který z daných materiálů má menší opotřebení, tedy delší trvanlivost.

Při samotném experimentu a hodnocení výsledku bylo možné vidět rozdílné výsledky hodnot jednotlivých fréz, které byly ovlivněny jejich materiálem, použitím, úhlem čela a úhlem šroubovice. Pro tento daný obráběný materiál a za daných řezných podmínek bych volil jako optimálnější a nejehospodárnější frézu č. 1 (Tab. 6). Důvodem je nejlepší jakost povrchu obrobených ploch v porovnání s ostatními nástroji a také nejstabilnější řezný proces.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] HLUCHÝ, M., HANĚK, V. *Strojírenská technologie 2, 2. Díl: Koroze, základy obrábění, výrobní postupy*. Praha. Scienta, spol. s.r.o. 2001. 176 s. ISBN 80-7183-245-6
- [2] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno. Akademické nakladatelství CERM, 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2
- [3] MÁDL, J., BARCAL, J. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha Nakladatelství ČVUT, 2007. 55 s. ISBN 978-80-01-03733-1.
- [4] HUMÁR, A. *Výrobní technologie II*. [online]. *Studijní opory pro bakalářské kombinované studium "Strojírenská technologie"* VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 138 s. Dostupný z WWW: <<http://www.ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory>>.
- [5] ŘASA, J., GABRIEL, V.: *Strojírenská technologie 3, 1. Díl: Metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 2. vydání. Praha: Scientia, 2005. 256 s. ISBN 80-7183-337-1.
- [6] VAŇÁK, A. *Technologie frézování: pracovní listy*. Šumperk : [s.n.], 2007. 34 s. Dostupný z WWW: <[www.sossou-spk.cz/esf/TEC\\_fr.pdf](http://www.sossou-spk.cz/esf/TEC_fr.pdf)>.
- [7] MACHALOVÁ, V. *Režné síly při frézování vláknové vyztužených kompozitu: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 67 s., 4 přílohy.
- [8] ZPS-Frézovací nástroje [online]. 2008 [cit. 2012-02-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.zps-fn.cz/>>.
- [9] ŠVEC, S. *Řezné nástroje*. Praha: Institut těžkého průmyslu, 1966. 138 s.
- [10] *Měření sil, momentu, indikace okamžité polohy*. [online]. [cit. 2012-02-02]. Dostupný z WWW: [http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni\\_mechanika/MERENI\\_SIL.pdf](http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni_mechanika/MERENI_SIL.pdf)
- [11] BRLICA, V. *Technologické aspekty nástrojů pro obrábění dřeva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 50s., 3 přílohy.
- [12] OBR, L. *Vliv geometrie ostří výstružníků neobrábění otvorů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2010. 75s.

- [13] SLANAŘ, V. *Technické kreslení: Pravidla pro tvorbu technických výkresů podle mezinárodních norem*. 2. upravené a doplněné vydání. Písek: J&M, 1999. 156 s. ISBN 80-86154-16-5.
- [14] *Mitutoyo SJ – 301, Přístroj na měření drsnosti povrchu. Návod k použití.*

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLU A ZKRATEK**

$\pi$	Ludolfovo číslo [-]
$D$	Průměr obrobku nebo nástroje [mm]
$n$	Otáčky vřetene [min <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	Úhel hřbetu [°]
$\beta$	Úhel břitu [°]
$\gamma$	Úhel čela [°]
$\delta$	Úhel řezu [°]
$\kappa$	Úhel nastavení hlavního ostří [°]
$\kappa'$	Úhel nastavení vedlejšího ostří [°]
$\varepsilon$	Úhel špičky [°]
$\lambda$	Úhel sklonu hlavního ostří [°]
$v$	Řezná rychlost [m/min]
$F$	Síla [N]
$h$	Hloubka řezu [mm]
$v_f$	Posuvová rychlost [mm/min]
$a_a$	Axiální šířka záběru (hloubka řezu) [mm]
$a_r$	Radiální šířka záběru [mm]
$z$	Počet zubů frézy
HRC	Tvrдость podle Rockwella
$f_z$	Posuv na zub [mm]
$T$	Trvanlivost břitu [min]
$Ra$	Střední aritmetická úchylka profilu [ηm]
$Rz$	Výška nerovností profile z deseti bodů [ηm]
$Ry$	Největší výška nerovností profile [ηm]
$F_c$	Řezná síla [N]



---

$F_f$	Posuvová síla [N]
$F_p$	Pasivní síla [N]
ČSN	Česká technická norma
VUT	Vysoké učení technické
$t$	Čas [N]
$VB$	Opotřebení hřbetu
$C_t$	Konstanta vyjadřující vliv ostatních rezných podmínek [-]

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1</i> Soustava stroj - nástroj – obrobek [1] .....	8
<i>Obr. 2</i> Základní plochy na obrobku .....	9
<i>Obr. 3</i> Soustružnický nůž [1] .....	10
<i>Obr. 4</i> Čelní nástrčná fréza [4] .....	11
<i>Obr. 5</i> Roviny nástroje [2].....	11
<i>Obr. 6</i> Pracovní úhly řezného nástroje [1 ] .....	13
<i>Obr. 7</i> Druhy obráběcích procesů [2].....	14
<i>Obr. 8</i> Cykloida [3].....	15
<i>Obr. 9</i> Schéma frézování [2].....	16
<i>Obr. 10</i> Geometrie břítu frézy [6].....	16
<i>Obr. 11</i> Nesousledné frézování [3] .....	17
<i>Obr. 12</i> Sousledné frézování [3] .....	18
<i>Obr. 13</i> Čelní frézování [3] .....	19
<i>Obr. 14</i> Řezné síly [7] .....	19
<i>Obr. 15</i> Prstencový pružný člen [7] .....	21
<i>Obr. 16</i> Tenzometrické snímače sil [7] .....	21
<i>Obr. 17</i> Magnetostrikční snímače [7] .....	22
<i>Obr. 18</i> Magnetoanizotropní snímač [7].....	22
<i>Obr. 19</i> Způsob výroby fréz [3] .....	23
<i>Obr. 20</i> Tvary vyměnitelných destiček [3].....	23
<i>Obr. 21</i> Kleština [3] .....	24
<i>Obr. 22</i> Frézovací hlava [3] .....	24
<i>Obr. 23</i> Frézovací hlava [3] .....	24
<i>Obr. 24</i> Upínání nástrčných válcových fréz [3] .....	25
<i>Obr. 25</i> Prizmatické vedení [3].....	25
<i>Obr. 26</i> Upnutí obrobku[3] .....	25
<i>Obr. 27</i> Otáčení fréz [3] .....	26
<i>Obr. 28</i> Válcová fréza[3].....	26
<i>Obr. 29</i> Čelní válcová fréza [8] .....	27
<i>Obr. 30</i> Drážkovací fréza [8].....	27
<i>Obr. 31</i> Kotoučová fréza [8].....	27
<i>Obr. 32</i> Úhlová fréza [8].....	28

<i>Obr. 33 Tvarová fréza [4]</i> .....	28
<i>Obr. 34 Tepelné zpracování RO [9]</i> .....	31
<i>Obr. 35 Oblasti rezných podmínek při soustružení běžných ocelí [2]</i> .....	32
<i>Obr. 36 Grafické znázornění Ra [13]</i> .....	35
<i>Obr. 37 Největší výška profilu Rz [13]</i> .....	35
<i>Obr. 38 Závislost <math>VB=f(t)</math> [2]</i> .....	37
<i>Obr. 39 Průběh závislosti <math>VB = f_{(t)}</math> [2]</i> .....	38
<i>Obr. 40 Průběh závislosti <math>T=f(v_c)</math> [2]</i> .....	38
<i>Obr. 41 Kótování rozměrů fréz</i> .....	44
<i>Obr. 42 Způsoby upnutí použitých fréz</i> .....	45
<i>Obr. 43 Frézka FHV – 50 PD</i> .....	47
<i>Obr. 44 Mitutoyo SJ – 301</i> .....	48
<i>Obr. 45 Dynamometr</i> .....	48
<i>Obr. 46 A/D převodník</i> .....	49
<i>Obr. 47 Měřicí váha Helago</i> .....	49
<i>Obr. 48 Měření rezných sil</i> .....	52
<i>Obr. 49 Kalibrace drsnoměru</i> .....	53
<i>Obr. 50 Grafický průběh rezných sil</i> .....	54
<i>Obr. 51 Porovnání naměřených hodnot v ose Y</i> .....	55
<i>Obr. 52 Porovnání naměřených hodnot v ose X</i> .....	56
<i>Obr. 53 Schéma měřených ploch</i> .....	56
<i>Obr. 54 Závislost parametru drsnosti Ra na čase vodorovné plochy</i> .....	58
<i>Obr. 55 Závislost parametru drsnosti Rz na čase vodorovné plochy</i> .....	58
<i>Obr. 56 Závislost parametru drsnosti Ra na čase boční plochy</i> .....	59
<i>Obr. 57 Závislost parametru drsnosti Rz na čase boční plochy</i> .....	59

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Geometrie břitu fréz [6]</i> .....	17
<i>Tab. 2 Rozdělení nástrojové oceli [9]</i> .....	30
<i>Tab. 3 Rozdělení SK [12]</i> .....	32
<i>Tab. 4 Povlaky nástrojů [8]</i> .....	34
<i>Tab. 5 Přehled testovaných nástrojů a jejich označení</i> .....	42
<i>Tab. 6 Katalogový list frézy č. 1</i> .....	42
<i>Tab. 7 Katalogový list frézy č. 2</i> .....	43
<i>Tab. 8 Katalogový list frézy č. 3</i> .....	43
<i>Tab. 9 Katalogový list frézy č. 4</i> .....	43
<i>Tab. 10 Charakteristika ocelí</i> .....	45
<i>Tab. 11 Použití fréz</i> .....	46
<i>Tab. 12 Technické údaje frézky</i> .....	47
<i>Tab. 13 Parametry použité váhy</i> .....	49
<i>Tab. 14 Materiál EN AW 5083</i> .....	50
<i>Tab. 15 Doporučené řezné rychlosti</i> .....	51
<i>Tab. 16 Řezné podmínky</i> .....	52
<i>Tab. 17 Naměřené řezné síly</i> .....	55
<i>Tab. 18 Drsnost plochy po fréze č. 1</i> .....	57
<i>Tab. 19 Drsnost plochy po fréze č. 2</i> .....	57
<i>Tab. 20 Drsnost plochy po fréze č. 3</i> .....	57
<i>Tab. 21 Drsnost plochy po fréze č. 4</i> .....	58
<i>Tab. 22 Hmotnostní opotřebení frézy č. 1</i> .....	60
<i>Tab. 23 Hmotnostní opotřebení frézy č. 2</i> .....	60
<i>Tab. 24 Hmotnostní opotřebení frézy č. 3</i> .....	61
<i>Tab. 25 Hmotnostní opotřebení frézy č. 4</i> .....	61

## SEZNAM PŘÍLOH

- P I NAMĚŘENÉ PARAMETRY DRSNOSTI U FRÉZY Č. 1
- P II NAMĚŘENÉ PARAMETRY DRSNOSTI U FRÉZY Č. 2
- P III NAMĚŘENÉ PARAMETRY DRSNOSTI U FRÉZY Č. 3
- P IV NAMĚŘENÉ PARAMETRY DRSNOSTI U FRÉZY Č. 4

PŘÍLOHA P I: NAMĚŘENÉ PARAMETRY DRSNOSTI U FRÉZY Č. 1

Fréza č.1								
Počet frézování	drsnost kolmé plochy				drsnost rovnoběžné plochy			
1	Ra	1,02	Rz	6,35	Ra	0,46	Rz	1,81
	Ra	1,00	Rz	5,97	Ra	0,49	Rz	1,65
	Ra	1,04	Rz	6,18	Ra	0,63	Rz	2,14
	Ra	1,03	Rz	7,22	Ra	0,50	Rz	2,08
	Ra	1,05	Rz	6,39	Ra	0,55	Rz	2,10
Průměr		1,03		6,42		0,53		1,96
2	Ra	0,63	Rz	3,20	Ra	0,43	Rz	1,58
	Ra	0,93	Rz	3,48	Ra	0,53	Rz	1,82
	Ra	1,03	Rz	3,53	Ra	0,54	Rz	2,26
	Ra	0,93	Rz	3,64	Ra	0,46	Rz	1,61
	Ra	1,21	Rz	4,43	Ra	0,60	Rz	2,34
Průměr		0,95		3,66		0,51		1,92
3	Ra	1,01	Rz	4,52	Ra	0,60	Rz	2,05
	Ra	0,90	Rz	3,90	Ra	0,51	Rz	1,83
	Ra	0,99	Rz	4,39	Ra	0,77	Rz	2,88
	Ra	1,00	Rz	4,40	Ra	1,07	Rz	2,42
	Ra	1,04	Rz	4,21	Ra	0,50	Rz	1,82
Průměr		0,99		4,28		0,69		2,20
4	Ra	1,26	Rz	8,05	Ra	0,78	Rz	4,23
	Ra	1,17	Rz	7,85	Ra	0,46	Rz	2,76
	Ra	0,98	Rz	6,00	Ra	0,66	Rz	4,53
	Ra	1,13	Rz	7,26	Ra	0,59	Rz	4,64
	Ra	1,54	Rz	9,58	Ra	0,78	Rz	3,95
Průměr		1,22		7,75		0,65		4,02
5	Ra	1,21	Rz	5,31	Ra	0,64	Rz	3,49
	Ra	1,15	Rz	7,13	Ra	1,22	Rz	4,05
	Ra	1,21	Rz	7,30	Ra	0,64	Rz	3,55
	Ra	1,11	Rz	6,74	Ra	0,79	Rz	4,20
	Ra	1,14	Rz	6,56	Ra	0,66	Rz	3,38
Průměr		1,16		6,61		0,79		3,73
6	Ra	0,87	Rz	5,30	Ra	0,65	Rz	3,49
	Ra	0,89	Rz	5,48	Ra	0,64	Rz	4,45
	Ra	0,83	Rz	5,17	Ra	0,57	Rz	4,02
	Ra	1,68	Rz	9,03	Ra	0,62	Rz	4,25
	Ra	1,93	Rz	10,87	Ra	1,02	Rz	5,37
Průměr		1,24		7,17		0,7		4,32
7	Ra	2,14	Rz	7,19	Ra	0,83	Rz	4,24
	Ra	2,70	Rz	5,37	Ra	1,02	Rz	5,64
	Ra	1,60	Rz	5,75	Ra	0,99	Rz	4,69
	Ra	1,19	Rz	4,68	Ra	0,64	Rz	3,93
	Ra	1,02	Rz	4,36	Ra	0,68	Rz	3,73
Průměr		1,73		5,47		0,83		4,45
8	Ra	1,90	Rz	6,52	Ra	1,01	Rz	3,70
	Ra	2,01	Rz	6,90	Ra	1,21	Rz	5,74
	Ra	1,84	Rz	6,49	Ra	1,23	Rz	4,89
	Ra	1,92	Rz	6,45	Ra	1,01	Rz	4,40
	Ra	1,79	Rz	6,49	Ra	1,05	Rz	4,20
Průměr		1,89		6,57		1,10		4,59
9	Ra	2,71	Rz	14,93	Ra	0,83	Rz	4,84
	Ra	2,68	Rz	14,09	Ra	0,92	Rz	5,37
	Ra	2,53	Rz	12,29	Ra	1,10	Rz	6,63
	Ra	2,16	Rz	12,73	Ra	1,03	Rz	5,77
	Ra	2,53	Rz	13,06	Ra	0,73	Rz	4,50
Průměr		2,52		16,66		0,92		5,42
10	Ra	3,65	Rz	18,05	Ra	0,78	Rz	4,41
	Ra	3,73	Rz	19,09	Ra	1,05	Rz	6,19
	Ra	2,93	Rz	15,09	Ra	1,46	Rz	7,56
	Ra	2,47	Rz	13,57	Ra	1,01	Rz	5,05
	Ra	3,06	Rz	17,52	Ra	0,95	Rz	4,97
Průměr		3,17		13,42		1,05		5,64

PŘÍLOHA P 2: NAMĚŘENÉ PARAMETRY DRSNOSTI U FRÉZY Č. 2

Fréza č.2								
Počet frézování	drsnost kolmé plochy				drsnost rovnoběžné plochy			
1	Ra	1,50	Rz	7,20	Ra	0,70	Rz	3,55
	Ra	1,50	Rz	7,65	Ra	0,42	Rz	2,10
	Ra	1,35	Rz	7,82	Ra	0,54	Rz	3,55
	Ra	1,56	Rz	7,98	Ra	0,48	Rz	3,52
	Ra	1,56	Rz	8,21	Ra	0,32	Rz	1,83
Průměr		1,49		7,77		0,49		2,91
2	Ra	2,54	Rz	11,72	Ra	0,51	Rz	3,12
	Ra	3,22	Rz	14,69	Ra	0,42	Rz	2,14
	Ra	3,44	Rz	18,53	Ra	0,42	Rz	2,58
	Ra	3,18	Rz	14,96	Ra	0,83	Rz	4,69
	Ra	3,25	Rz	14,91	Ra	0,61	Rz	3,51
Průměr		3,13		14,96		0,56		3,21
3	Ra	1,79	Rz	12,60	Ra	0,71	Rz	4,02
	Ra	2,90	Rz	13,45	Ra	0,83	Rz	4,36
	Ra	2,79	Rz	17,13	Ra	0,78	Rz	3,90
	Ra	4,03	Rz	18,10	Ra	0,81	Rz	4,16
	Ra	3,42	Rz	21,21	Ra	0,95	Rz	4,45
Průměr		2,99		16,50		0,82		4,18
4	Ra	4,58	Rz	18,91	Ra	1,00	Rz	4,60
	Ra	4,73	Rz	19,82	Ra	1,01	Rz	4,90
	Ra	4,67	Rz	19,06	Ra	0,87	Rz	4,08
	Ra	4,80	Rz	21,17	Ra	1,03	Rz	5,23
	Ra	4,80	Rz	19,22	Ra	1,06	Rz	4,65
Průměr		4,72		19,64		0,99		4,69
5	Ra	4,01	Rz	19,41	Ra	1,08	Rz	5,06
	Ra	3,30	Rz	18,53	Ra	1,11	Rz	5,29
	Ra	3,83	Rz	20,15	Ra	1,21	Rz	4,83
	Ra	4,18	Rz	20,52	Ra	0,98	Rz	4,65
	Ra	4,10	Rz	19,57	Ra	1,06	Rz	4,68
Průměr		3,88		19,64		1,09		4,90
6	Ra	3,04	Rz	16,12	Ra	1,19	Rz	5,88
	Ra	3,75	Rz	18,44	Ra	1,31	Rz	5,31
	Ra	5,44	Rz	20,45	Ra	1,16	Rz	5,74
	Ra	5,39	Rz	21,44	Ra	1,20	Rz	5,40
	Ra	5,29	Rz	21,67	Ra	1,08	Rz	5,82
Průměr		4,58		19,62		1,19		5,63
7	Ra	4,23	Rz	18,20	Ra	1,39	Rz	6,52
	Ra	5,13	Rz	20,40	Ra	1,29	Rz	6,04
	Ra	5,60	Rz	21,74	Ra	1,42	Rz	6,63
	Ra	5,02	Rz	23,73	Ra	1,47	Rz	6,35
	Ra	4,00	Rz	19,02	Ra	1,64	Rz	7,45
Průměr		4,80		20,62		1,44		6,60
8	Ra	4,77	Rz	20,44	Ra	1,58	Rz	7,28
	Ra	4,74	Rz	20,87	Ra	1,82	Rz	7,83
	Ra	4,86	Rz	19,83	Ra	1,69	Rz	7,92
	Ra	4,80	Rz	20,39	Ra	1,72	Rz	6,98
	Ra	4,71	Rz	20,35	Ra	1,87	Rz	8,63
Průměr		4,78		20,38		1,74		7,73
9	Ra	4,72	Rz	25,58	Ra	1,70	Rz	8,12
	Ra	4,72	Rz	22,66	Ra	1,53	Rz	6,76
	Ra	5,13	Rz	24,39	Ra	1,65	Rz	8,44
	Ra	4,68	Rz	23,68	Ra	1,73	Rz	8,48
	Ra	4,91	Rz	23,21	Ra	1,65	Rz	7,65
Průměr		4,83		23,90		1,65		7,89
10	Ra	5,74	Rz	26,20	Ra	2,03	Rz	7,76
	Ra	4,73	Rz	22,74	Ra	2,06	Rz	8,02
	Ra	5,42	Rz	26,02	Ra	2,31	Rz	8,81
	Ra	5,43	Rz	24,27	Ra	2,09	Rz	8,21
	Ra	5,74	Rz	25,25	Ra	1,72	Rz	6,96
Průměr		5,41		24,90		2,04		7,95

PŘÍLOHA P 3: NAMĚŘENÉ PARAMETRY DRSNOSTI U FRÉZY Č. 3

Fréza č.3								
Počet frézování	drsnost kolmé plochy				drsnost rovnoběžné plochy			
1	Ra	0,93	Rz	6,02	Ra	0,58	Rz	2,88
	Ra	0,89	Rz	4,96	Ra	0,61	Rz	2,92
	Ra	1,12	Rz	7,19	Ra	0,51	Rz	2,50
	Ra	0,91	Rz	5,58	Ra	0,52	Rz	2,59
	Ra	0,71	Rz	4,58	Ra	0,61	Rz	3,18
Průměr		0,91		5,67		0,57		2,81
2	Ra	2,51	Rz	11,71	Ra	0,74	Rz	3,51
	Ra	2,67	Rz	13,44	Ra	0,85	Rz	4,09
	Ra	1,63	Rz	9,97	Ra	0,83	Rz	3,96
	Ra	1,76	Rz	10,55	Ra	0,60	Rz	2,76
	Ra	1,50	Rz	8,97	Ra	0,69	Rz	2,90
Průměr		2,01		10,93		0,74		3,44
3	Ra	2,76	Rz	12,66	Ra	0,69	Rz	3,89
	Ra	2,08	Rz	10,00	Ra	0,61	Rz	3,10
	Ra	2,28	Rz	11,62	Ra	0,70	Rz	3,59
	Ra	2,34	Rz	11,31	Ra	0,67	Rz	3,57
	Ra	2,32	Rz	12,21	Ra	0,65	Rz	3,53
Průměr		2,36		11,56		0,66		3,54
4	Ra	3,23	Rz	15,23	Ra	1,03	Rz	6,31
	Ra	3,12	Rz	13,68	Ra	1,04	Rz	6,03
	Ra	2,98	Rz	13,80	Ra	1,12	Rz	7,31
	Ra	3,49	Rz	13,23	Ra	1,08	Rz	6,10
	Ra	3,09	Rz	14,05	Ra	1,01	Rz	5,31
Průměr		3,18		14,00		1,06		6,21
5	Ra	2,38	Rz	11,48	Ra	0,67	Rz	3,91
	Ra	3,18	Rz	13,57	Ra	0,54	Rz	3,13
	Ra	2,12	Rz	10,06	Ra	0,71	Rz	3,47
	Ra	1,99	Rz	9,22	Ra	0,89	Rz	4,34
	Ra	1,77	Rz	10,54	Ra	0,83	Rz	4,32
Průměr		2,29		10,97		0,73		3,83
6	Ra	3,08	Rz	16,50	Ra	1,14	Rz	4,60
	Ra	2,59	Rz	13,52	Ra	1,09	Rz	4,85
	Ra	3,25	Rz	11,10	Ra	1,11	Rz	4,92
	Ra	2,36	Rz	10,40	Ra	0,93	Rz	5,21
	Ra	3,19	Rz	14,93	Ra	1,04	Rz	4,72
Průměr		2,89		13,29		1,06		4,86
7	Ra	3,29	Rz	15,51	Ra	0,62	Rz	4,33
	Ra	3,23	Rz	14,44	Ra	0,68	Rz	4,11
	Ra	3,21	Rz	17,24	Ra	0,69	Rz	4,25
	Ra	2,22	Rz	11,07	Ra	0,86	Rz	4,16
	Ra	2,46	Rz	11,44	Ra	0,74	Rz	4,41
Průměr		2,88		13,94		0,72		4,25
8	Ra	1,17	Rz	6,60	Ra	0,81	Rz	4,56
	Ra	1,04	Rz	6,69	Ra	0,93	Rz	4,96
	Ra	0,88	Rz	5,13	Ra	1,10	Rz	4,99
	Ra	0,66	Rz	4,76	Ra	0,95	Rz	4,89
	Ra	1,03	Rz	6,46	Ra	1,12	Rz	5,46
Průměr		0,96		5,93		0,98		4,97
9	Ra	0,93	Rz	5,86	Ra	0,75	Rz	5,37
	Ra	0,80	Rz	4,97	Ra	1,31	Rz	7,82
	Ra	1,25	Rz	8,89	Ra	1,10	Rz	7,14
	Ra	1,16	Rz	6,34	Ra	1,12	Rz	7,89
	Ra	1,08	Rz	5,68	Ra	1,16	Rz	7,14
Průměr		1,04		6,35		1,09		7,07
10	Ra	2,46	Rz	11,78	Ra	0,77	Rz	4,09
	Ra	2,08	Rz	11,22	Ra	0,89	Rz	4,42
	Ra	2,91	Rz	12,01	Ra	1,06	Rz	6,01
	Ra	2,91	Rz	12,28	Ra	0,98	Rz	5,46
	Ra	2,39	Rz	11,56	Ra	0,77	Rz	3,99
Průměr		2,55		11,77		0,89		4,79



PŘÍLOHA P 4: NAMĚŘENÉ PARAMETRY DRSNOSTI U FRÉZY Č. 4

Fréza č.4								
Počet frézování	drsnost kolmé plochy				drsnost rovnoběžné plochy			
1	Ra	0,53	Rz	3,33	Ra	0,62	Rz	2,82
	Ra	0,53	Rz	4,08	Ra	0,71	Rz	3,01
	Ra	0,83	Rz	4,24	Ra	0,60	Rz	2,72
	Ra	0,54	Rz	3,57	Ra	0,69	Rz	3,02
	Ra	0,93	Rz	4,31	Ra	0,65	Rz	3,23
Průměr		0,67		3,91		0,65		2,96
2	Ra	1,40	Rz	9,59	Ra	0,84	Rz	3,98
	Ra	1,30	Rz	7,75	Ra	0,53	Rz	2,39
	Ra	1,61	Rz	10,18	Ra	0,49	Rz	3,07
	Ra	1,45	Rz	9,82	Ra	0,58	Rz	3,28
	Ra	1,46	Rz	9,07	Ra	0,76	Rz	3,34
Průměr		1,44		9,28		0,64		3,21
3	Ra	1,59	Rz	8,97	Ra	1,62	Rz	7,07
	Ra	1,59	Rz	10,92	Ra	1,50	Rz	7,55
	Ra	1,36	Rz	8,55	Ra	1,10	Rz	5,13
	Ra	1,00	Rz	7,75	Ra	1,38	Rz	6,65
	Ra	1,03	Rz	7,13	Ra	1,29	Rz	5,36
Průměr		1,31		8,66		1,38		6,35
4	Ra	0,98	Rz	6,18	Ra	1,21	Rz	6,18
	Ra	1,06	Rz	5,73	Ra	0,88	Rz	4,58
	Ra	0,98	Rz	5,50	Ra	0,70	Rz	3,26
	Ra	0,78	Rz	4,74	Ra	1,29	Rz	5,78
	Ra	1,06	Rz	6,31	Ra	0,75	Rz	3,84
Průměr		0,97		5,69		0,97		4,73
5	Ra	0,98	Rz	5,71	Ra	0,65	Rz	3,58
	Ra	0,99	Rz	5,58	Ra	0,77	Rz	3,37
	Ra	0,89	Rz	5,09	Ra	0,94	Rz	5,16
	Ra	0,77	Rz	4,31	Ra	1,10	Rz	5,19
	Ra	0,75	Rz	4,61	Ra	0,82	Rz	4,85
Průměr		0,88		5,06		0,86		4,43
6	Ra	0,98	Rz	6,78	Ra	1,37	Rz	7,62
	Ra	1,07	Rz	6,68	Ra	1,16	Rz	6,68
	Ra	1,01	Rz	7,13	Ra	1,30	Rz	6,91
	Ra	0,92	Rz	5,53	Ra	1,41	Rz	7,62
	Ra	0,85	Rz	4,84	Ra	1,18	Rz	7,28
Průměr		0,97		6,19		1,28		7,22
7	Ra	1,05	Rz	5,73	Ra	0,73	Rz	3,82
	Ra	0,94	Rz	5,36	Ra	0,58	Rz	3,32
	Ra	0,89	Rz	4,84	Ra	0,75	Rz	3,39
	Ra	0,89	Rz	5,72	Ra	0,76	Rz	4,06
	Ra	0,97	Rz	5,82	Ra	0,54	Rz	2,98
Průměr		0,95		5,49		0,67		3,51
8	Ra	3,05	Rz	14,03	Ra	1,55	Rz	8,69
	Ra	3,43	Rz	16,30	Ra	1,11	Rz	6,22
	Ra	3,88	Rz	17,06	Ra	1,19	Rz	5,22
	Ra	3,69	Rz	14,79	Ra	1,04	Rz	4,99
	Ra	3,68	Rz	14,57	Ra	0,92	Rz	5,16
Průměr		3,55		15,35		1,16		6,06
9	Ra	2,92	Rz	15,95	Ra	0,57	Rz	3,88
	Ra	3,28	Rz	16,25	Ra	0,81	Rz	4,28
	Ra	2,32	Rz	15,58	Ra	0,97	Rz	4,46
	Ra	3,62	Rz	14,51	Ra	1,05	Rz	5,24
	Ra	3,72	Rz	14,96	Ra	1,02	Rz	5,13
Průměr		3,17		15,45		0,88		4,60
10	Ra	3,24	Rz	16,15	Ra	0,94	Rz	4,74
	Ra	3,07	Rz	15,07	Ra	1,07	Rz	4,73
	Ra	3,14	Rz	13,38	Ra	1,25	Rz	5,21
	Ra	3,40	Rz	16,72	Ra	0,74	Rz	4,35
	Ra	3,45	Rz	17,24	Ra	1,23	Rz	5,30
Průměr		3,26		15,71		1,05		4,87