

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A  
METROLOGIE

---

EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PARAMETRŮ ŘEZNÉHO  
PROCESU

EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF PARAMETERS OF THE CUTTING  
PROCESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

ALEKSEY SENKO

PRAHA 2014

Vysoká škola: ČVUT v Praze  
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Fakulta: strojní  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro **Alekseye Senka**

obor **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

Název: **Experimentální měření parametrů řezného procesu**

Název anglicky: **Experimental measurements of parameters of the cutting process**

### Zásady pro vypracování:

1. Parametry řezného procesu a jejich význam.
2. Možnosti experimentálního měření.
3. Monitoring řezného procesu pro různé nástroje.
4. Zhodnocení a závěr.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

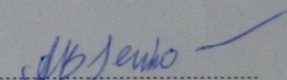
Datum zadání bakalářské práce: 31. 10. 2014

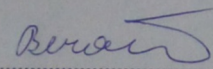
Termín odevzdání bakalářské práce: 18. 12. 2014

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

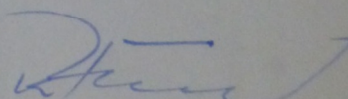
*Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.*

Zadání bakalářské práce převzal dne: 06. 11. 14

  
Diplomant

  
Vedoucí ústavu



  
Děkan

V Praze

dne 16. 10. 2014

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou (bakalářskou) práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

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

V Praze dne .....

.....

podpis

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat Ing. Vítěslavu Rázkovi, CSc., který byl vedoucím mé bakalářské práce, za vedení, rady v oblasti strojírenské technologie a vynaložený čas. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D., který byl konzultantem pro teoretickou část bakalářské práce a za jeho poskytnuté informace.

## OBSAH

<b>Prohlášení</b> .....	4
<b>Poděkování</b> .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Úvod</b> .....	8
<b>Popis technologií obrábění na principu řezání</b> .....	9
Soustružení.....	9
Frézování .....	10
Vrtání .....	13
<b>Parametry řezného procesu</b> .....	15
Geometrie soustružnického nože.....	15
Řezné podmínky pro soustružení.....	16
Řezné síly při soustružení.....	17
Geometrie břitů fréz.....	19
Řezné podmínky pro frézování.....	20
Řezná síla při frézování .....	22
Geometrie vrtáku .....	22
Řezné podmínky pro vrtání.....	24
Řezná síla při vrtání .....	25
<b>Možnosti experimentálního měření</b> .....	26
Měření opotřebení řezného nástroje .....	26
Formy opotřebení.....	27
Kritéria opotřebení.....	27
Měření opotřebení.....	27
Měření teploty řezného nástroje .....	29
Tepelná bilance řezného procesu.....	29
Měření teploty řezného nástroje .....	30
Měření složek síly řezání .....	35
Nepřímé měření složek síly .....	35
Přímé měření složek síly.....	35
<b>Monitoring řezného procesu pro různé nástroje</b> .....	40

Podstata a účel měření .....	40
Tvoření třísky.....	40
Použité stroje, nástroje a zařízení .....	42
Obrobek .....	46
Řezné podmínky .....	47
Výpočet řezné síly pomoci nepřímých metod měření: .....	47
Příprava obrobku k měření .....	48
Nastavení v programu Dynoware .....	51
Průběh měření .....	52
Zpracování a vyhodnocení výsledků měření .....	52
Výpočet složek řezné síly .....	58
<b>Závěr</b> .....	61
<b>Seznam použité literatury</b> .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## Úvod

Řezný proces je základní částí technologie obrábění. Odebíráním materiálu metodou řezání, obrobek dostává potřebný tvar a technologickou funkčnost, ale rovněž mohou být ovlivněny i jeho fyzikální vlastnosti. Účinky vzniklé v procesu řezání - teplota, plastická deformace a další účinky mohou negativně působit jak na materiál obrobku, tak i na materiál řezného nástroje. Na obrobku se takové účinky mohou projevit zhoršením kvality povrchu, změnou tvrdosti na povrchu a dalšími nežadoucími následky, kdy se u nástroje těmito účinky může snížit jeho trvanlivost a řezivost.

Pro lepší možnosti kontroly řezného procesu a předpovědi působících účinků se provádějí experimentální měření. Například, při návrhu nového tvaru nástroje, nebo při použití nových konstrukčních elementů se rozhoduje, jaký nový tvar a konstrukce mohou ovlivnit řezné síly, povrch obrobku, vznik chvění na obrobku nebo nástroji. Stejně se experimentální měření provádějí u nových druhů materiálů, které bude potřeba obrábět pomocí určitých technologií řezání, a to pro zjištění optimálních podmínek pro výrobu více kusů výrobku.

Postupem času byly vyvinuty způsoby a postupy měření, které umožňují efektivně zjistit všechny kritické parametry a ohodnotit je velice názorným a pohodlným způsobem pro porovnání. Takové postupy budou objasněny v této práci s praktickou ukázkou na konkrétním příkladě.



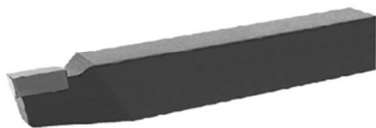
## Popis technologie obrábění na principu řezání

Existují různé druhy technologií obrábění, používajících řezný proces. Mezi nejrozšířenější patří: soustružení, frézování a vrtání. Každá z těchto technologií bude mít řadu kritických parametrů, které ovlivňují průběh obrábění a kvalitu konečného výsledku.

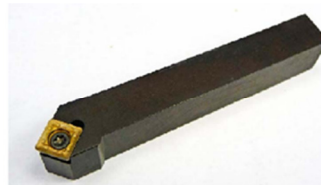
### Soustružení

Soustružení je metoda třískového obrábění pro výrobu součástí především rotačních tvarů. Tento způsob obrábění je jednoduchý a používá se velmi často. Na klasických soustruzích se stále provádí až 40 % veškerých prací.

Úběr materiálu se provádí zejména jednobřitovým nástrojem, který se nazývá soustružnický nůž. Takový nůž má obvykle tělo, za které se upíná na soustruhu, s řeznou částí a definovanou geometrií. Při soustružení dochází k odřezávání přebytečné vrstvy, která se nazývá přídávkem na obrábění. Tato vrstva je oddělena od obrobku v podobě třísky. Činná část nástroje přitom musí mít klínový břit, který je mnohem tvrdší než obráběný materiál, aby došlo k oddělení třísky.



Obr. 1.1 Soustružnický nůž ubírací s pájenou destičkou



Obr. 1.2 Soustružnický nůž s výměnitelnou břitovou destičkou

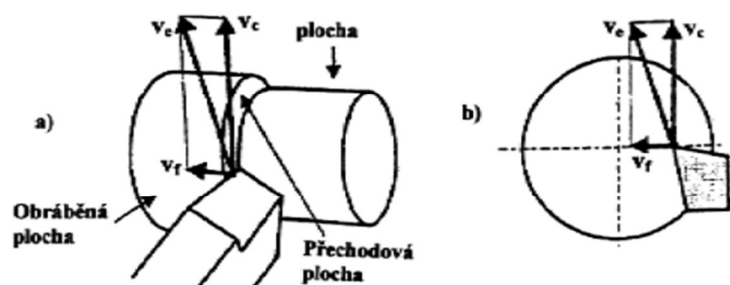
V procesu obrábění obrobek postupně získává požadovaný tvar, rozměr, drsnost povrchu a některé mechanické vlastnosti. Aby výrobek odpovídal všem požadavkům a jeho výroba byla co nejméně náročná z ekonomického hlediska, musejí se pro konkrétní výrobu stanovit a dodržovat určité řezné podmínky.

U soustružení se hovoří o třech druzích řezných pohybů:

*Hlavní řezný pohyb ( $v_c$ )* je rotační a otáčí se obrobkem. V průběhu tohoto pohybu dochází k odřezávání třísky z povrchu obrobku prostřednictvím soustružnického nože.

*Posuvový pohyb ( $v_f$ )* je obvykle přímočarý pohyb vykonávaný nástrojem podél délky obráběné plochy. Je nutný pro zachování odřezávání požadovaného průřezu třísky soustružnickým nožem.

Pro výrobu některých složitějších tvarů je potřeba zachovat *výsledný řezný pohyb ( $v_e$ )*. Takový pohyb může mít tvar šroubovice, posouvá-li se nůž ve směru osy rotace obrobku (axiálně) a hovoří se o podélném obrábění nebo tvaru Archimedovy spirály. Posouvá-li se nůž ve směru kolmém k ose rotace obrobku (radiálně), hovoří se o přímém nebo čelním soustružení.



Obr. 2 Druhy soustružení a) podélné soustružení, b) čelní soustružení

## Frézování

Frézování je metodou obrábění, která se používá pro obrábění hranolovitých, tvarových a rotačních ploch, rovněž pro výrobu drážek, závitů a ozubení na obrobku.

Úběr materiálu se provádí břity rotujícího nástroje, který se nazývá fréza.



Obr. 3 Čelní hrubovací fréza

*Hlavní řezný pohyb* ( $v_c$ ) je rotační a vykonává se nástrojem.

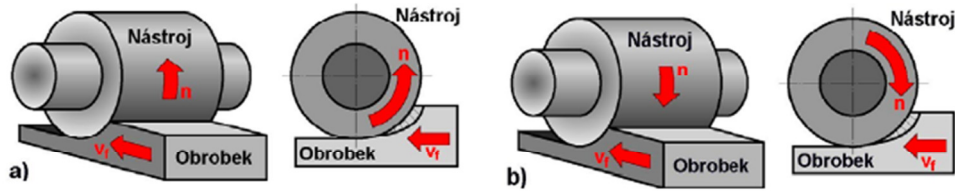
*Vedlejší pohyb* ( $v_f$ ) je obvykle přímočarý a provádí se obrobkem.

Posuvy u moderních strojů jsou plynule měnitelné a mohou se provádět ve více směrech zároveň. Každý břit nástroje odřezává krátké třísky různé tloušťky a proto je řezný proces přerušovaný.

Podle polohy osy nástroje k ploše obrábění je frézování rozlišované na:

- Válcové
- Čelní
- Okružní
- Planetové

Pro válcové frézování platí, že se provádí obvodem nástroje, kdy je osa nástroje rovnoběžná s obráběnou plochou. Zuby válcové frézy jsou uspořádané po obvodu nástroje. Hloubka řezu se nastavuje v rovině kolmé na osu frézy a na směr posuvu. Obroběná plocha a osa otáčení nástroje jsou rovnoběžné.



Obr. 4 Válcové frézování a) nesousledné, b) sousledné

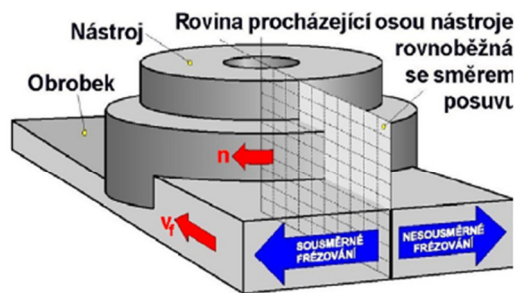
Dle smyslu otáčení nástroje se rozlišují dva druhy válcového frézování:

- Nesousledné
- Sousledné

Pro nesousledné frézování platí, že ostří rotujícího nástroje se pohybuje v místě styku proti směru posuvu obrobku. Tloušťka třísky se mění od minimální hodnoty na maximální. Tříška se odděluje v okamžiku, kdy tloušťka odřezávané vrstvy dosáhne určité velikosti, a to z důvodu, že ostřím frézy nemůže být ostrá hrana, ale plocha o poloměru 8 - 30  $\mu\text{m}$ . Síly a **deformace**, které vznikají při nesousledném frézování zvyšují opotřebení břitu.

Pro sousledném frézování platí, že ostří rotujícího nástroje se pohybuje v místě styku ve směru posuvu obrobku. Tloušťka třísky se mění od maximální hodnoty na minimální. K provádění sousledného frézování je nutné přizpůsobit stroj tak, že se vymezi vůle a předpětí mezi posuvovým šroubem a maticí stolu. V případě, kdy tato podmínka není splněna, může dojít k poškození stroje a nástroje.

Pro čelní frézování platí, že se provádí čelem nástroje, kdy osa nástroje je kolmá na obráběnou plochu. Hloubka řezu se nastavuje ve směru osy nástroje. Obvyklý nástroj pro čelní frézování má břity na obvodu a na čele frézy.

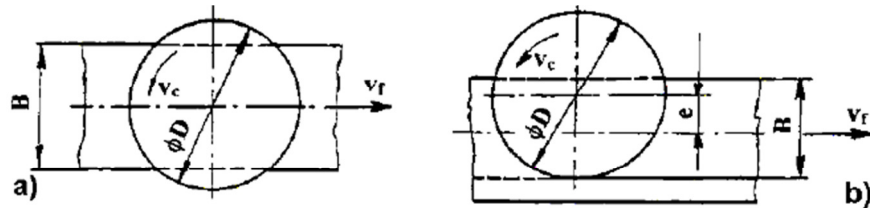


Obr. 4 Čelní frézování

Existují dvě základní metody čelního frézování:

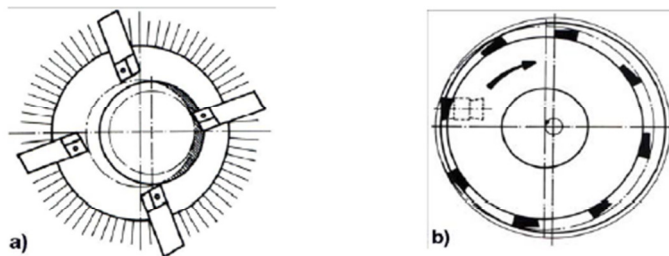
- Symetrické
- Nesymetrické

Při symetrickém frézování osa nástroje prochází středem frézované plochy, když při nesymetrickém frézování osa nástroje je mimo střed frézované plochy.



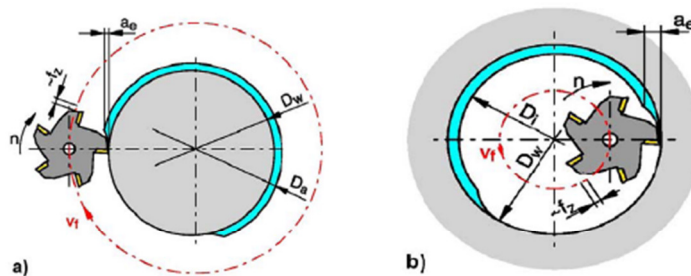
Obr. 4.1 Čelní frézování a) symetrické, b) nesymetrické

Pro okružní frézování platí, že se provádí obvodem rotáčního nástroje na obrobku, který je rovněž rotáčního tvaru, kdy osy nástroje a obrobku jsou vzájemně skloněné. Hloubka řezu se nastavuje ve směru kolmém na osu obrobku. Tímto druhem frézování lze obrábět vnější a vnitřní válcové plochy.



Obr. 5 Okružní frézování a) vnější, b) vnitřní

Pro planetové frézování platí, že se provádí obvodem rotáčního nástroje, který se pohybuje po traektorii, odpovídající rotáčnímu tvaru obrobku, kdy osy nástroje a obrobku jsou rovnoběžné. Tento druh frézování slouží pro obrábění vnějších a vnitřních válcových ploch.



Obr. 6 Planetové frézování a) vnější, b) vnitřní

## Vrtání

Vrtání je obráběcí metoda, sloužící vyhotovení otvorů do plného materiálu nebo pro zvětšení předpracovaných děr.

K úběru materiálu se používá nástroj - vrták.



Obr. 7.1 Šroubovitý vrták



Obr. 7.2 Kopinatý vrták

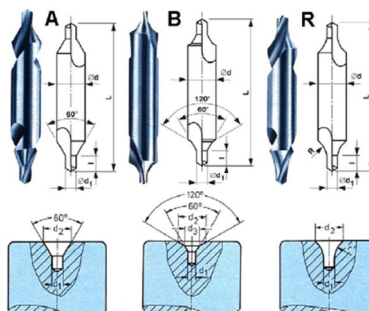
*Hlavní pohyb* ( $v_c$ ) je rotační a vykonává se nástrojem. Jenom ve výjimečných případech je hlavní pohyb vykonáván obrobkem.

*Vedlejší pohyb* ( $v_f$ ) je přímočarý a vykonává se nástrojem ve směru jeho osy. Osa vrtáku při samotném obrábění je ve více případech kolmá k obráběné ploše.

Při použití technologií vrtání je důležité, zda jde o díru průchozí nebo neprůchozí. Průchozí díra se obrábí snadněji, než díra neprůchozí. To je z důvodu, že u neprůchozích děr je potřeba dbát na druh zakončení díry, zabezpečení přesné hloubky vrtání, nutnost odřezávání třísky na dně díry a další parametry.

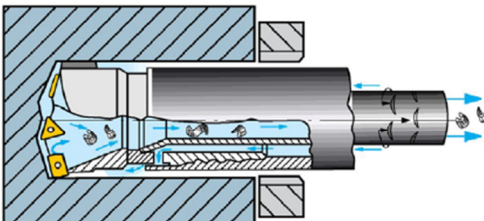
U technologie vrtání dochází k rozdělení na:

- Navrtávání děr středícím vrtákem do plného materiálu.

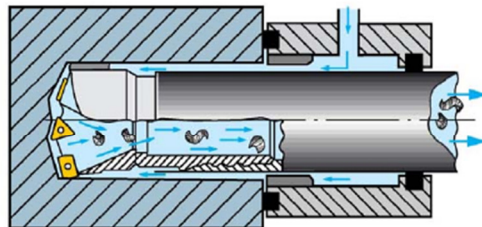


Obr. 7.3 Středící vrtáky

- Vrtání krátkých děr: poměr  $D/L = 1/5 \div 1/10$ , kde D je průměr díry a L je délka díry. Pro vrtání krátkých děr do plného materiálu se používají vrtáky kopinaté, šroubovité, s výměnitelnými špičkami a výměnitelnými břitovými destičkami.
- Vrtání děr do předpracovaných otvorů.
- Vrtání hlubokých děr: poměr  $L/D > 1/10$ . Pro vrtání hlubokých děr do plného a předpracovaného materiálu se používají vrtáky dělové, BTA, ejektorové.



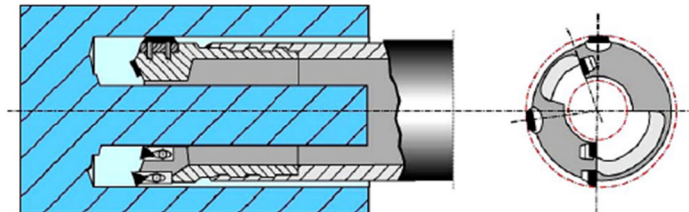
Obr. 8.1 Princip ejektorového vrtání



Obr. 8.2 Princip BTA a STS

- Vrtání "na jádro": odřezávání materiálu ve tvaru mezikružzí. Tento druh vrtání se používá pro vrtání průchozích děr větších průměrů a je prováděn pomocí jednoho nebo vícebřitového korunkového vrtáku.

•

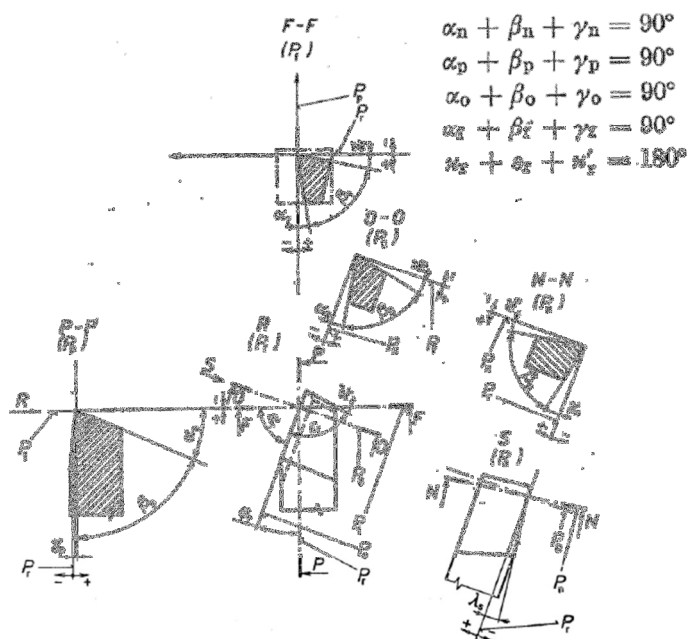


Obr. 9 Korunkový vrták

- Speciální druhy vrtání: vrtání do plechu pomocí termálního tvářecího vrtáku, kombinace vrtání a zahlubování, závitování a dalšími druhy obrábění otvorů sruženými nástroji.
- Vrtání do těžkoobrobitelných, nekovových a kompozitních materiálů.

## Parametry řezného procesu

### Geometrie soustružnického nože



Obr. 9 Nástrojové řezné úhly soustružnického nože

#### Názvy nástrojových rovin a základních úhlů:

$P_r$ – Základní nástrojová rovina	$\kappa_r$ – úhel nastavení hlavního ostří
$P_f$ – Boční nástrojová rovina	$\gamma_o$ – Nástrojový ortogonální úhel čela
$P_p$ – Zadní nástrojová rovina	$\lambda_s$ – Nástr. úhel sklonu hlavního ostří
$P_s$ – Nástrojová rovina ostří	$\beta_o$ – Nástr. Ortogonální úhel břitu
$P_o$ – Ortogonální nástrojová rovina	$\alpha_o$ – Nástr. ortogonální úhel hřbetu
$P_n$ – Normální nástrojová rovina	$\delta_o$ – Nástr. Ortogonální úhel řezu
$P_g$ – Nástr. rovina největšího spádu čela	
$P_b$ – Nástr. rovina největšího spádu hřbetu	

#### Význam nástrojových úhlů

- $\kappa_r$  - úhel nastavení hlavního ostří ( $0^0 - 90^0$ ) má vliv na složky řezné síly a tvar třísky
- $\gamma_o$  - nástrojový ortogonální úhel čela ( $-6^0 ; +6^0$ ) má vliv na: tvorbu třísky, tuhost břitu
- $\lambda_s$  - nástrojový úhel sklonu hlavního ostří ( $-6^0 - 90^0$ ) má vliv na: tuhost břitu, směr odchodu třísky z řezu, zatížení špičky nože
- $\beta_o$  - nástrojový ortogonální úhel břitu ( $40^0 - 100^0$ ) má vliv na tuhost břitu
- $\alpha_o$  - nástrojový ortogonální úhel hřbetu ( $8^0 - 12^0$ ) ovlivňuje tření na hřbetě břitu
- $\delta_o$  - nástrojový ortogonální úhel řezu ( $0^0 - 90^0$ ) má vliv na tuhost břitu

## Řezné podmínky pro soustružení

Důležitými parametry řezných podmínek pro soustružení jsou řezná rychlost, posuv a tvar třísky.

*Řezná rychlost* - rychlost hlavního řezného pohybu. Její velikost se volí dle druhu materiálu nástroje a obrobku. Řezná rychlost odpovídá obvodové řezné rychlosti měřené na obráběné ploše a má rozsah od 5 do 1000  $m/min$ . Lze ji určit ze vztahu:

$$v_c = \frac{\pi * D * n}{1000} \left[ \frac{m}{min} \right],$$

kde D je průměr obráběné plochy,  
n je počet otáček vřetené.

*Posuv* - dráha, kterou projde nástroj za jednu otáčku obrobku. Rychlost posuvu se stanoví z následujícího vztahu:

$$v_f = f * n \left[ \frac{m}{min} \right],$$

kde f je posuv na otáčku,  
n je počet otáček vřetené.

Rozsah hodnot posuvu dle druhu operace:

Hrubování: 0,4 až 3,5 mm  
Dokončování: 0,06 až 0,5 mm  
Jemné soustružení: 0,03 až 0,05 mm

*Velikost a tvar průřezu třísky* jsou ovlivněny řadou parametrů nastavení, jako velikost posuvu, úhel nastavení a tvar řezné hrany. Základní rozměry tvaru třísky se dají zjistit z následujících vztahů:

*Rozměr průřezu třísky*

Pro podélné soustružení  
 $a_p = 0,5 * (D - d) [mm]$ ,  
kde D je průměr obráběné plochy,  
d je průměr obrobené plochy

Pro čelní soustružení  
 $a_p = L - l [mm]$ ,  
Kde L je délka obráběné plochy,  
L je délka obrobené plochy



Jmenovitá šířka třísky

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} [mm],$$

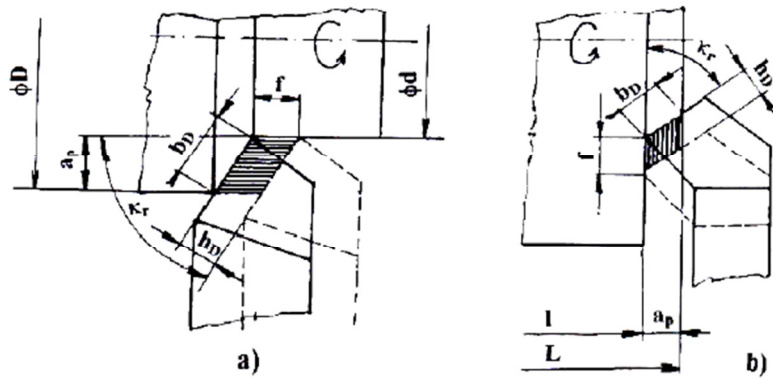
kde  $\kappa_r$  je nástrojový úhel nastavení hlavního ostří.

Jmenovitá tloušťka třísky

$$h_D = f * \sin \kappa_r [mm]$$

Jmenovitý průřez třísky

$$A_D = b_D * h_D = a_p * f [mm^2]$$



Obr. 10 Parametry třísky při soustružení

a) válcová plocha,

b) čelní plocha

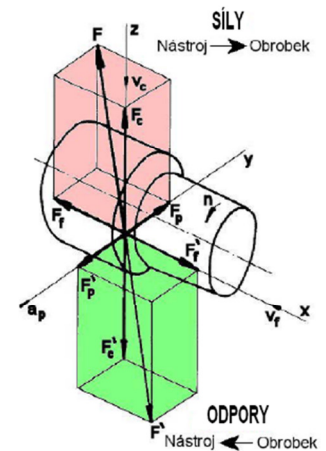
## Řezné síly při soustružení

Celková řezná síla  $F_e$  obsahuje tři složky:

Řeznou složku  $F_c$   $F_c = c_{F_c} * a_p^{x_{F_c}} * f^{y_{F_c}} [N]$

Posuvovou složku  $F_f$   $F_f = c_{F_f} * a_p^{x_{F_f}} * f^{y_{F_f}} [N]$

Pasivní složku  $F_p$   $F_p = c_{F_p} * a_p^{x_{F_p}} * f^{y_{F_p}} [N]$



Obr. 11 Působení řezných sil a odporů v průběhu soustružení

kde  $c_{F_c}, c_{F_f}, c_{F_p}$  jsou materiálové konstanty  
 $x_{F_c}, x_{F_f}, x_{F_p}$  jsou exponenty vlivu hloubky řezu  
 $y_{F_c}, y_{F_f}, y_{F_p}$  jsou exponenty vlivu posuvu

Materiálové konstanty a exponenty vlivu hloubky řezu a posuvu jsou zjišťovány empiricky. Jejich hodnoty pro potřebnou metodu obrábění se dají stanovit z tabulek.

Konečná hodnota celkové řezné síly se určí dle vztahu:

$$F_e = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \text{ [N]}$$

Existuje i druhý vztah, pomocí něhož se dá spočítat velikost řezné síly při soustružení:

$$F_c = S * p \text{ [N]},$$

kde  $S$  je průřez třísky,  
 $p$  je řezný odpor

Hodnota velikosti řezného odporu je průměrně 4 až 5x větší než hodnota pevnosti v tahu obráběného materiálu.

$$p = (4 \div 5) * R_m \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

Řezný odpor se mění s tloušťkou třísky a úhlem řezu. Když se hodnota posuvu zvětšuje a hodnota úhlu řezu se zmenšuje, hodnota řezného odporu klesá.

*Měrná síla řezání* je síla řezání, vztažená na jednotku plochy řezu.

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \text{ [MPa]}$$

Pomocí zjištěných hodnot se dá vypočítat potřebný výkon obráběcího stroje:

*Užitečný výkon stroje:*  $P_{už} = \frac{F_c * v_c}{\eta} \text{ [kW]}$

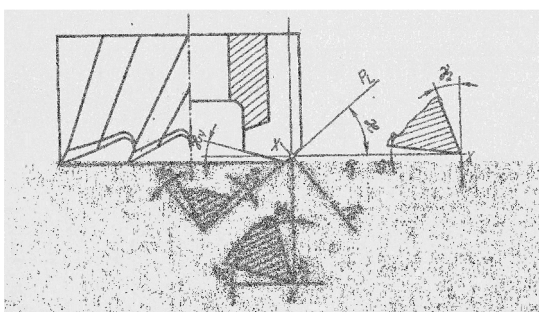
*Posuvový výkon stroje:*  $P_f = \frac{F_f * v_f}{\eta} \text{ [kW]}$

Pracovní výkon stroje:

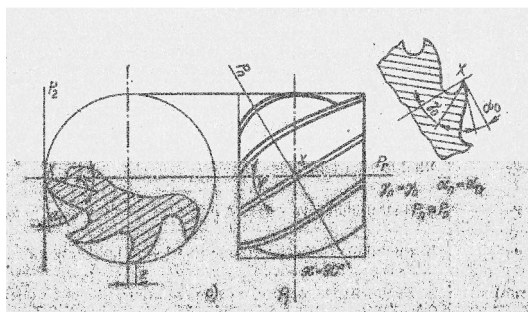
$$P_e = \frac{F_e \cdot v_e}{\eta} \quad [kW]$$

kde  $\eta$  je mechanická účinnost stroje

## Geometrie břitů fréz



Obr. 12.1 Nástrojové úhly čelní frézy



Obr. 12.2 Nástrojové úhly válcové frézy

$P_T$  - Základní rovina vztažná proložená bodem na ostří X a osou frézy

$P_1$  - Radiální vztažná rovina proložená bodem na ostří, kolmo na osu frézy

$P_2$  - Axiální vztažná rovina proložená bodem na ostří, rovnoběžně na osu frézy

$P_3$  - Rovina řezu procházející ostřím a kolmá na základní rovinu

$P_0$  - Rovina měření proložená bodem X na ostří kolmo na průmět ostří do základny

$\gamma_0$  - Úhel čela v rovině  $P_0$

$\alpha_0$  - Úhel hřbetu v rovině  $P_0$

$\gamma_1$  - Úhel čela v radiální rovině  $P_1$

$\alpha_1$  - Úhel hřbetu v radiální rovině  $P_1$

$\gamma_2$  - Úhel čela v radiální rovině  $P_2$

$\alpha_2$  - Úhel hřbetu v radiální rovině  $P_1$

$\kappa$  - Úhel nastavení hlavního ostří, měřený v základní rovině  $P_T$  mezi směrem posuvu a průmětem hlavního ostří do základní roviny

$\lambda$  - Sklon ostří v rovině řezu  $P_2$ . Znaménko sklonu se určuje obdobně jako u soustružnických nožů.

$\kappa_v$  - Úhel nastavení vedlejšího břitu

$\alpha_v$  - Úhel hřbetu vedlejšího břitu

$\gamma_n$  - Normální úhel čela v rovině  $P_n$  na ostří kolmé  $\text{tg } \gamma_n = \text{tg } \gamma \cdot \cos \lambda$

$\alpha_n$  - Normální úhel hřbetu v rovině  $P_n$  na ostří kolmé  $\text{tg } \alpha_n = \text{tg } \alpha \cdot \cos \lambda$

Závislost nastavení úhlu čela  $\gamma$  a úhlu hřbetu  $\alpha$  na druhu obráběného materiálu je znázorněná v následující tabulce:

Obráběný materiál	Úhel čela $\gamma$ (°)	Úhel hřbetu $\alpha$ (°)
ocel do pevnosti 800 MPa	12 - 20	5 - 8
ocel do pevnosti 850 MPa	8 - 12	4 - 6
šedá litina do tvrdosti 120 HB	6 - 10	5 - 8
šedá litina nad tvrdostí 180 HB	4 - 20	3 - 5
měď	12 - 20	5 - 6
mocaz, bronz	0 - 12	4 - 6
lehké slitiny	15 - 30	8 - 12
plasty	0 - 15	4 - 6

Tab. 1 Závislost nastavení úhlu čela  $\gamma$  a úhlu hřbetu  $\alpha$  na druhu obráběného materiálu

## Řezné podmínky pro frézování

Pro frézování platí stejné kritické parametry jaké pro soustružení: řezná rychlost, posuv a tvar třísky.

*Řezná rychlost* je reprezentována obvodovou rychlostí nástroje.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \left[ \frac{m}{min} \right],$$

kde D je průměr obráběné plochy,  
n je počet otáček vřetene.

*Posuv na otáčku*  $f_n$  je délka dráhy, kterou prošel obrobek za dobu jedné otáčky nástroje.

*Posuv na zub*  $f_z$  je délka dráhy, kterou prošel obrobek za dobu jedné otáčky nástroje dělená počtem zubů nástroje.

$$f_n = f_z \cdot z \text{ [mm]},$$

kde z je počet břitů nástroje.

*Posuvová rychlost* se pak vypočítá ze vzorce:

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \text{ [mm]},$$

kde n jsou otáčky nástroje.

*Hloubka řezu*

Tloušťka třísky  $h_i$  se mění při nesousledném frézování od nuly do maximální hodnoty. Při sousledném frézování naopak od maximální hodnoty do nuly. Jmenovitá tloušťka třísky se pro libovolnou fázi vypočítá pomocí následujícího vzorce:

$$h_i = f(\varphi_i) = f_z * \sin\varphi_i \text{ [mm]} ,$$

kde  $\varphi_i$  je úhel posuvového pohybu.

Jmenovitý průřez třísky pro určitou polohu frézy se vypočítá pomocí vztahu:

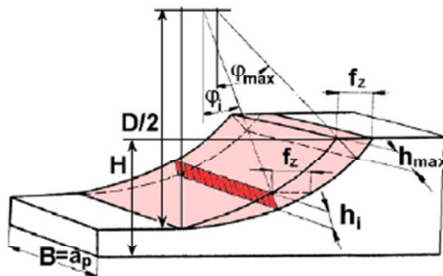
$$A_{Di} = a_p * h_i = a_p * f_z * \sin\varphi_i \text{ [mm}^2\text{]}$$

Pro maximální hodnotu posuvového pohybu  $\varphi_{max}$  platí:

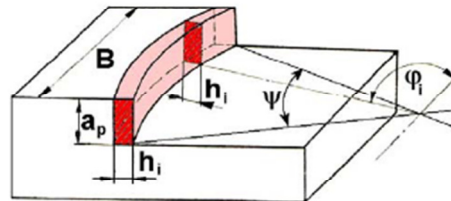
$$\sin\varphi_{max} = \frac{2}{D} \sqrt{D * H - H^2}$$

Poté je maximální velikost jmenovitého průřezu třísky:

$$A_{Dmax} = a_p * h_{max} = a_p * f_z * \sin\varphi_{max} \text{ [mm}^2\text{]}$$



Obr. 13.1 Průřez třísky při válcovém frézování



Obr. 13.2 Průřez třísky při čelním frézování

Pro čelní frézování platí, že na tloušťku třísky mají vliv hodnoty úhlů posuvového pohybu  $\varphi_i$  a nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$ . Z toho plyne následující vztah:

$$h_i = f_z * \sin\varphi_i * \sin\kappa_r \text{ [mm]}$$

Jmenovitá šířka třísky:

$$b = \frac{a_p}{\sin\kappa_r} \text{ [mm]}$$

Jmenovitý průřez třísky pro  $\kappa_r=90^\circ$ :

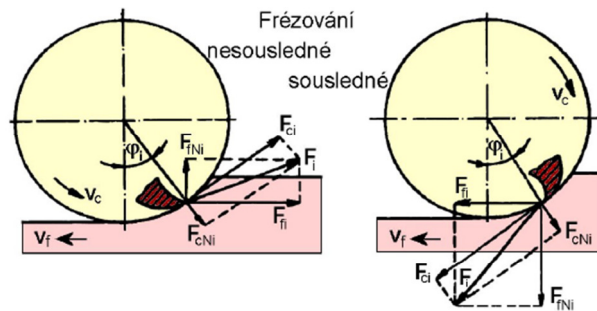
$$A_{Di} = b * h_i = a_p * f_z * \sin\varphi_i \text{ [mm}^2\text{]}$$

Maximální velikost jmenovitého průřezu třísky při  $\varphi_i=90^0$ :

$$A_{Dmax} = a_p * f_z \text{ [mm}^2\text{]}$$

## Řezná síla při frézování

Celková síla řezání  $F_i$ , která působí na břít, je výslednice lineárních složek síly  $F_{ci}$  a  $F_{cNi}$ , respektive sil  $F_{fi}$  a  $F_{fNi}$ .



Obr. 14 Rozklad síly řezání na zubu válčové frézy v pracovní rovině  $P_{fe}$

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

Řezná složka síly  $F_i$  je ovlivněná měrnou řeznou silou  $k_{ci}$  a průřezem třísky  $A_{Di}$ . *Měrná řezná síla*  $k_c$  se dá zjistit ze vztahu:

$$k_{ci} = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z * \sin\varphi_i)^{1-x}} \text{ [MPa]} ,$$

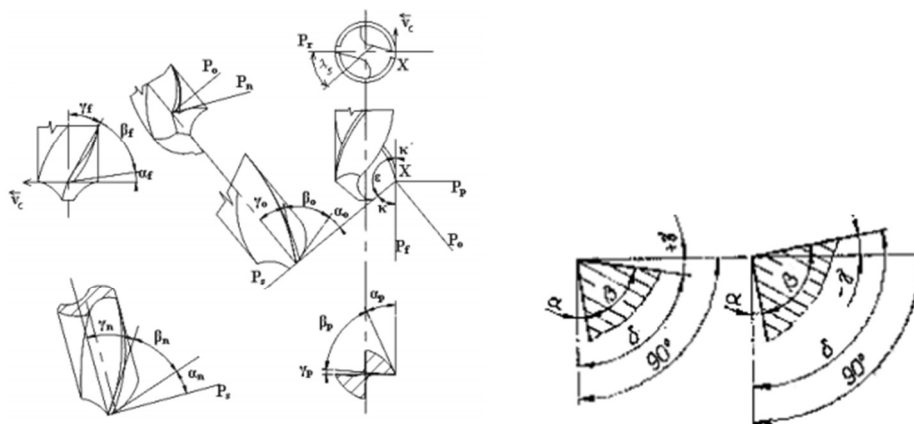
kde  $C_{Fc}$  je konstanta vlivu obráběného materiálu,  
x je exponent vlivu tloušťky třísky

Pak lze vztah pro výpočet  $F_{ci}$  představit takto:

$$F_{ci} = k_{ci} * A_{Di} = k_{ci} * a_p * f_z * \sin\varphi_i = C_{Fc} * a_p * f_z^x * \sin^x\varphi_i \text{ [N]}$$

## Geometrie vrtáku

Popis základních úhlů a jejich vlivu na řezný proces:



Obr. 15 Nástrojové úhly pro vrták

**X** - Uvažovaný bod na ostří

$\vec{v}_c$  - Vektor hlavní řezné rychlosti

**P<sub>r</sub>** - Rovina základní, kolmá na vektor hlavní řezné rychlosti

**P<sub>f</sub>** - Rovina posuvová, kolmá na rovinu základní, totožná s vektorem hlavní řezné rychlosti

**P<sub>p</sub>** - Rovina posuvová, kolmá na rovinu základní a posuvovou, totožná s vektorem hlavní řezné rychlosti

**P<sub>s</sub>** - Rovina ostří, kolmá na rovinu základní

**P<sub>o</sub>** - Rovina ortogonální, kolmá na rovinu základní a rovinu ostří

**P<sub>n</sub>** - Rovina normálová, kolmá na ostří, kolmá na rovinu základní, pokud  $\lambda = 0^\circ$

**$\alpha_i$**  - Úhel hlavního hřbetu, volen s ohledem na obráběný materiál a průměr nástroje.

Velikost má vliv na tření mezi nástrojem a obrobenu plochou

**$\beta_i$**  - Úhel břitu je dán velikostí úhlu hřbetu a čela. Při jeho zmenšování se také zmenšuje řezný odpor, ale klesá pevnost břitu

**$\gamma_i$**  - Úhel čela určuje společně s úhlem řezu polohu čela k pracovní rovině řezu.

Při vysokém kladném úhlu řezu a záporném úhlu čela se břit stává celkově záporným, což má za následek vzrůst intenzity plastické deformace a následně větší tření odchozí třísky o čelo. Jeho hodnota se poloměrem nástroje mění v závislosti na průměru nástroje DN a úhlu stoupání šroubovice  $\omega$  :

$$\gamma_o = 90^\circ - \arctan\left(\frac{D_N \cdot \text{tg} \omega}{D_B}\right)$$

**$\gamma_o$**  Úhel čela v ortogonální rovině.

**$D_B$**  Průměr měření úhlu čela.

**$\delta_i$**  - Úhel řezu je dán součtem úhlu hřbetu a úhlu břitu

**$\epsilon$**  - Úhel špičky nástroje,  $\epsilon = 2\kappa$ . Volen opět dle druhu obráběného materiálu

**$\lambda_s$**  - Úhel sklonu ostří v rovině přísunové

**$\kappa$**  - Úhel nastavení hlavního ostří

**$\kappa'$**  - Úhel nastavení vedlejšího ostří

## Řezné podmínky pro vrtání

Řezná rychlost

$$v_c = \frac{\pi * D * n}{10000} [m/min]$$

Posuvová rychlost

$$v_f = f * n [m/min]$$

Rychlost výsledného řezného pohybu

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} [m/min]$$

Výpočet průřezu třísky

Pro výpočet průřezu třísky platí následující vztah:

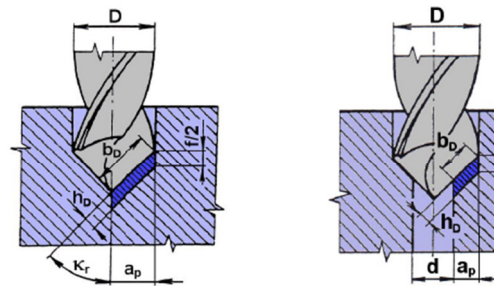
$$A_D = b_D * h_D = a_p * \frac{f}{2},$$

kde  $b_D$  je jmenovitá šířka třísky [mm],

$h_D$  je jmenovitá tloušťka třísky [mm],

$a_p$  je šířka záběru ostří [mm],

$f$  je posuv na otáčku [mm]



Obr. 16 Průřez třísky při vrtání dvoubřítým šroubovým vrtákem

Při použití jednobřitého nástroje pro vrtání do plného materiálu, je šířka záběru rovna:

$$a_p = \frac{D}{2}$$

Při použití jednobřitého nástroje pro vrtání do předpracovaného otvoru (předvrtaného, přelisovaného apod.), je šířka záběru rovna:

$$a_p = \frac{(D - d)}{2}$$

Při použití dvoubřitého nástroje se hodnota šířky záběru zvětší dvakrát.

Jmenovitá šířka třísky při vrtání do plného materiálu:

$$b_D = \frac{D}{2 * \sin \kappa_r} [mm],$$

kde  $D$  je průměr vrtáku.



Jmenovitá šířka třísky při vrtání do předpracované díry:

$$b_D = \frac{D-d}{2 \cdot \sin \kappa_r} \text{ [mm]},$$

kde  $d$  je průměr jádra vrtáku.

Jmenovitá tloušťka třísky:

$$h_D = \frac{f}{2} * \sin \kappa_r \text{ [mm]}$$

### Řezná síla při vrtání

Při obrábění materiálu vzniká odpor, který vrták musí překonat aby mohl odříznout vrstvu potřebné hloubky. Standardně šroubovitý nebo kopinatý vrták mají dva břity postavené symetricky vůči ose vrtáku. Výsledná síla řezání se pak bude skládat ze složek síl vzniklých na obou břitech nástroje.

Složky výsledné řezné síly při vrtání:

Řezná složka  $F_c$   $F_c = c_{F_c} * D^{x_{F_c}} * f^{y_{F_c}} \text{ [N]}$

Posuvová složka  $F_f$   $F_f = c_{F_f} * D^{x_{F_f}} * f^{y_{F_f}} \text{ [N]}$

Pasivní složka  $F_p$   $F_p = 0$

kde  $c_{F_c}, c_{F_f}$  jsou materiálové konstanty

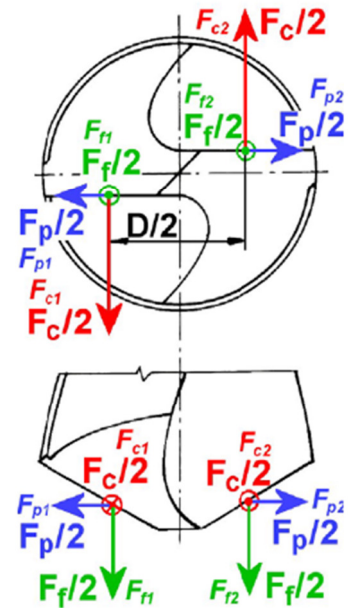
$x_{F_c}, x_{F_f}$  jsou exponenty vlivu průměru vrtáku

$y_{F_c}, y_{F_f}$  jsou exponenty vlivu posuvu na otáčku

Pro výpočet krouticího momentu se použije vztah:

$$M_k = c_M * D^{x_M} * f^{y_{F_c}} \text{ [Nmm]},$$

kde  $c_M = \frac{1}{4} * c_{F_c}$ , a  $x_M = x_{F_c} + 1$



Obr. 17 Rozklad složek řezné síly při vrtání

Řezný výkon může být zjištěn pomocí vztahu:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{2 \cdot 60 \cdot 1000} = \frac{F_c \cdot v_c}{1,2 \cdot 10^5} \text{ [kW]}$$

## Možnosti experimentálního měření

### Měření opotřebení řezného nástroje

Vzájemný kontakt a relativní pohyb strojních části nezbytně vede k opotřebení. Při obrábění dochází k relativnímu pohybu nástroje vůči obrobku a tříске, rovněž i ke kontaktu nástroje s obrobkem na hlavním a vedlejším hřbetě a špičce nástroje a odcházející třískou na čele nástroje, což nezbytně vede k opotřebení nástroje.

Proces opotřebení nástroje je složitý děj závislý na mnoha faktorech, jako jsou fyzikální vlastnosti obráběného a obráběcího materiálu, druh obráběcí operace, geometrie nástroje, pracovní podmínky, řezné prostředí a další. V průběhu těchto procesů působí mnoho odlišných fyzikálních a chemických jevů, nebo-li mechanismů opotřebení. K základním mechanismům opotřebení patří:

- *abraze* - je brusný otěr způsobený tvrdými mikročásticemi, uvolněnými z obráběného materiálu a z nástroje.
- *adheze* - je děj, při němž vznikají a porušují se mikrosvary v místě styku, vrcholcích nerovností čela a třísky a to v důsledku vysokých teplot a tlaků, chemické příbuznosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů.
- *difúze* - je děj, při němž atomy z obrobeného materiálu přechází do obráběcího materiálu a naopak a jako následek vytváření nežádoucích chemických sloučenin ve struktuře nástroje.
- *oxidace* - je vznik vrstvy z chemických sloučenin na povrchu nástroje vlivem přítomnosti kyslíku v okolním prostředí.
- *plastická deformace* - vzniká jako důsledek vysokého tepelného a mechanického zatížení v průběhu času. Může se projevit ve formě lavinového opotřebení.
- *křehký lom* - vzniká jako důsledek vysokého mechanického zatížení, např. přerušovaný řez, nehomogenita a vměstky v obráběném materiálu, atd.

Abráze a adheze patří mezi fyzikální mechanismy opotřebení, difúze a oxidace mezi chemické mechanismy opotřebení. Všechny čtyři jevy působí v průběhu času postupně a začátek jejich působení nemusí být vždy shodný.

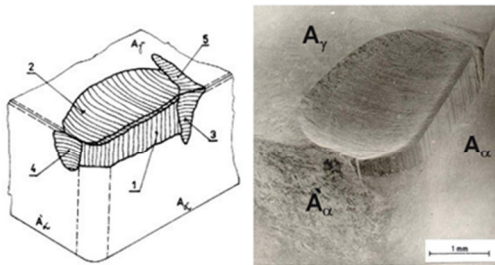
Plastická deformace a křehký lom jsou mechanismy, které působí oproti prvním čtyřem jevům náhle a obvykle způsobí okamžité ukončení činnosti nástroje (náhlá změna tvaru břitu nástroje, lavinové opotřebení nebo ulomení špičky).

Hřbet nástroje se opotřebovává především v důsledku abraze a oxidace, čelo v důsledku adheze, difúze, abraze a oxidace. Na skutečnost, zda se nástroj bude více opotřebovávat na hřbetě nebo na čele (příp. na špičce), mají výrazný vliv i další faktory, jako je např. geometrie

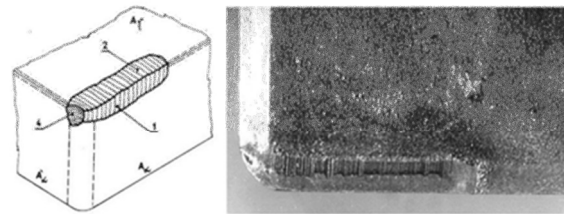
nástroje, druh operace (hrubování, dokončování) a v neposlední řadě i řezné podmínky (řezná rychlost, posuv, hloubka řezu a chlazení).

### Formy opotřebení

Vzhled břítu nástroje ze slinutého karbidu s typickými formami opotřebení je znázorněn na obrázku. Na dalším obrázku je vzhled břítu nástroje z řezné keramiky. Formy opotřebení jsou na obou obrázcích označeny následovně: 1 - fazetka opotřebení na hřbetě, 2 - výmol na čele, 3 - primární hřbetní rýha, 4 - sekundární (oxidační) hřbetní rýha, 5 - rýha na čele.



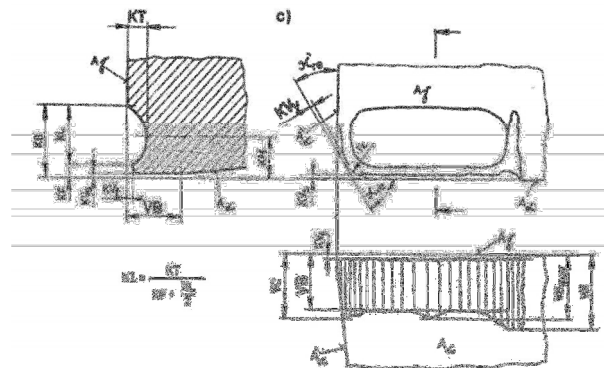
Obr. 18.1 Formy opotřebení břítu nástroje z SK



Obr. 18.2 Formy opotřebení břítu nástroje z řezné keramiky

### Kritéria opotřebení

Kritéria opotřebení jsou uvedena na obrázku. Nejčastěji užívaná kritéria jsou: VB - šířka fazetky opotřebení na hřbetě, KT - hloubka výmolu na čele, KVy - radiální opotřebení špičky. Kritérium KVy je významný u dokončovacích operací, protože způsobuje změnu rozměru obrobenej plochy. Označování jednotlivých kritérií odpovídá místním zvyklostem a částečně se liší od normy ČSN ISO 3685, která označuje kritéria opotřebení na hřbetě VBC (označovaná na obrázku jako VC), VBB (na obrázku: VB), VBB max (na obrázku: VBmax) a VBN (na obrázku: VN).



Obr. 19 Kritéria opotřebení břítu nástroje

### Měření opotřebení

Metody pro stanovení opotřebení řezného nástroje mohou být přímé a nepřímé.

K přímým metodám diskontinuálního měření, tj. po přerušení nebo skončení činnosti nástroje, patří:

- Měření vybraného kritéria opotřebení: šířka fazety opotřebení (VB) se měří pomocí dílenského mikroskopu, hloubka výmolu na čele (KT) - pomocí profiloměru a radiální opotřebení špičky (KVy) - délkovým měřidlem.

- Vážení břitové destičky
- Optické sledování funkčních nástrojových ploch

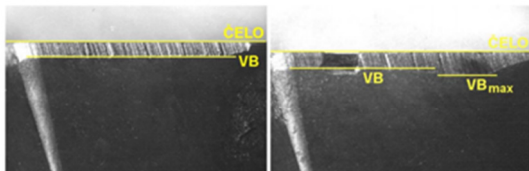
K přímým metodám kontinuálního měření, tj. v průběhu činnosti nástroje, patří:

- Elektrické metody:
- Odporové: vyhodnocuje se změna odporu v místě kontaktu nástroje s obrobkem; sleduje se chování tenké vrstvy odporového materiálu, naneseného na hřbet nástroje; odporový snímač opotřebovovaný společně s nástrojem.

- Indukční
- Sledování vzájemné polohy nástroje a obrobku
- Ultrazvukové metody
- Pneumatické metody
- Radioaktivní metody:
- Ozářený nástroj
- Mikroizotopový snímač
- Měření rozměrů obrobku

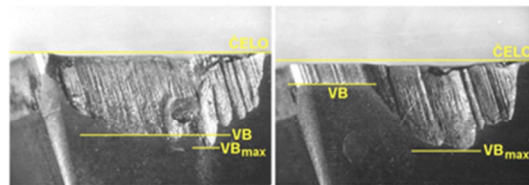
K nepřímým metodám kontinuálního měření patří:

- Měření a následné vyhodnocování jednotlivých složek řezné síly
- Měření a následné vyhodnocování elektrického příkonu obráběcího stroje
- Měření parametrů kmitání: amplitudy kmitů, zrychlení apod.
- Měření teploty řezání
- Měření struktury povrchu obrobenej plochy: parametry drsnosti Ra, Ry, apod.
- Sledování druhotných projevů opotřebení:
  - Lesklé proužky na obrobenej ploše
  - Charakteristický zvuk
  - Změna tvaru a barvy třísky



Obr. 20.1 Pravidelná nízká hodnota VB

Obr. 20.2 Poměrně pravidelná nízká hodnota VB

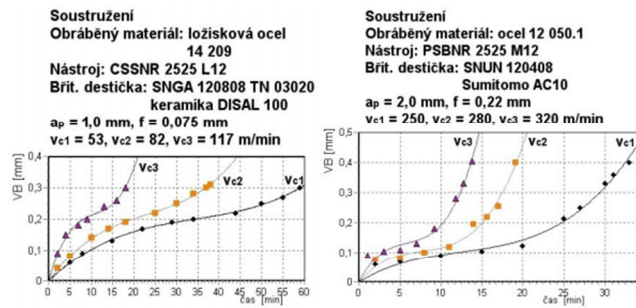


Obr. 20.3 Pravidelná vysoká hodnota VB

Obr. 20.3 Nízká hodnota VB v kombinaci s vysokou hodnotou  $VB_{max}$

V praxi jsou pro měření opotřebení nástroje nejčastěji používány metody přímého měření základních kritérií opotřebení: VB a KT. Hodnoty VB se měří pomocí malého dílenského mikroskopu. Naměřené hodnoty jsou pak vnášeny do závislostí VB na čase.

12



Obr. 21.1 Časový průběh křivek opotřebení při obrábění ložiskové oceli

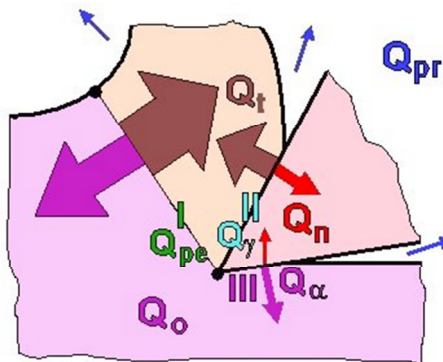
Obr. 21.1 Časový průběh křivek opotřebení při obrábění oceli 12 050.1

## Měření teploty řezného nástroje

### Tepelná bilance řezného procesu

Během obráběcího procesu se práce řezání transformuje v teplo. Vzniklé teplo výrazně ovlivňuje řezný proces, protože:

- Má negativní vliv na řezné vlastnosti nástroje
- Může měnit mechanické vlastnosti obráběného materiálu
- Může způsobit petchování a zpevňování obráběného materiálu
- Ovlivňuje podmínky tření na čele a hřbetě nástroje.



Obr. 22 Vznik a odvod tepla při obrábění

Z obrázku je vidět, že teplo při obrábění vzniká v oblasti primární plastické deformace I ( $Q_{pe}$ ), jako důsledek plastických a elastických deformací, v oblasti sekundární plastické deformace II ( $Q_{\gamma}$ ), jako důsledek tření mezi čelem nástroje a třískou a v oblasti III ( $Q_{\alpha}$ ), jako důsledek tření hlavního hřbetu nástroje o přechodovou plochu na obrobku. Vzniklé teplo se odvádí třískou ( $Q_t$ ), nástrojem ( $Q_n$ ), obrobkem ( $Q_o$ ) a řezným prostředím ( $Q_{pr}$ ). Na základě předpokladu, že vzniklé

teplo musí se rovnat teplu odvedenému, lze vytvořit rovnici tepelné bilance řezného procesu ve tvaru:

$$Q_{pe} + Q_{\gamma} + Q_{\alpha} = Q_t + Q_n + Q_a + Q_{pr} [J].$$

Největší množství tepla vzniká v oblasti primární plastické deformace I, následuje oblast sekundární plastické deformace II. Teplo, které vzniká v oblasti hřbetu, má být udržováno na co možná nejnižších hodnotách, proto je třeba volit úhel hřbetu co největší a rovněž zabránit výraznému opotřebení hřbetu, které úhel hřbetu dále zmenšuje. Množství vzniklého tepla závisí na vlastnostech obráběného materiálu, geometrii nástroje a řezných podmínkách.

Rozdělení jednotlivých složek tepla, odváděného třískou, obrobkem, nástrojem a prostředím, závisí na tepelné vodivosti materiálů obrobku a nástroje, na řezných podmínkách, řezném prostředí a na geometrii břitu nástroje. Největší část tepla vzniklého při obrábění je u řezných procesů odváděna ze zóny řezání třískou, a to platí pro řezné procesy využívající nástroj s definovatelnou geometrií.

Podíly tepelné energie odvedené jednotlivými účastníky řezného procesu jsou z hlediska efektivnosti důležité z následujících důvodů:

- *Teplo odvedené nástrojem*: velké množství tepla odvedené nástrojem znamená výrazné zvýšení teploty nástroje. Teplotní účinek značně zvyšuje intenzitu opotřebení a proto dochází ke snížení trvanlivosti a životnosti nástroje.
- *Teplo odvedené obrobkem*: velké množství tepla přecházejícího do obrobku má negativní vliv na kvalitu obrobeného povrchu. Můžou se zvětšit tahová vnitřní pnutí, která podstatně snižují spolehlivost součástí při jejich funkci.
- *Teplo odvedené řezným prostředím*: velké množství tepla odvedené okolním prostředím může zajistit stav, kdy do nástroje a obrobku přejde menší účinek vzniklého tepla, což zmenší jeho negativní vliv na nástroj a obrobek.
- *Teplo odvedené třískou*: stejně jako v případě odvodu tepla řezným prostředím: zajistí se stav, kdy nástroj a obrobek jsou co nejméně ovlivněné vzniklým teplem.

### **Měření teploty řezného nástroje**

Teplota nástroje je nejvíce ovlivněna podílem tepla, přecházejícího do nástroje v oblastech I, II a III. Tato teplota je závislá na velikosti kontaktní plochy mezi třískou a nástrojem, velikosti řezných sil a tření, vzniklého mezi třískou a čelem nástroje, materiálem obrobku a hřbetem nástroje.

Primární používanou jednotkou teploty je stupeň Kelvina, vedlejší jednotkou teploty podle soustavy SI je stupeň Celsia. Vzájemný přepoččet teplot z Celsiovy na Kelvinovu stupnici se provádí podle vzorce:

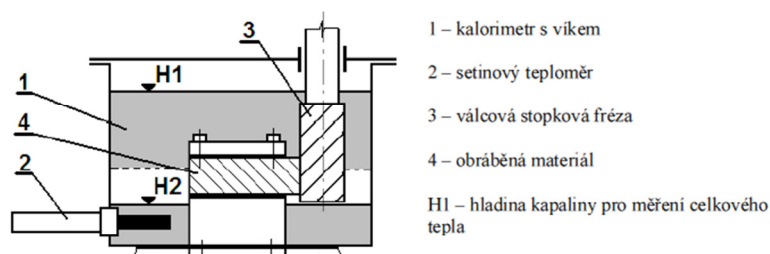
$$T [^{\circ}\text{K}] = T [^{\circ}\text{C}] + 273,15$$

## Kalorimetrické metody

Pro experimentální měření množství tepla vzniklého při procesu obrábění se používají kalorimetry. Kalorimetr představuje sebou tepelně izolovanou nádobu naplněnou do určité výše kapalinou, do které se umístí přesný teploměr a případně i míchadlo. Obecný postup měření spočívá v ponoření ohřátého dílu: třísky, obrobku nebo nástroje po obrábění do lázně a následně odečítání předané dílem kapalině tepla.

Pomocí kalorimetrických metod lze:

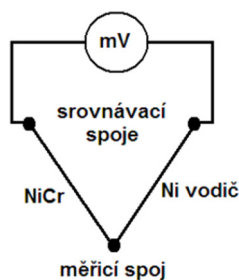
- Stanovit celkové množství tepla vzniklého při obrábění
- Určit množství tepla, které odchází třískou
- Určit množství tepla, které přechází do nástroje a obrobku
  - Zjistit střední teplotu třísky, obrobku a nástroje



Obr. 23 Kalorimetr na měření celkového tepla při válcovém frézování

## Měření teploty pomocí termočlánků

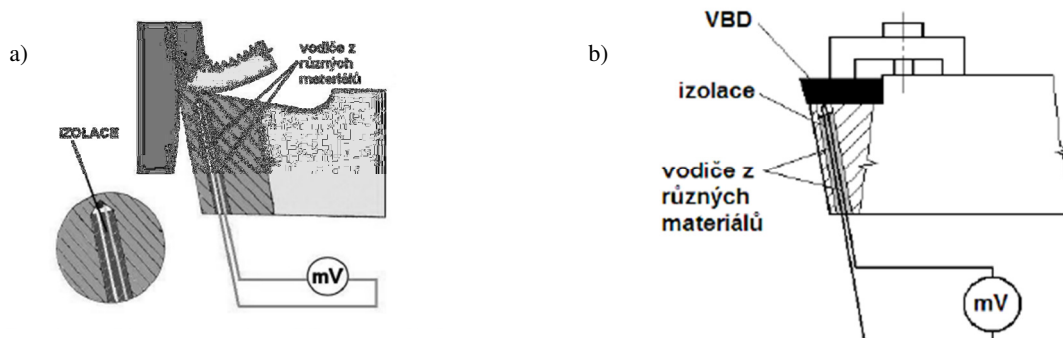
Pro měření teploty řezného nástroje jsou nejčastěji používány termočlánky. Termočlánek se skládá z obvodu tvořeného dvěma dráty z různých vodičových materiálů, které jsou na obou koncích vodivě spojeny. Jeden z těchto spojů se umístí do místa, ve kterém je potřeba provést měření a zahřeje se na teplotu  $\theta_m$  teplem vzniklým v průběhu řezného procesu. Druhý spoj se umístí tak, aby se na něm udržela známá referenční teplota  $\theta_0$ , například teplota okolí. Společně s těmito dráty je zapojen milivoltmetr, který bude měřit napětí vzniklé v důsledku termoelektrického jevu.



Obr. 24 Schéma zapojení termočlánku

## Umělý termočlánek

Podstatou je přímé umístění termočláneku do místa řezu. Izolovaný termočlánek se vloží do speciálně vytvořeného otvoru v nástroji. Použití umělých termočláneků je obtížné pro monolitní řezné nástroje, jelikož jeho poloha může ovlivnit vedení tepla a znehodnotit obráběcí nástroj. Proto se termočlánek nejčastěji používá u nástrojů s vyměnitelnou břitovou destičkou, kde je jeho poloha stabilně zabudovaná v nástroji a termočlánek tak může snímat teplotu na dolní ploše břitové destičky.



Obr. 25 Schéma zapojení umělého termočláneku a) řezná část a tělo nástroje jsou monolit, b) řezná část je vyměnitelná břitová destička (VBD) upěvněná do držáku, představujícím tělo nástroje

V následující tabulce jsou uvedené nejvíce používané kombinace umělých termočláneků:

Tab.2 Nejvíce používané kombinace umělých termočláneků a jejich vlastnosti

označení	+ přívod	- přívod	teplotní rozsah v (°C)	rozsah v (mV)
J	Fe	Cu – Ni	-210 °C - 1200 °C	-8,1 – 69,5
K	Ni - Cr	Ni - Al	-270 °C – 1372 °C	-6,4 – 54,9
T	Cu	Cu – Ni	-270 °C – 400 °C	-6,2 – 20,8
R	Pt (13%) – Rh (13%)	Pt	-210 °C - 1200 °C	-0,2 – 21
G	W	W (26%) – Re (26%)	-50 °C – 1768 °C	0 – 38,5
D	W (3%) – Re (3%)	W (25%) – Re (25%)	0 °C - 2320 °C	0 – 39,5
E	Ni – Cr	Cu - Ni	0 °C - 2320 °C	-9,8 – 76,4

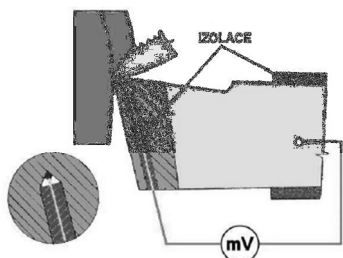
## Poloumělý termočlánek

V případě poloumělého termočláneku jeden vodič tvoří materiál nástroje nebo obrobku a druhý vodič je vodič spojen s místem řezu. Při řezání odcházející tříška deformuje místo řezu a tím vytváří měřicí spoj termočláneku spolu s břitem nástroje.

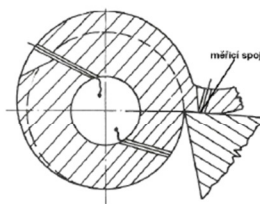


Poloumělý termočlánek se dá použít při:

- Stanovení teploty v oblasti styku třísky s čelem nástroje
- Měření teplot v oblasti primární plastické deformace



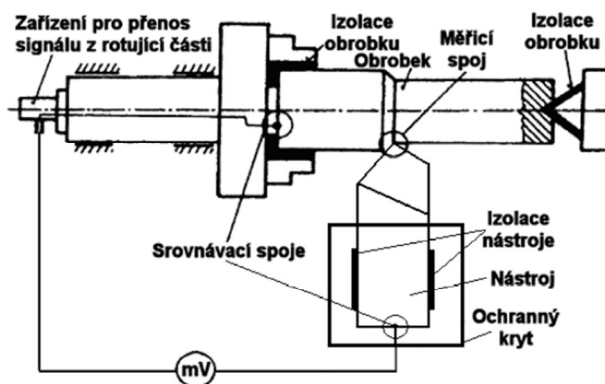
Obr. 26.1 Schéma zapojení poloumělého termočláčku



Obr. 26.2 Měření teploty v oblasti plastické deformace

### *Přirozený termočlánek*

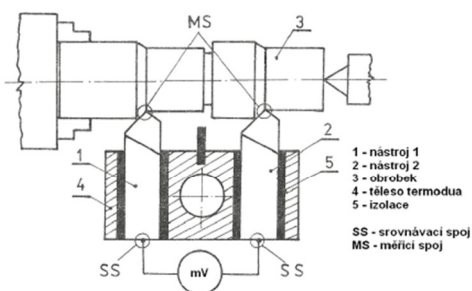
U přirozeného termočláčku je jedním z vodičů materiál nástroje a druhým materiál obrobku. Měřicí spoj se nachází na ploše styku třísky s čelem a hřbetu s plochou řezu. Vzniklé termoelektrické napětí je pak úměrné střední teplotě v oblasti styku. Nutnou podmínkou pro měření pomocí přirozeného termočláčku je vzájemné odizolování nástroje a obrobku.



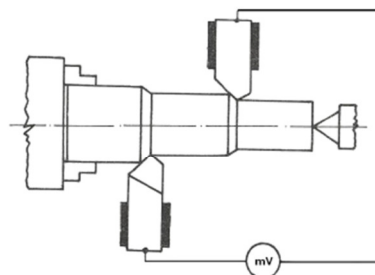
Obr. 27 Schéma zapojení přirozeného termočláčku

### *Termoduo*

Princip spočívá v současném záběru dvou nástrojů vyrobených z různých materiálů, ale při stejných řezných parametrech a o stejné geometrii. Oba nástroje jsou napojeny na milivoltmetr a spolu tvoří termočlánek.



Obr. 28.1 Schéma zapojení termodua



Obr. 28.2 Termoduo s uspořádáním nástrojů proti sobě

### Měření teploty pomocí termistorů

Je založeno na principu závislosti elektrického odporu materiálu na teplotě. Pro kovy platí, že s rostoucí teplotou jejich odpor roste, když pro polovodiče platí, že s rostoucí teplotou jejich odpor klesá. Pro měření teplot s ohledem na specifické podmínky procesu obrábění se výhradně používají polovodičové materiály, které se nazývají termistory.

Změna odporu polovodičového termistoru se může spočítat ze vztahu:

$$R = R_0 \cdot e^{-B \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \quad (\Omega)$$

$R, R_0$  – odpory termistorů při teplotě  $T, T_0$  ( $\Omega$ ),

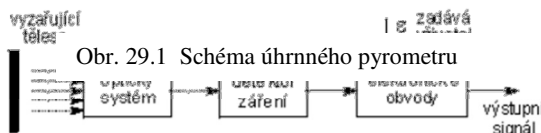
$B$  – aktivační energie (J).

### Měření teploty pomocí pyrometrů

Tato metoda spočívá na sledování tepelného záření vysílaného soustavou stroj-nástroj-obrobek do chladnějšího okolí pomocí přístrojů, které se nazývají pyrometry.

Pyrometry mohou být úhrnné, nebo-li využívající celkového spektra tepelného záření vyzařovaného tělesem a fotoelektrické, které využívají jenom určité pásmo spektra tepelného záření.

V případě úhrnných pyrometrů tepelné záření se soustředí optickou soustavou na teploměrné čidlo, kterým obvykle bývá termočlánek. Vyvolané termoelektrické napětí se pak změní milivoltmetrem se stupnicí kalibrovánou na stupně Celsia.



Obr. 4.18 Schéma úhrnného pyrometru

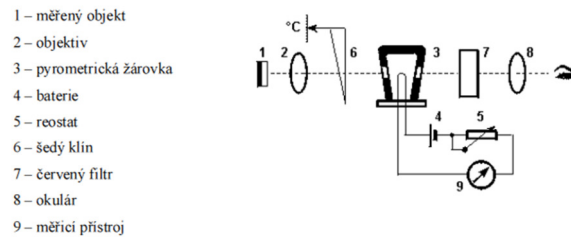
Obr. 29.2 Optický pyrometr MAURER KTR 1085



Obr. 4.19 Optický pyrometr MAURER KTR 1085 s číslicovým výstupem

V případě fotoelektrických pyrometru jako čidla se používají fotočlánky nebo fotodiody, které mají velmi rychlou reakci na změnu teploty a dostatečnou přesnost a citlivost v určitém

spektrálním pásmu. Fotoelektrické pyrometry se dají s výhodou použít při měřeních, kde mezi měřeným objektem a pyrometrem jsou plyny s absorpčními pásmy v oblasti infračerveného záření. Do této skupiny pyrometrů se dá zařadit i jasový pyrometr využívající k měření teploty úzkého pásma spektra v oblasti viditelného záření.



Obr. 30 Jasový pyrometr

## Měření složek síly řezání

### Nepřímé měření složek síly

#### *Metoda stanovení řezné (tangenciální) složky výsledné řezné síly z výkonu stroje*

Měření výkonu obráběcího stroje se obecně provádí wattmetrem. Nejprve se změří výkon nezatiženého stroje, nebo-li chod naprázdno  $P_o$  [W], potom se změří celkový výkon stroje při obrábění  $P_c$  [W]. Z těchto dvou údajů se poté spočítá užitečný výkon stroje  $P_{už}$  podle následujícího vztáhu:

$$P_{už} = P_c - P_o \text{ [W]}$$

Pro tangenciální složku výsledné řezné síly pak platí:

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c}$$

Tato metoda je poměrně jednoduchá a může být použita u všech způsobů obrábění. Nevýhodou této metody ale je omezená přesnost měření, jelikož účinnost stroje při obrábění a při chodu naprázdno není stejná a nebere se v úvahu vliv ostatních složek řezné síly.

### Přímé měření složek síly

#### *Měření složek výsledné řezné síly pomocí dynamometru*

Metody přímého měření silových jevů jsou založené na měření deformace vyvolané řeznou silou v soustavě stroj-nástroj-obrobek. Deformace vyvolaná v jednotlivých členech této soustavy

je velmi malá pro jejich přímé využití pro měření. Proto se měření silových jevů provádí pomocí přídavného zařízení do soustavy stroj-nástroj-obrobek: dynamometru a deformačního členu.

Dynamometr musí z hlediska konstrukce a celkového provedení vyhovovat určitým základním požadavkům. Důležitými charakteristikami pro volbu dynamometru pro určité měření jsou:

#### *Tuhost dynamometru*

Musí být dostatečně velká, aby deformace dynamometru neovlivňovala řezný proces. Tento požadavek je v úzké vazbě s vlastní frekvencí dynamometru, která je přímo úměrná jeho tuhosti.

#### *Citlivost dynamometru*

Úzce souvisí s tuhostí dynamometru a s citlivostí použitého snímače. Citlivost dynamometru musí odpovídat rozsahu měření a dynamometr má umět zachytit nejmenší možnou měřenou sílu se zachováním dostatečné přesnosti.

#### *Setrvačnost měřicí soustavy*

Souvisí s vlastní frekvencí dynamometru. Při měření se vyžaduje co nejmenší setrvačnost.

#### *Rozsah měření*

Je dán maximální a minimální silou, kterou lze dynamometrem změřit.

#### *Přesnost měření*

Přesnost měřicího zařízení musí být vždy větší, než je požadovaná přesnost výsledků měření. Pro zachování přesnosti měření je potřeba vyloučit všechny vlivy, které mohou přesnost měření snížit. K takovým vlivům patří: opotřebení, dilatace, kolísání tlaku, napětí, frekvence, změna kapacity, vnější vlivy ze sítě a vysokofrekvenčních zdrojů.

#### *Stabilita cejchování*

Je určena stálostí naměřených hodnot v cejchovní křivce, která by měla mít pokud možno lineární průběh a minimální hysterezi. Stabilita cejchování souvisí s tuhostí, citlivostí a přesností dynamometru a stabilitou nulové polohy. Stálost údajů dynamometru je zárukou reprodukovatelnosti výsledků měření, což při návrhu dynamometru hraje velkou roli.

Celkové zařízení pro měření řezné síly se zpravidla skládá ze tří částí:

- Pružného členu, který přebírá vnější zatížení a překonává změny
- Snímače, který mění mechanicky vyvolanou veličinu změny pružného členu na veličinu analogického parametru měřicí aparatury
- Přijímače, který zesiluje a zpracovává signál, přicházející ze snímače

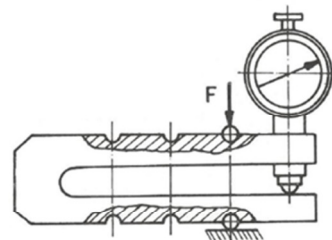
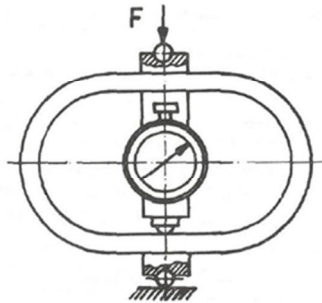
Rozdělení dynamometrů

#### *Mechanické*

Zpravidla se používají pro cejchování dalších druhů dynamometru, a to z důvodu, že u nich lze většinou vyloučit nežadoucí rušivé vlivy.

Působení síly se přenáší mechanickým převodem na měřicí prvek, jako je číselníkový úchylkoměr. Velikost síly se zjišťuje na základě deformace pružin, kroužků, třmenů, nosníků, membrán, vtlačení kuličky do materiálu o známé tvrdosti.

Nevýhody mechanických dynamometrů jsou závislost jejich údajů na teplotě, nutnost vymezování vůlí v mechanismech, únava materiálu, velmi nízká vlastní frekvence nevhodná pro dynamická měření.



Obr. 31 Mechanický dynamometr prstencový    Obr. 32 Mechanický dynamometr třmenový

### *Pneumatické*

Podstatou je čidlo umožňující měření deformace pneumatickým systémem klapka-tryska, který využívá dynamických vlastností vzduchu procházejícího štěrbinou. Měří se tlaková, resp. průtoková změna vzduchu v závislosti na změně mezery mezi klapkou a tryskou v čidle.

Předností pneumatických dynamometrů je jednoduchost, snadná obsluha a údržba, rovněž jako i jejich vysoká citlivost a spolehlivost. Ve srovnání s elektrickými způsoby měření mají relativně nízké pořizovací a provozní náklady.

### *Hydraulické*

Podstatou je přenos síly nebo momentu, které je potřeba změřit na píst nebo membránu hydraulického obvodu způsobující změnu tlaku v kapalině svým pohybem. Tato změna pak se snímá pomocí manometru nebo jiného přístroje.

Výhodou je jednoduchá konstrukce, měření více složek současně. Nevýhodou je nízká citlivost, potřebnost v dokonalém těsnění systému a velká setrvačnost. V současné době se používají jenom výjimečně.

### *Elektrické*

Jsou nejvíce používaným druhem dynamometrů v technické praxi.

Předností použití elektrických dynamometru je:

- snadný přenos signálu s řadou možných úprav
- zachycení signálů různých průběhů a frekvencí
- možnost použití u rotujících a pohybujících se součástí

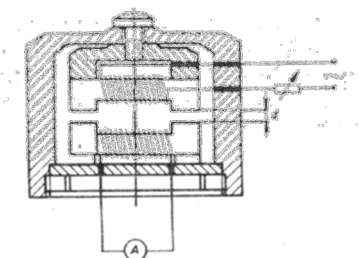
- kompaktní rozměr měřicích elementů
- čistota provozu

Elektrické dynamometry se dají rozdělit do dvou skupin dle způsobu mechanicko-elektrické transformace:

- Parametrické - jsou založené na změně jednotlivého parametru elektrického obvodu: indukčnosti, kapacity nebo odporu
- Generatorové - jsou založené na vzniku napětí nebo proudu při deformaci elementu

#### *Elektrické indukční dynamometry*

Snímače registrují změny vzduchové mezery vzniklé působením zátěžové síly. Se změnou šířky vzduchové mezery se mění impedance magnetického obvodu, což vyvolává změnu indukčnosti cívky. Odpor magnetického obvodu snímače se skládá z odporu feromagnetické části a odporu vzduchu ve vzduchové mezeře. Závislost impedance na délce vzduchové mezery má hyperbolický průběh.



Obr. 33 Indukční snímač sil

#### *Elektrické kapacitní dynamometry*

Pro měření se používá velikost deformace změny kapacity snímačů. Snímačem je deskový kondenzátor.

Výhodou je dostatečně velká citlivost a malá hmotnost. Nevýhodou je příliš velká citlivost i na okolní vlivy a náročnost pro měřicí techniku.

#### *Elektrické odporové dynamometry*

Podstatou je měření deformace čidla na základě změny elektrického odporu snímače. Nejvíce používaným snímačem jsou odporové tenzometry. Tenzometry mohou být vyrobené z vodičových materiálů: kovů, především konstantanu kvůli velkému měřicímu odporu nebo z polovodičových materiálů: křemíku, germaniu apod.

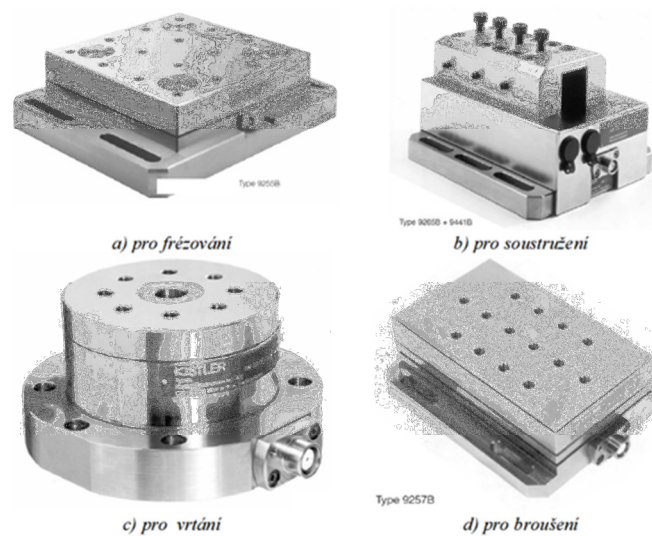
Vodičové tenzometry mohou být drátkové (měřicí mřížka je vytvořena z tenkých odporových drátů a nalepena na nosnou izolační podložku z papíru nebo pryskyřice), foliové (měřicí mřížka je vytvořena z tenké kovové folie a je opatřena z jedné strany nosnou izolační podkladkovou vrstvou z plastické hmoty) a napařované (odporový snímač je tvořen postupným napařováním izolačních, odporových a spojovacích vrstev).

Polovodičové tenzometry využívají piezoelektrické vlastnosti určitých polovodičových materiálů dotovaných příměsemi. Odporovým elementem snímače je tenká destička z monokrystalu polovodiče, která při deformaci mění svůj měrný elektrický odpor.

#### *Piezoelektrické dynamometry*

V současnosti jsou používané piezoelektrické dynamometry fungující na principu snímání náboje, který vzniká na povrchu krystalů při mechanickém zatížení. Piezoelektrickými materiály jsou: křemen, materiály na bázi titaničitanu barnatého, Seignettovy soli a podobné.

Na obrazce jsou představené piezoelektrické dynamometry společností KISTLER, speciálně konstruované pro potřeby obrábění.



Obr. 34 Dynamometry KISTLER pro měření složek řezné síly

## Monitoring řezného procesu pro různé nástroje

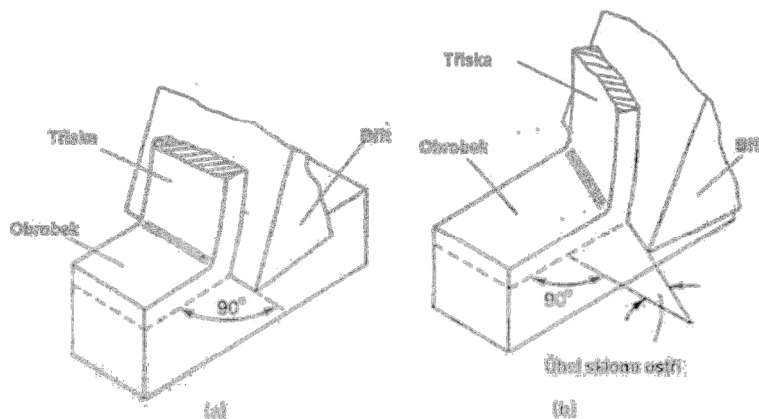
### Podstata a účel měření

Cílem této práce bylo vyhodnotit vliv třínových tvarů útvařečů třísek, navržených společností Pramet na řezné síly vzniklé v průběhu obrábění materiálu soustružením.

Utvařeče (nebo lamače) třísek se často používají pro ekonomicky vhodné utváření třísek.

### Tvoření třísky

Všechny obráběcí operace mohou být rozdělené na ortogonální (nebo-li volné) řezání a vázané řezání. V případě ortogonálního řezání, ostří je kolmé na směr řezného pohybu a jde o dvourozměrný problém. Ortogonální řezání se realizuje při frézování frézami s přímými zuby, protahováním, hoblováním, zapichováním apod. V případě vázaného řezání, jde o třírozměrný problém. Vázané řezání se realizuje při frézování frézami se šikmými zuby, vrtáním, podélným soustružením apod.



Obr. 35 a) Ortogonální - volné řezání, b) Vázané řezání

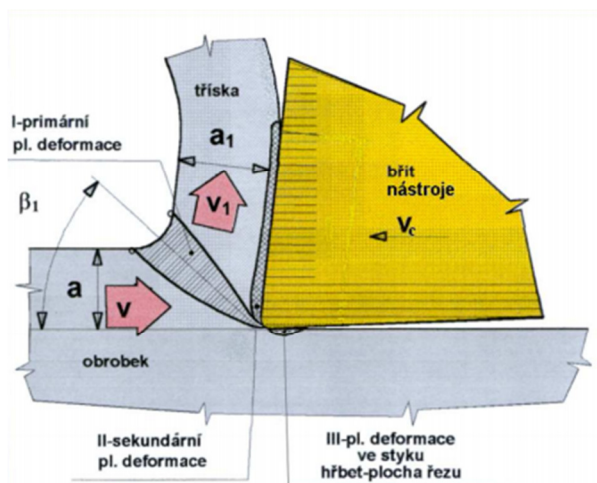
Při kontaktu břitu řezného nástroje s povrchem obrobku vzniká třísky, představující sebou odříznutou deformovanou vrstvu materiálu. Druh třísky závisí na druhu obráběného materiálu a zvolených řezných podmínkách, při nichž se materiál obrábí.

Před tvorbou třísky dochází k plastické deformaci v oblasti primární plastické deformace. Při ní se materiál zpevňuje a na konci oblasti primární plastické deformace dochází ke kluzu uvnitř materiálu, jelikož k tomu okamžiku je jeho plasticita vyčerpána.

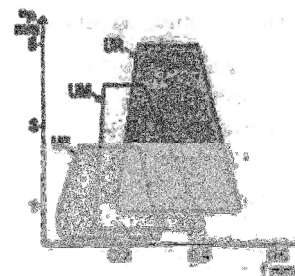
Důležitými z pohledu tvoření třísky jsou i oblasti sekundárních a terciálních plastických deformací. V oblasti sekundárních plastických deformací vlivem teploty a vysokého tlaku dochází k adhezi mezi materiálem třísky a nástrojem. V oblasti terciálních plastických deformací vlivem zaoblení břitu nástroje dochází společně ke stlačování části materiálu pod ostří nástroje a vzniku tepelných účinků. Taková působení mohou při dodržení určitých podmínek tlaku povrch



materiálu výhodně zpěvňovat nebo v případech, kdy dochází k tahu, vytvářet trhlinky na povrchu materiálu a tím jeho vlastnosti zhoršovat.



Obr. 36 Oblasti plastických deformací při obrábění



Obr. 37 Příklad oblasti vhodného utváření třísky

Tvářená tříška vzniká při obrábění většiny materiálu používaných v oblasti strojírenství. Netvořená tříška vzniká při obrábění takových materiálů, jako jsou sklo a plasty, kdy se odříznutý materiál odděluje ve formě malých částic.

V dnešní době, kdy se snaží většina obráběcích procesů automatizovat, je důležité, aby tříška měla co nejmenší délku. To je z důvodu, aby tříška dobře odcházela z místa řezu a nepoškozovala břit nástroje a aby měla co nejmenší objem, což je důležité z hlediska skladování a manipulace.

Pro výpočet řezných podmínek pro vytváření vhodné délky třísky v praxi se používají *oblasti vhodného utváření třísky*. Tyto oblasti se obvykle stanovují pro obrábění určitého druhu materiálu určitým obráběcím nástrojem. Většina výrobců obráběcích nástrojů je uvádí ve svých katalozích.

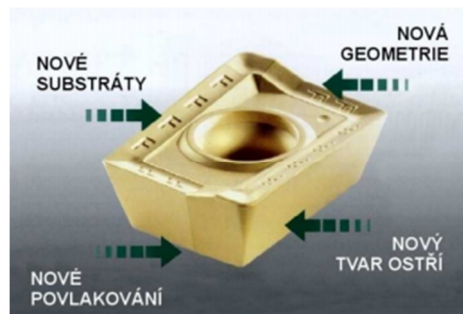
Druhy tvarů třísek vzniklých při řezání jsou definované v normě ISO 3685 a vypadají takto:

1. Stužkové * třísky	2. Vlnuté * třísky	3. Spirálové * třísky	4. Vlnité šroubovitě třísky	5. Kuželovité * šroubovitě třísky	6. Obloukovité * třísky	7. Elementární třísky	8. Jehlovité třísky
1.1. Dlouhé	2.1. Dlouhé	3.1. Ploché	4.1. Dlouhé	5.1. Dlouhé	6.1. Spojené		
1.2. Krátké	2.2. Krátké	3.2. Kuželovité	4.2. Krátké	5.2. Krátké	6.2. Dělené		
1.3. Smotané	2.3. Smotané		4.3. Smotané	5.3. Smotané			

Tab. 3 Normalizované tvary třísek při obrábění dle normy ISO 3685

Hodnocení tvarů třísek se dělá podle tabulek, ve kterých jsou uvedené různé tvary třísek a jejich tvarová vhodnost.

Ke zlepšení dělení třísek se často používají utvářeče (nebo lamače) třísek, které se vytvářejí na čelech obráběcích nástrojů. Dnes se utvářeče realizují předlisováním u vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů. Použitím nových druhů materiálu, povlaku a nových tvaru geometrie utvářečů se snaží snížit vzniklé řezné síly, zmenšit kontaktní délku třísky s čelem břitové destičky, zvýšit odvod tepla z místa řezu do třísky a prodloužit trvanlivost nástroje.



Obr. 38 Rozvojové trendy ve světě břitových destiček

Společnost Pramet již vyrábí břitové destičky s několika tvary utvářečů třísky. Tyto tvary jsou označovány:

DF	Jemné soustružení	$s = 0,1 - 0,3 \text{ mm}$	$h = 0,5 - 3 \text{ mm}$
DM	Střední soustružení	$s = 0,2 - 0,75 \text{ mm}$	$h = 1 - 6,5 \text{ mm}$
DR	Hrubování	$s = 0,3 - 0,85 \text{ mm}$	$h = 2 - 9 \text{ mm}$

Tab. 4 Označování tvarů utvářečů

## Použité stroje, nástroje a zařízení

Měření sil se provádělo na soustruhu TOS SU501500 s řídicím systémem Varispeed 616G5, který se nachází v laboratoři na obrábění Fakulty Strojní ČVUT v Praze.

Technická data	
Oběžný průměr nad ložem	500 mm
Oběžný průměr nad suportem	260 mm
Vzdálenost mezi hroty	1500 mm
Max. hmotnost obrobku	450 kg
Výkon hlavního elektromotoru	10 kW
Hmotnost stroje	2800 kg

Tab. 5 Technologické parametry soustruhu TOS SU501500

Na soustruh byl namontován piezoelektrický dynamometr typ 9265B společnosti Kistler. Dole jsou uvedena technická data tohoto zařízení, vzata z oficiálních stránek výrobce Kistler:



Technical Data			9265B	9265B
Type			+ 9411B	+9443B
Range	$F_x, F_y$	kN	-15 ... 15 <sup>9</sup>	-15 ... 15 <sup>9</sup>
	$F_z$	kN	0 ... 30 <sup>9</sup>	-10 ... 30 <sup>9</sup>
Calibrated partial range	$F_x, F_y$	kN	0 ... 1,5	0 ... 1,5
	$F_z$	kN	0 ... 3	0 ... 3
Overload	$F_x, F_y$	kN	-20/20	-20/20
	$F_z$	kN	-12/40	-12/40
Threshold		N	<0,01	<0,01
Sensitivity	$F_x, F_y$	pC/N	≈8	≈8
	$F_z$	pC/N	≈3,7	≈3,7
Linearity, all ranges		% FSO	≤±0,5	≤±0,5
Hysteresis, all ranges		% FSO	≤0,5	≤0,5
Cross talk		%	≤±2	≤±2 <sup>H</sup>
Rigidity	$c_x, c_y$	kN/μm	≈0,8	≈1
	$c_z$	kN/μm	≈2	≈2
Natural frequency	$f_n(x, y)$	kHz	≈1,5	1,7
(mounted on flanges)	$f_n(z)$	kHz	≈2,5	2,7
Operating temp. range		°C	0 ... 70	0 ... 70
Capacitance (of channel)		pF	≈500	≈500
Insulation resistance (20 °C)		Ω	>10 <sup>11</sup>	>10 <sup>11</sup>
Ground insulation		Ω	>10 <sup>8</sup>	>10 <sup>8</sup>
Protection class EN60529			IP67 <sup>9</sup>	IP67 <sup>9</sup>
Weight		kg	20	19,8
Clamping area		mm	-	135x203
Connection			Fischer flange, 9-pole neg.	

Obr. 39 Technologické parametry dynamometru KISTLER type 9265B

Dynamometr byl za pomoci speciálního stíněného kabelu napojen na zesilovač proudu Kistler 5019.



#### Technical Data\*

##### Charge amplifier

Number of measuring channels		3 ... 4
Measuring range	pC	±10 ... 999'000
Sensor sensitivity	pC / M.U.	0,01 ... 9'990 <sup>1)</sup>
Scale	M.U. / V	0,001 ... 9'990'000
Output voltage	V	±10
Output current (short-circuit protected)	mA	0 ... ±5
Output impedance	Ω	10
Frequency limit (-3dB, Filter off)	kHz	≈0 ... 200
Low-pass filter Butterworth 2 pol., 8 stages 10, 30, 100 ... (-3dB)	kHz	0,01 ... 30 (±10 %)
Time constant	Long	DC-mode
High-pass filter	Medium	1 ... 10'000
	Short	0,01 ... 100
Linearity	%	≤±0,05
Measuring error		
≤±99,9 pC FS	%	≤±3
≥± 100 pC FS	%	≤±1
Output interference	mV <sub>rms</sub>	<1,5
Drift (input current MOSFET) at 25 °C	pC/s	<±0,03

Obr. 40 Technologické parametry zesilovače KISTLER type 5019B

Zesilovač byl pomocí dvou kabelů napojen na počítač s nainstalovaným softwerm Dynoware. První kabel přenáší zesílený signál proudu ze zesilovače a pomocí druhého kabelu s COM2 rozhraním se seřazuje nastavení zesilovače přímo do počítače.

Experimentální měření měly být provedeny pro celkově šest druhů břitových destiček. První tři druhy byly dodané společností Pramet po dvou kusích v novém a použitém stavu. Zbýlé tři - jenom po jednom kuse v novém stavu.

Čtyři břitové destičky označované kódem DNMG a dvě - kódem DNMX podle konvence, kterou dodržuje i společnost Pramet měli následující vlastnosti:

Břitové destičky označované kódem WNMG měli následující vlastnosti:

### DNMG

- D - Tvar kosočtverce s úhlem špičky  $80^{\circ}$
- N - Negativní úhel hřbetu  $0^{\circ}$
- M - Tolerance rozměru m je 0,08 – 0,18 mm, rozměru s je 0,13 mm
- G – Provedení s útvařečem na obojích stranách destičky a dírou pro upnutí

### DNMX

- D - Tvar kosočtverce s úhlem špičky  $80^{\circ}$
- N - Negativní úhel hřbetu  $0^{\circ}$
- M - Tolerance rozměru m je 0,08 – 0,18 mm, rozměru s je 0,13 mm
- X – Speciální provedení

### WNMG

- W - Tvar trojúhelníku s úhlem špičky  $80^{\circ}$
- N - Negativní úhel hřbetu  $0^{\circ}$
- M - Tolerance rozměru m je 0,08 – 0,18 mm, rozměru s je 0,13 mm
- G – Provedení s útvařečem na obojích stranách destičky a dírou pro upnutí

Tyto vlastnosti byly zjištěné z katalogu břitových destiček společnosti Pramet:

ISO - SYSTÉM ZNAČENÍ VYMĚNITELNÝCH BŘÍTOVÝCH DESTIČEK ISO - SYSTÉM ZNAČENIA VYMĚNITELNÝCH REZNÝCH DOŠTIČIEK																		
1 Tvar destičky / Tvar doštičky				2 Úhel hřbetu / Úhel chrtyba				4 Provedení / Prevedenie				3 Tolerance / Tolerancia						
												Tolerance / Tolerancia [mm]			Tolerance / Tolerancia [Paľos]			
												Označení / Označenie	m (±)	s (±)	d = I.C. (±)	m (±)	s (±)	d = I.C. (±)
H	O	P	R	A	B	N	R					A	0,005	0,025	0,025	0,0002	0,001	0,0010
S	T	C	D	C	D	F	A					F	0,005	0,025	0,013	0,0002	0,001	0,0005
E	M	V	W	E	F	M	G					C	0,013	0,025	0,025	0,0005	0,001	0,0010
L	A	B	K	G	N	W	T					H	0,013	0,025	0,013	0,0005	0,001	0,0005
				E	F	M	G					E	0,025	0,025	0,025	0,0010	0,001	0,0010
				G	N	W	T					G	0,025	0,130	0,025	0,0010	0,005	0,0010
				P	O	Q	X					J	0,005	0,025	0,05 + 0,13	0,0002	0,001	0,002 + 0,005
												K	0,013	0,025	0,05 + 0,13	0,0005	0,001	0,002 + 0,005
												L	0,025	0,025	0,05 + 0,13	0,0010	0,001	0,002 + 0,005
												M	0,08 + 0,18	0,130	0,05 + 0,13	0,003 + 0,007	0,005	0,002 + 0,005
												N	0,08 + 0,18	0,025	0,05 + 0,13	0,003 + 0,007	0,001	0,002 + 0,005
												U	0,05 + 0,38	0,130	0,08 + 0,25	0,005 + 0,015	0,005	0,003 + 0,010

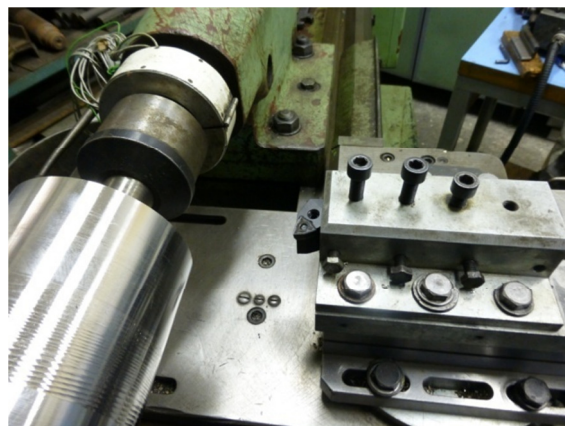
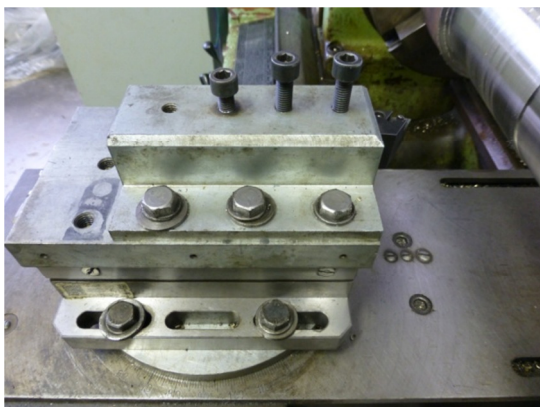
Obr. 41 Systém značení vyměnitelných břitových destiček dle ISO

Z důvodu firemního tajemství, v této práci nebudou uvedené skutečné názvy nových typů utvářečů. Místo nich budou použité nahradní názvy: AA, AB, A3 a A.



Obr. 42 Úkazka zkoumaných břitových destiček DNMG a DNMX

Každý z tvaru VBD se umišťoval do odpovídajícího držáku - tělesa nože, které mělo tvar obdélníku. Těleso se pak pomocí šesti šroubů upevňovalo do kudly namontované na dynamometr. Mezi vnitřní stěnou kudly a jednou z hran tělesa se umístila lesklá kovová podložka, aby se zabránilo chvění nástroje vlivem mikronerovností, které by se mohly objevit na hrubě opracovaném povrchu podložky.



Obr. 43.1 Úkazka upnutí tělesa nástroje do kudly s dynamometrem Obr. 43.2 Úkazka umístění systému s dynamometrem vůči obrobku

Otáčky na povrchu obrobku se kontrolovaly ručním otáčkoměrem.

Tvrdość materiálu se průběžně kontrolovala na povrchu obrobku při každé nově odebrané vrstvě. Kontrola probíhala pomocí kuličkového trdoměru.



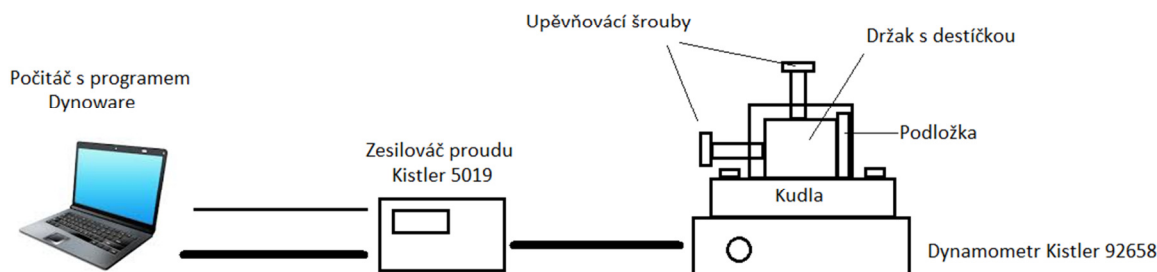
Obr. 44 Ruční otáčkoměr HT-3100



Obr. 45 Kuličkový trdoměr TEMI

Rozměr průřezu obrobku se průběžně kontroloval pomocí posuvného měřítka.

Všechna zařízení byla zapojena dle následujícího schématu:



Obr. 46 Schéma zapojení měřicích zařízení

## Obrobek

Obrobek měl v neobrobeném stavu tvar ploché tyče o průměru 150 mm a délce 800 mm. Materiálem pro obrobek byla vybraná ocel 12 050 C45.

Dle normy ČSN 12 050 zvolený druh oceli má následující vlastnosti:

Chemické složení v %:

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
0,42	0,50	0,17	max	max.	max	max	max.
0,50	0,80	0,37	0,25	0,30	0,30	0,040	0,040

Tab. 6 Chemické složení oceli 12 050 (C45)

Mechanické vlastnosti:

			12 050.1
Mez kluzu	<b>R<sub>p0,2</sub></b>	MPa	min. 325
Mez pevnosti	<b>R<sub>m</sub></b>	MPa	min. 540
Tažnost	<b>A<sub>5</sub></b>	%	min 17
Tvrdość		HB	max 225
Kontrakce	<b>Z</b>	%	
Modul pružnosti v tahu	<b>E</b>	GPa	211
Modul pružnosti ve smyku	<b>G</b>	GPa	79

Tab. 7 Mechanické vlastnosti oceli 12 050.1

Umístění proběhlo následujícím způsobem:

- Tyč byla upnuta jedním koncem do kleští a druhým do koníku soustruhu podél funkční osy X.
- Nástroj byl umístěn v ose kolmé k ose obrobku - ose Y, tak aby se ostří břitu destičky nacházelo těsně pod hlavní rotační osou obrobku a to pro lepší kontrolu procesu obrábění.

- Obrobek rotoval v záporném směru kolem osy X a při kontaktu s ostřím břitu destičky vznikala síla v ose Z.

## Řezné podmínky

Nejprve bylo potřeba roztočit obrobek takovou rychlostí, aby rychlost na špičce břitové destičky vždy byla rovna 165 m/min. Proto se při každém nastavení nové hloubky řezu přepočítávala rychlost na obvodu obrobku pomocí vzorce:

$$v_{cobv} = \frac{\pi * D_{neobrob} * n}{1000} \left[ \frac{m}{min} \right]$$

kde n - počet otáček za minutu se počítal podle vzorce:

$$n = \frac{v_{cnašp.nast.} * 1000}{\pi * D_{obrob}} \left[ \frac{ot}{min} \right]$$

Posuvným měřítkem se kontroloval rozměr průměru obrobku s ještě neodebranou vrstvou  $D_{neobrob}$ .

Kontrolní rozměr průměru obrobku po odebrání vrstvy  $D_{obrob}$  se zjišťoval na základě předpokladu o zvolené hloubce řezu  $a_p$ . Společností Pramet bylo objednáno měření pro hloubky  $a_p=1,5$  mm a  $a_p=3$ mm.

$$D_{obrob} = D_{neobrob} - 2 * a_p [mm]$$

Reálný posuv na otáčku se počítal pomocí vztahu k rychlosti posuvu  $v_f$  a počtu otáček obrobku za minutu n. Vzorec pro výpočet vypadá takto:

$$f = \frac{v_f}{n} [mm] ,$$

kde n - počet otáček za minutu se počítal podle vzorce:

$$n = \frac{v_c * 1000}{\pi * D_{obrob}}$$

## Výpočet řezné síly pomocí nepřímých metod měření:

Pro teoretický výpočet řezné síly se vycházelo z předpokladu, že ji lze vyjádřit z následujícího vztahu:

$$F_c = k_c * A_D = k_c * h_D * b_D ,$$

Kde  $b_D$  je šířka odřezávané vrstvy materiálu,  
 $h_D$  je tloušťka odřezávané vrstvy materiálu,  
 $k_c$  je měrná řezná síla.

Šířka a tloušťka odřezávané vrstvy materiálu pro úhel nastavení hlavního ostří  $\kappa_r$  se vyjádří ze vztahů:

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad ; \quad h_D = f * \sin \kappa_r$$

Pro řezání destičkami druhů DNMG a DMMX byl použit úhel nastavení  $\kappa_r = 93^\circ$ , když pro řezání destičkami druhů WNMG – úhel nastavení  $\kappa_r = 95^\circ$ . Sinusova hodnota obou úhlu může být zaokrouhlena, jelikož rozdíl 3 až 5<sup>0</sup> neuděl velký rozdíl pro teoretické výpočty. Takže  $\sin \kappa_r = 1$ , z čehož vychází, že  $b_D = a_p$  a  $h_D = f$ .

Měrná řezná síla se vyjádří pomocí vztahu:

$$k_c = C_k * R_m ,$$

Kde  $C_k$  je konstanta, jejíž hodnota pro soustružení se pohybuje v rozsahu 3 až 5,  
 $R_m$  je pevnost v tahu obrobeného materiálu.

Pro snadnější výpočet rozsahu hodnot pro řeznou sílu se použil program Microsoft Excel:

ap [mm]	f [mm]	Rm [Mpa]	Rozsah hodnot pro kc [N]				Rozsah hodnot pro Fc [N]		
1.5	0.2	540	1620	>kc>	2700	486	>Fc>	810	
1.5	0.3	540	1620	>kc>	2700	729	>Fc>	1215	
1.5	0.4	540	1620	>kc>	2700	972	>Fc>	1620	
3	0.2	540	1620	>kc>	2700	972	>Fc>	1620	
3	0.3	540	1620	>kc>	2700	1458	>Fc>	2430	
3	0.4	540	1620	>kc>	2700	1944	>Fc>	3240	

Tab. 8 Výpočet rozsahu hodnot pro řeznou sílu v programu Microsoft Excel

## Příprava obrobku k měření

Před samotným měřením byl povrch obrobku upraven. Byla odebrána kůra vzniklá oxidační vrstvou. Obrábění kůry bylo poměrně obtížné, jelikož vlastností oxidační vrstvy se liší od vlastností samotného kovu. Kůra má větší tuhost než material, který se nachází pod ní.



Pro odebrání kůry byla použita destička, která nepatřila ke zkoumaným, aby se deformace vzniklá obráběním kůry neodrazilo na výsledcích měření. Použitá hloubka řezu byla  $a_p=3$  mm, řezná rychlost na špičce 165 m/min.

Rychlost na obvodu obrobku se spočítala dle vzorce:

$$v_{cobb} = \frac{\pi * D_{neobrob} * n}{1000} = \frac{\pi * 150 * 364,92}{1000} = 171,875 \text{ m/min}$$

Kde počet otáček za minutu  $n$  byl zjištěn pomocí vzorce:

$$n = \frac{v_{cnašp.nast.} * 1000}{\pi * D_{obrob}} = \frac{165 * 1000}{\pi * 144} = 364,92 \text{ ot/min}$$

Rychlost na obvodu se pak kontrolovala pomocí ručního otáčkoměru.

Reálný posuv na otáčku  $f$  byl spočítán z posuvové rychlosti  $V_f$ . Výpočet se prováděl podle vzorcu:

$$f = \frac{V_f}{n} = \frac{70}{364,73} = 0,192 \text{ mm}$$

Posuvová rychlost  $V_f$  byla naměřená na bežícím soustruhu pomocí stopek. Za dobu měření 1 min se soustruh posunul o 70 mm.

Otáčky soustruhu pak byly zjištěné dle vzorce:

$$n = \frac{v_c * 1000}{\pi * D_{obrob}} = \frac{171,2 * 1000}{\pi * 150} = 364,73 \text{ ot/min}$$

Po odebrání prvních 3 mm z povrchu na hrubo, se zjistilo, že na povrchu obrobku zůstaly korodovaná místa. Proto byly odebrané ještě dvě vrstvy:

- Na hrubo, hloubka řezu  $a_p=3$  mm, řezná rychlost  $V_c=165$  m/min, posuv  $f=0,192$  mm.
- Na čisto, hloubka řezu  $a_p=0,65$  mm, řezná rychlost  $V_c=165$  m/min, posuv  $f=0,192$  mm.

Poté měl obrobek lesklý hladký povrch s malou drsností a byl připraven k měření.

### **Kalibrace měření**

Pro kalibraci měření byli použité dvě závaží o hmotnosti 10 a 20 kg, které se umístily ve směru osy Z, jelikož vyvolaná řezná síla  $F_z$  bude největší ze tří zkoumaných sil:  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ .

Teoretická síla vyvolaná zavažím se počítala dle vzorce:

$$F_{z\text{teor}} = m_{\text{zavaží}} * g$$

Pro zavaží o hmotnosti 10 kg, hodnota teoretické síly Fz měla být:

$$F_{z\text{teor}} = m_{\text{zavaží}} * g = 10 * 9,81 = 98,1 \text{ N}$$

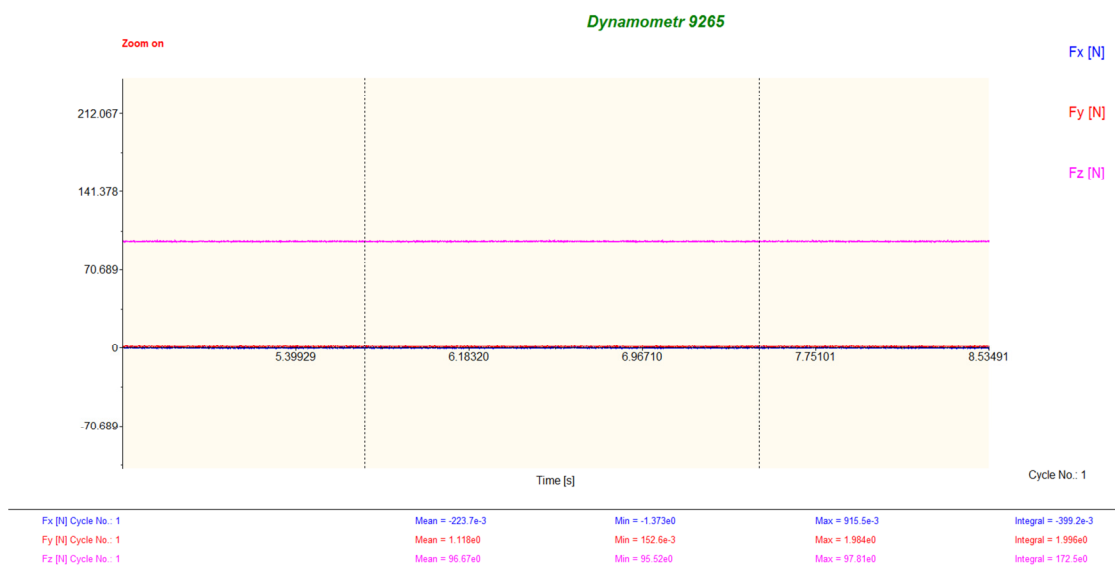
Pro zavaží o hmotnosti 20 kg, hodnota teoretické síly Fz měla být:

$$F_{z\text{teor}} = m_{\text{zavaží}} * g = 20 * 9,81 = 196,2 \text{ N}$$

V programu Dynoware se pak byla naměřená data:

Pro zavaží 10 kg, Fz = 96,67 N

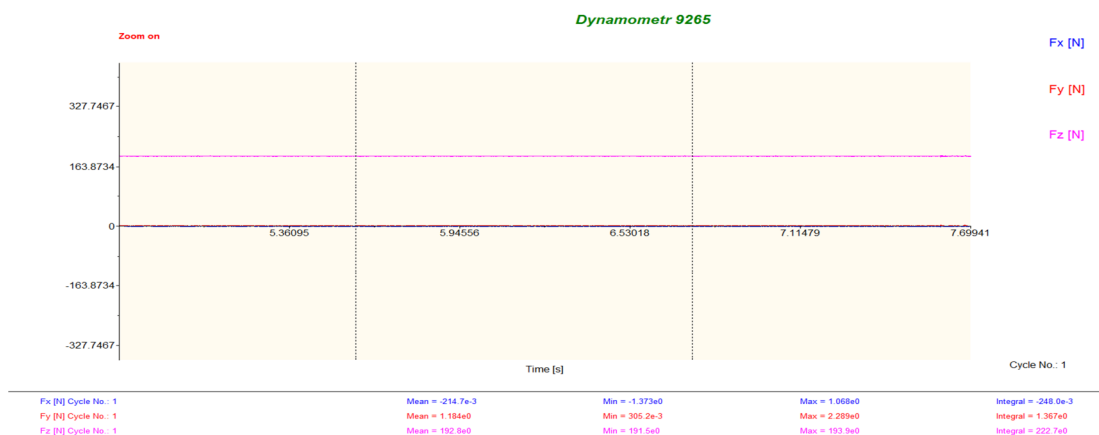
Chyba měření je:  $98,1 - 96,67 = 1,43 \text{ N}$ , což odpovídá chybě v 1,48%



Obr. 47 Zkouška zatížení silou 98,1 N v ose Z v programu Dynoware

Pro závaží 20 kg, Fz=192,8 N

Chyba měření je:  $196,2 - 192,8 = 3,4 \text{ N}$ , což odpovídá chybě v 1,73%



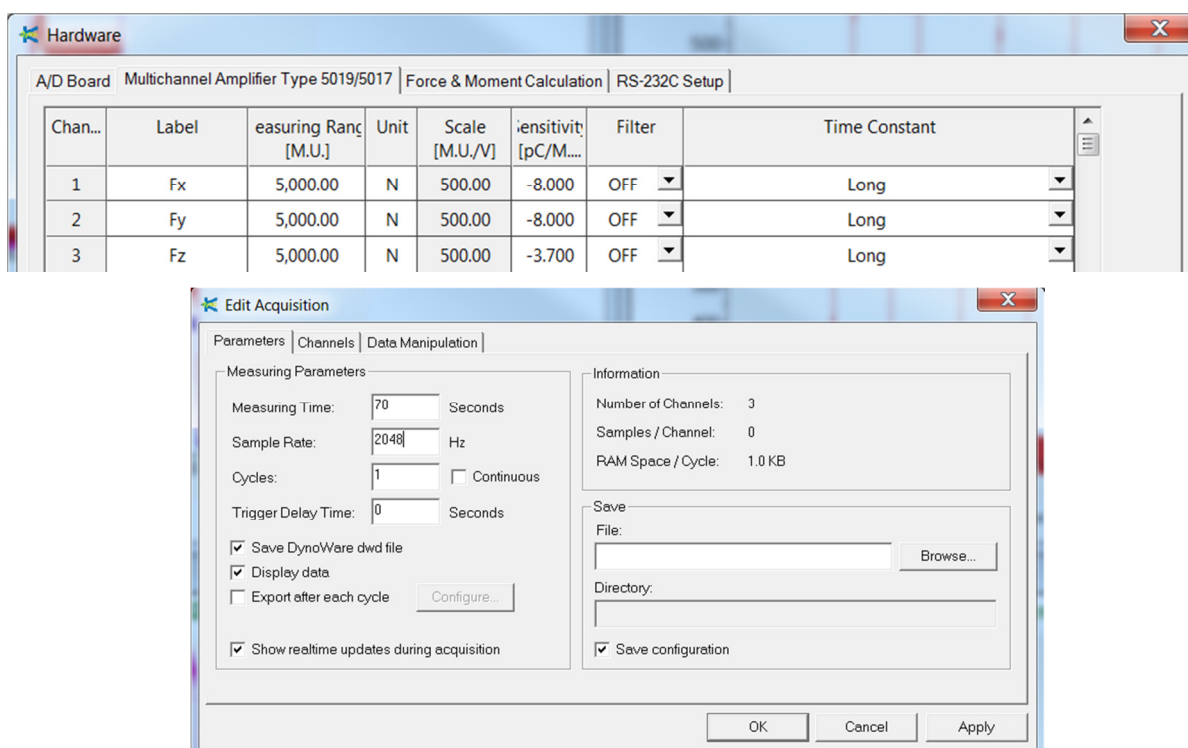
Obr. 48 Zkouška zatížení silou 196,2 N v ose Z v programu Dynoware

Chyby měření se nacházejí v přípustném pásmu, což znamenalo, že s naladěnými konfiguracemi lze začít s samotným měřením řezných síl.

## Nastavení v programu Dynoware

Aby se ostří břitů destiček zbytečně neopotřebovalo, a zároveň aby byly dosaženy výsledky co nejvíce odpovídající skutečnému měření, bylo potřeba se rozhodnout o délce intervalu obrábění. Řezná síla měla mít dost času se ustálit po náraze břitů ostří na obráběnou vrstvu materiálu a pro více přesné měření bylo rozhodnuté o třech intervalech obrábění o době 7 až 15 sekund. Celkový čas po třech následných měřeních byl zvolen za 70 sekund.

Nastavení pro software Dynoware bylo zvoleno takto:



Obr. 49 Nastavení parametrů pro měření v programu Dynoware

Rozsah hodnot pro síly byl nastaven pro maximální hodnoty  $\pm 5000\text{ N}$  s dobou měření 70 sekund a filtrací vzorku 2048 Hz. Celková filtrace byla vypnuta, aby se dalo vidět celkový rozkmit hodnot a aby odpovídající filtrace mohla být zvolena později při fázi zpracování naměřených hodnot.

Pro jednodušší orientaci v souborech s měřením, byla zvolena následující konvence jejich názvu:

*Kod destičky - označení testovaného utvařeče \_ poznámka, jestli je destička nová nebo použitá \_ posuv \_ hloubka řezu \_ test123*

Příklad názvu souboru s měřením:

Celkový seznam vytvořených v souboru včetně řezných podmínek může být nalezen v příloze k práci o protokolech měření.

## **Průběh měření**

Samotné měření složek řezných sil probíhalo ve třech fázích.

*První fází* bylo měření sil pro břitové destičky DNMG a DNMX. Destičky se postupně umiřovaly do držáku, který sloužil tělesem nože pro kosočtvercový tvar VBD. Pořadí měření se volilo s ohledem na zachování co nejmenší potřeby manipulace s přepnutím destiček.

*Druhou fází* bylo měření sil pro břitové destičky WNMG. Tentokrát se za těleso nože použil jiný držák, odpovídající trojúhelníkovému tvaru VBD. Pořadí měření se volilo obdobným způsobem jako u první fáze.

*Třetí fází* bylo přeměření hodnot sil, které neodpovídaly teoretickému předpokladu.

První fáze měření proběhla s proměnlivým úspěchem. Zvolené řezné podmínky ne vždy zapadaly do oblasti vhodného utváření třísky pro dané tvary destiček, což občas působilo tvoření dlouhé třísky. K tomu, zvolené řezné podmínky několikrát vyvolávaly kmitání obrobku vůči nástroji, především v místě upnutí na koníku soustruhu, kde boční házení bylo největší. Kmitání negativně působilo na drsnost obrobeného povrchu a projevovalo se charakteristickým zvukem při obrábění. Nejvíce důležitým účinkem kmitání bylo, že při měření se objevovaly velmi různorodé hodnoty a po jejich následném filtrování a porovnání s ostatními naměřenými hodnoty mohly vzniknout neobjektivní výsledky.

Nejvíce kmitáním byla ovlivněna měření, kdy se použily najednou hloubka řezu  $a_p=3$  mm a posuv  $f=0,4$  mm. Toto měření pak bylo provedené ještě jednou v místech, kde boční házení bylo menší a to uprostřed obrobku, nebo poblíž konce, který byl upnut do kleští.

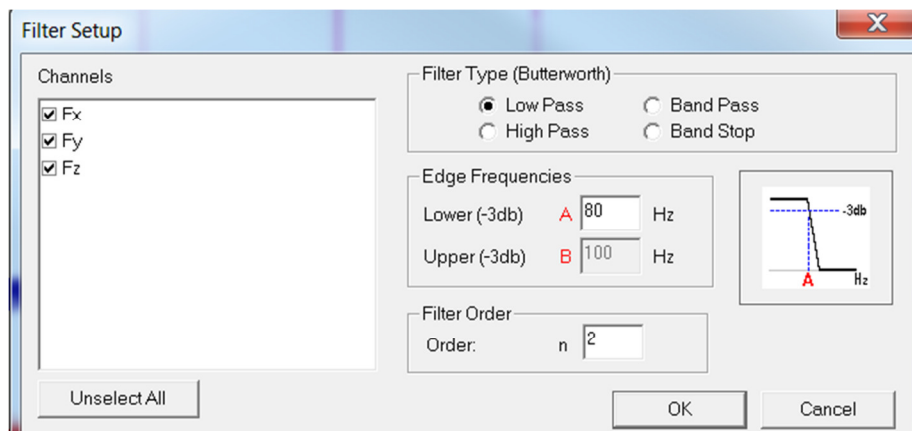
Druhá fáze měření proběhla s větší úspěšností a pořadí měření se upravilo tak, aby se nejvíce namáhající řezné podmínky volili pro místa s menším bočním házením.

Třetí fáze byla nutná, protože u několika měření vyšly hodnoty sil, které neodpovídají předpokladům teorie obrábění. Po přeměření se zjistilo, že několik měření bylo opravdu uděláno špatně a hodnoty se obdobně opravily.

## **Zpracování a vyhodnocení výsledků měření**

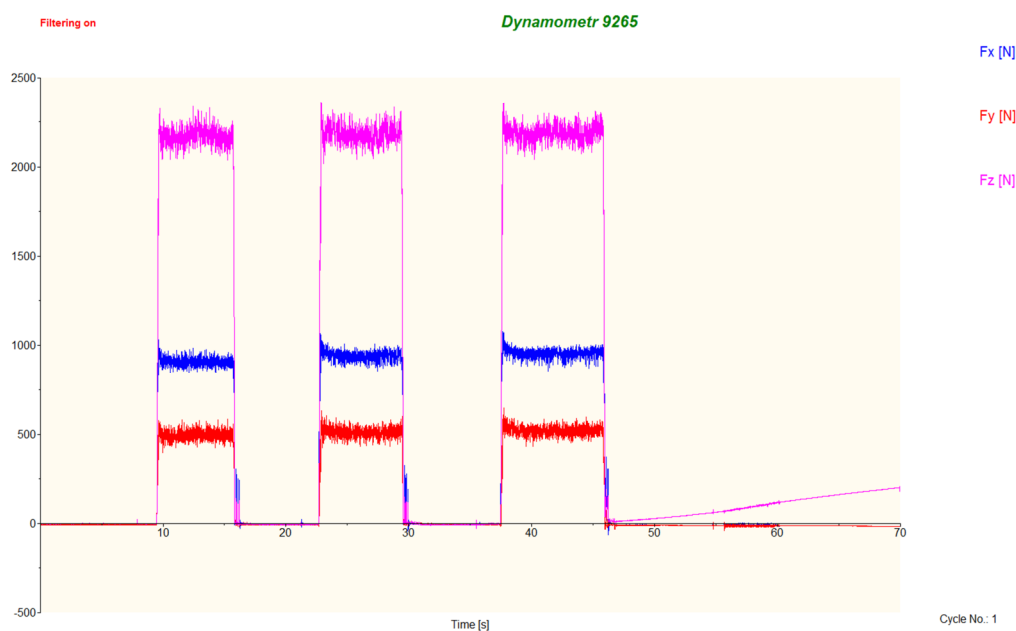
Poté, jak byly vytvořené soubory s měřením, bylo za potřebí zpracovat naměřené hodnoty v programu Dynoware.

Každý ze souboru obsahoval tři měření. Pro lepší znázornění hodnot se použila filtrace dle dolního pásma a frekvenci 80 Hz:



Obr. 50 Nastavení parametrů filtrace v programu Dynoware

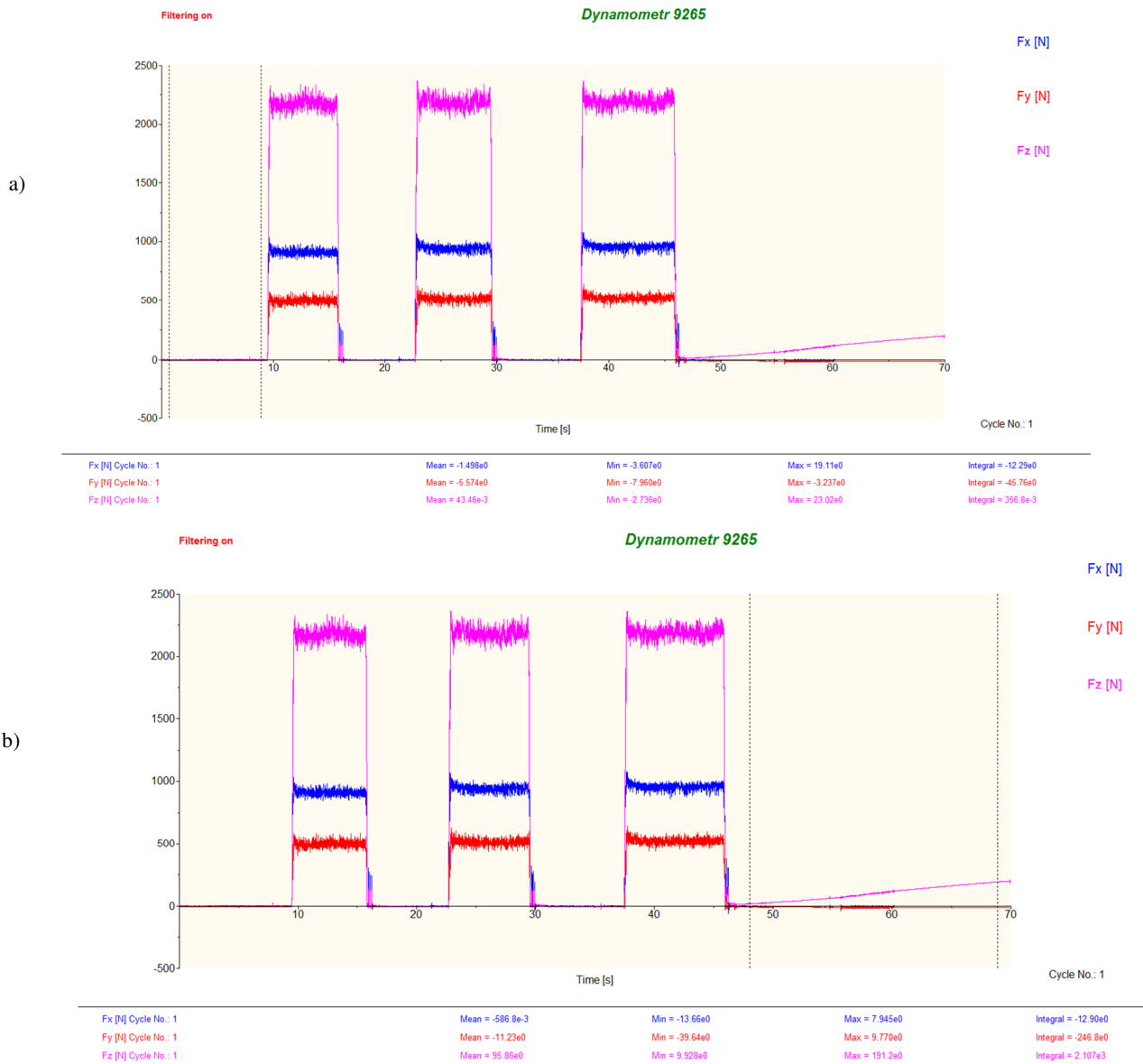
Příklad, jak naměřené hodnoty vypadají po filtraci:



Obr. 51 Úkazkový průběh hodnot složek řezné síly po filtraci v programu Dynoware

Z grafu už se dá vyjadřit průměrná hodnota pro každou ze sil. Tato průměrná hodnota je ale ještě ovlivněná signálem od vibrací a zbytkového napětí.

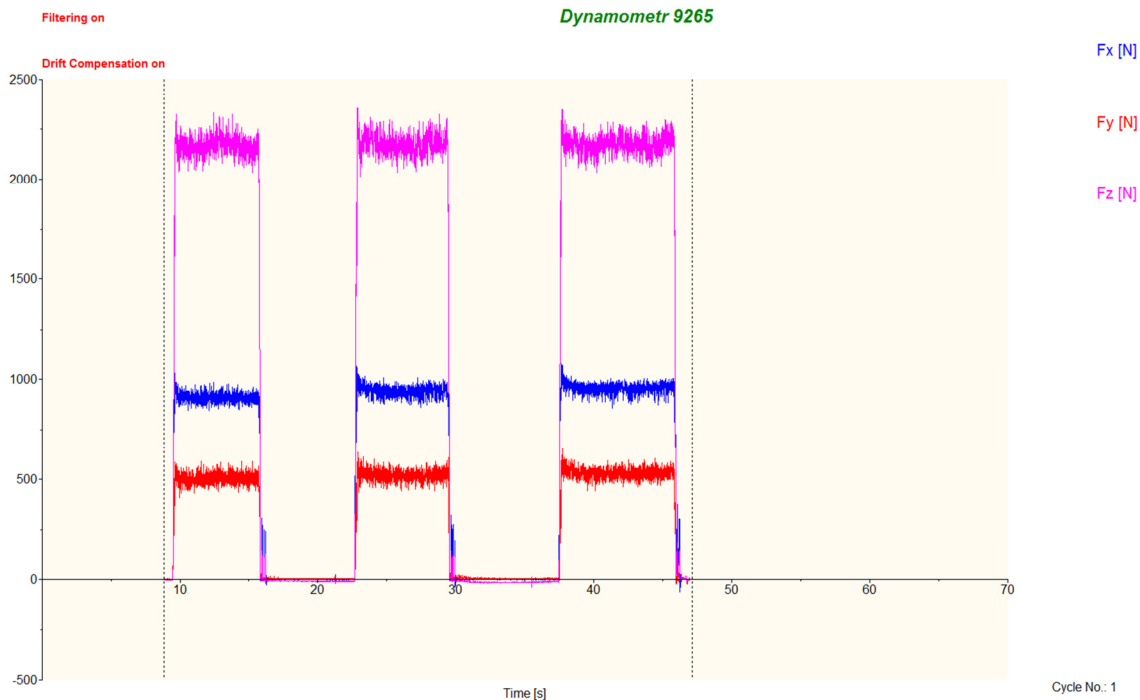
Vyhodnocení vlivu vibrací nástroje před obráběním a napětí, které zbylo v dynamometru po ukončení obrábění a odvedení nástroje od povrchu obrobku je uděláno pomocí funkcí *Mean Value* (Zjištění mediánu) v programu Dynoware.



Obr. 52 Oblast v níž se provádí kompenzace signálu v programu Dynoware a) těsně před kontaktem bříty s obrobkem, b) těsně po odvedení bříty od obrobku

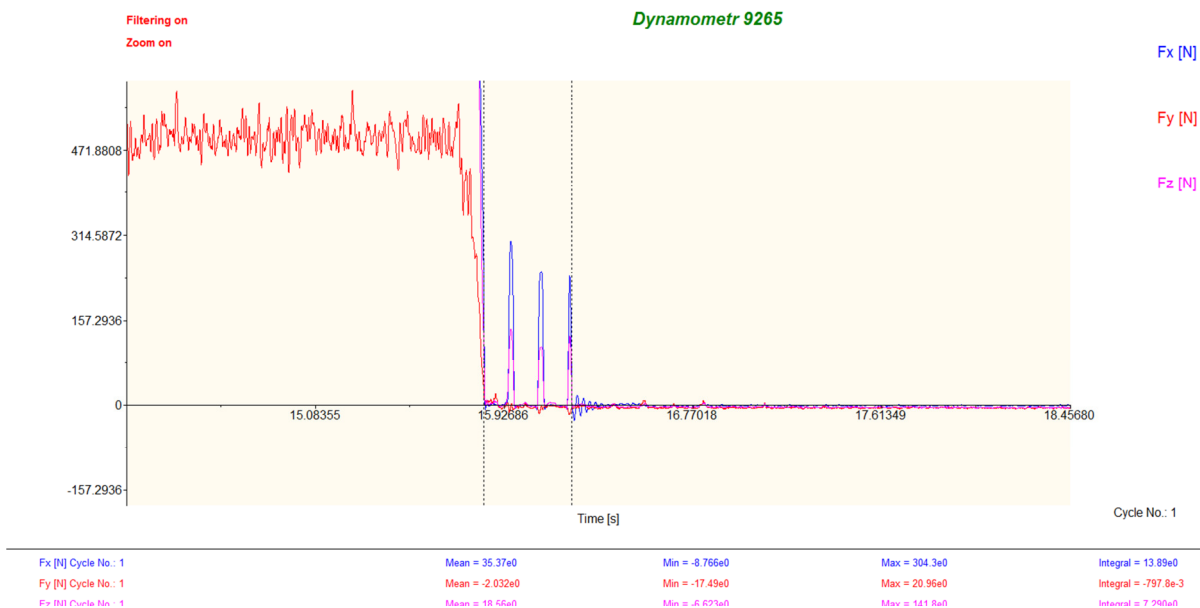
V uvedeném příkladu naměřenou hodnotu sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$  je potřeba upravit o průměrnou hodnotu vibrací nástroje a průměrnou hodnotou zbytkového napětí. Toto je možné udělat pomocí další funkce programu Dynoware *Signal drift compensation* (Kompenzace signálu o hodnotu posunu, vzniklého okolními jevy).

Po použití této funkce graf vypadá takto:



Obr. 53 Průběh hodnot složek řezné síly po kompenzaci šumů

Teď je možné začít pracovat s vyhodnocením průměrných hodnot sil  $F_x$ ,  $F_y$  a  $F_z$ . Vyhodnocení probíhá pomocí funkce *Mean Value* (Zjištění mediánu) v programu Dynoware. Pro snadnější výpočet sil se vybíralo pásmo uprostřed měření: poté, jak se ustálila řezná síla po naražení břitu nástroje a před tím, jak břit nástroje začal škrtnat při odvedení z povrchu materiálu. Na grafu pásma škrtnání břitu je vidět jako hodnotu zbytkového napětí po ukončení každého z měření.



Obr. 54 Zjištění hodnoty zbytkového napětí, které zůstalo v dynamometru po ukončení obrábění pomocí funkce Mean Value v programu Dynoware

Takto vypadá měření mediánu z prvního pásma hodnot sil a stejné měření se pak provedlo u všech tří pásmech hodnot naměřených sil:



Obr. 55 Zjištění hodnot složek řezných sil pomocí funkce Mean Value v programu Dynoware

Poté, jak byla stanovena průměrná hodnota pro každou ze sil, jí bylo potřeba upravit o hodnoty vlivů šumů, které zůstaly po kompenzaci vibrací nástroje a zbytkového napětí.

Pro pohodlnost vyhodnocení byla vytvořena tabulka v programu Microsoft Excel.

WNMG ap=3 mm													Naměřená data			Výsledky		
číslo měření	Fxs0	Fxk0	Fxmer	Fx	Fys0	Fyk0	Fymer	Fy	Fzs0	Fzk0	Fzmer	Fz	Ff (=Fx)	Fp (=Fy)	Fc (=Fz)			
WNMG-AA_new_f02_ap3_test123	0.399	-0.09887	728.7	728.5499	24.01	25.55	347.2	322.42	7.175	3.023	1284	1278.901	735.782	347.0562	1281.432			
WNMG-AA_new_f02_ap3_test124	0.00101	-0.1	722.9	722.9495	8.928	12.96	349.6	338.656	-5.843	1.268	1267	1269.288						
WNMG-AA_new_f02_ap3_test125	0.2954	-0.1883	755.9	755.8465	10.1	-0.485	384.9	380.0925	-1.251	-2.964	1294	1296.108						
WNMG-AA_new_f03_ap3_test123	0.5768	0.9822	846	845.2205	63.3	69.32	594.6	528.29	20.83	21.52	1711	1689.825						
WNMG-AA_new_f03_ap3_test124	-0.2045	0.7769	849.6	849.3138	53.92	88.47	609.5	538.305	3.776	23.23	1710	1696.497	852.5866	530.2517	1694.482			
WNMG-AA_new_f03_ap3_test125	1.668	2.281	865.2	863.2255	67.48	122.4	619.1	524.16	10.57	43.18	1724	1697.125						
WNMG-AA_new_f04_ap3_test123	6.248	2.167	904.7	900.4925	2.756	9.114	511.5	505.565	-2.047	-15.45	2135	2143.749						
WNMG-AA_new_f04_ap3_test124	0.7833	-4.107	914.7	916.3619	8.9	5.862	529.3	521.919	-21.24	-36.12	2137	2165.68	916.0166	519.7593	2159.301			
WNMG-AA_new_f04_ap3_test125	-5.931	-10.06	923.2	931.1955	3.581	4.231	535.7	531.794	-32.6	-6.347	2149	2168.474						
WNMG-A_new_f02_ap3_test123	0.2405	0.04057	661.9	661.7595	-0.5431	27.08	372.2	358.9316	-0.5716	8.035	1221	1217.268						
WNMG-A_new_f02_ap3_test124	0.1725	0.3043	662.4	662.1616	13.01	10.3	378.7	367.045	-1.639	-1.94	1212	1213.79	662.4531	373.4754	1216.996			
WNMG-A_new_f02_ap3_test125	0.2299	0.09347	663.6	663.4383	4.918	0.1826	397	394.4497	-1.243	-2.615	1218	1219.929						
WNMG-A_new_f03_ap3_test123	-0.6318	-0.1274	776.7	777.0796	-3.181	29.5	520.4	507.2405	-10.49	-26.03	1658	1676.26						
WNMG-A_new_f03_ap3_test124	0.1033	0.947	788.7	788.1749	14.66	13.57	537.9	523.785	-42.63	-36.39	1658	1697.51	786.106	527.12	1697.856			
WNMG-A_new_f03_ap3_test125	1.037	1.436	794.3	793.0635	3.842	0.08918	552.3	550.3344	-35.75	-7.844	1698	1719.797						
WNMG-A_new_f04_ap3_test123	0.3898	0.7833	947.2	946.6135	0.4014	6.563	605.7	602.2178	-3.99	-34.07	2195	2214.03						
WNMG-A_new_f04_ap3_test124	0.583	0.4746	964.4	963.8712	1.3	1.68	634	632.51	-47.43	-50.08	2204	2252.755	962.4477	627.3626	2246.046			
WNMG-A_new_f04_ap3_test125	-0.02913	-0.08806	976.8	976.8586	0.6521	1.228	648.3	647.36	-44.93	-3.774	2247	2271.352						
WNMG-AB_new_f02_ap3_test123	-0.06964	-0.01754	714	714.0436	21.51	16.69	359.1	340	8.373	0.6117	1257	1252.508						
WNMG-AB_new_f02_ap3_test124	0.07599	0.2158	719.3	719.1541	6.454	18.4	412	399.573	-4.896	3.179	1287	1287.859	718.4687	386.0282	1276.89			
WNMG-AB_new_f02_ap3_test125	0.2741	-0.09112	722.3	722.2085	7.237	-2.26	421	418.5115	0.133	-2.74	1289	1290.304						
WNMG-AB_new_f03_ap3_test123	-0.2146	-0.4158	855.2	855.5152	0.6489	28.73	560.4	545.7106	-3.705	-24.48	1818	1832.093						
WNMG-AB_new_f03_ap3_test124	-0.2267	-0.2528	858.2	858.4398	13.57	31.86	639.1	616.385	-38.9	-44.16	1796	1837.53	861.756	614.4452	1843.686			
WNMG-AB_new_f03_ap3_test125	-0.2519	-0.374	871	871.313	19.65	-0.73	690.7	681.24	-37.33	-5.541	1840	1861.436						
WNMG-AB_new_f04_ap3_test123	-1.502	-0.626	909.2	910.264	-5.603	-4.717	497.2	502.36	0.1204	-4.054	2172	2173.967						
WNMG-AB_new_f04_ap3_test124	-0.4792	-0.1735	939.5	939.8264	-4.797	-2.431	511.2	514.814	-4.287	-4.861	2180	2184.574	934.1367	514.3062	2179.185			
WNMG-AB new f04 ap3 test125	0.3167	0.04351	952.5	952.3199	3.357	0.7538	527.8	525.7446	-19.79	-6.24	2166	2179.015						

Tab. 9 Tabulka pro vyhodnocení vlivu šumů a zprůměrování hodnot složek řezné síly

Sloupce Fxs0, Fys0 a Fzs0 odpovídají mediánu šumů, zjištěných z pásma hodnot sil těsně před začátkem každého cyklu obrábění a sloupce Fxk0, Fyk0 a Fzk0 - mediánu šumů, zjištěných těsně po ukončení cyklu obrábění. Pak každá z hodnot sil se upravila podle vzorce:

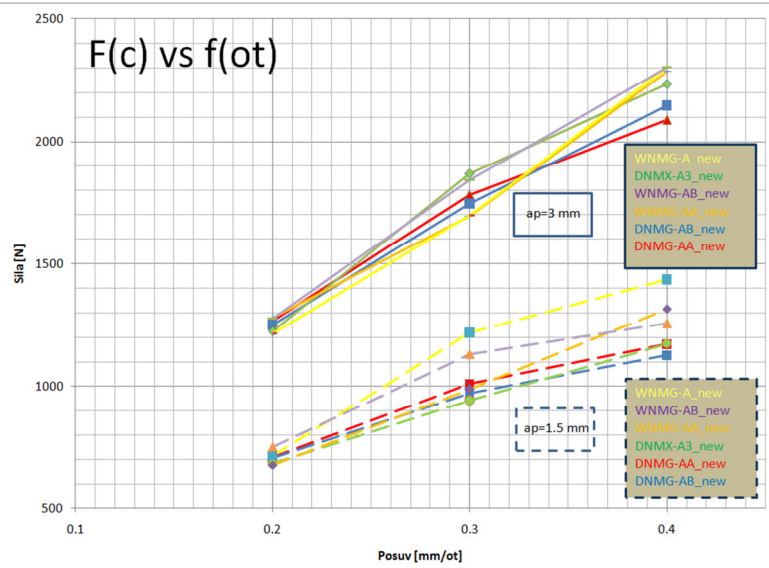
$$F_{vysl} = F_{mer} - (Fs0 + Fk0)/2$$

Pro lepší znázornění a porovnání byly výsledky pomocí programu Microsoft Excel zpracované do grafu:



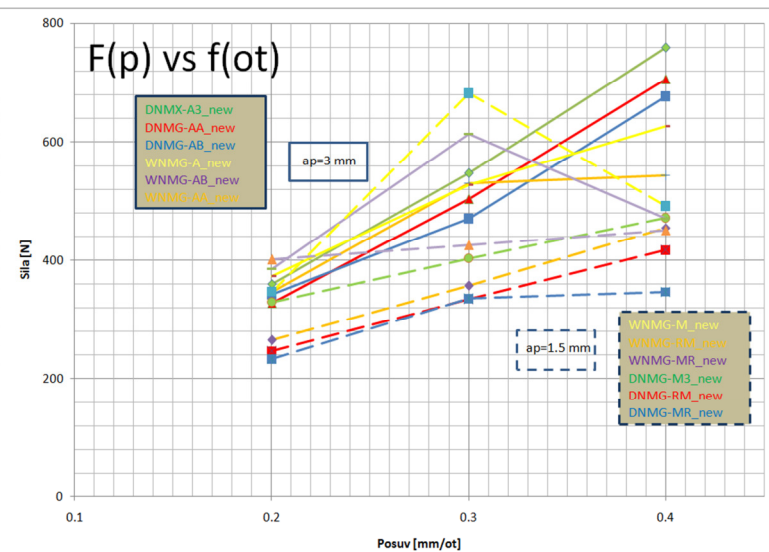
Fc = Fz				
DNMG-AA_new	DNMG-AB_new	DNMX-A3_new	f	ap
1269	1251	1226	0.2	3
1782	1747	1869	0.3	3
2090	2147	2235	0.4	3
712	708	685	0.2	1.5
1012	972	944	0.3	1.5
1174	1127	1175	0.4	1.5
WNMG-AA_new	WNMG-A_new	WNMG-AB_new	f	ap
1281	1217	1277	0.2	3
1694	1698	1844	0.3	3
2289	2305	2305	0.4	3
680	718	754	0.2	1.5
989	1220	1133	0.3	1.5
1318	1435	1257	0.4	1.5

a)



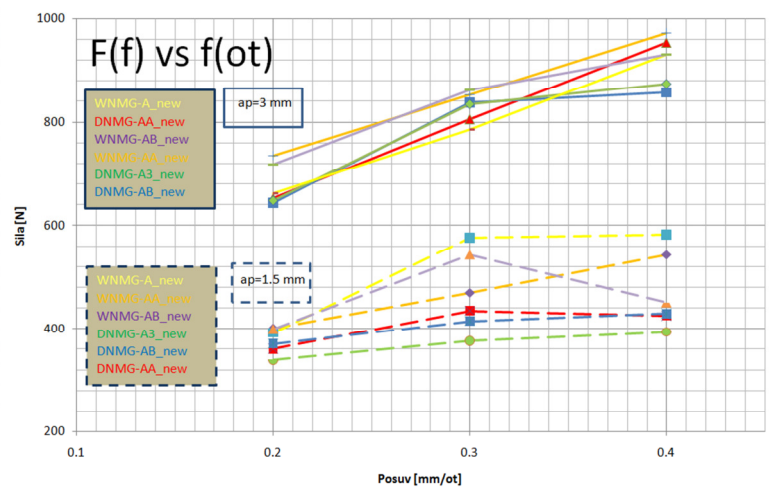
Fp = Fy				
DNMG-AA_new	DNMG-AB_new	DNMX-A3_new	f	ap
328	343	361	0.2	3
503	470	547	0.3	3
707	678	760	0.4	3
247	234	330	0.2	1.5
335	336	403	0.3	1.5
417	347	472	0.4	1.5
WNMG-AA_new	WNMG-A_new	WNMG-AB_new	f	ap
347	373	386	0.2	3
530	527	614	0.3	3
544	627	471	0.4	3
265	348	402	0.2	1.5
358	683	425	0.3	1.5
455	492	450	0.4	1.5

b)



Ff = Fx				
DNMG-AA_new	DNMG-AB_new	DNMX-A3_new	f	ap
653	643	648	0.2	3
805	837	834	0.3	3
954	858	874	0.4	3
360	370	339	0.2	1.5
435	415	376	0.3	1.5
425	429	393	0.4	1.5
WNMG-AA_new	WNMG-A_new	WNMG-AB_new	f	ap
736	662	718	0.2	3
853	786	862	0.3	3
972	931	931	0.4	3
400	392	399	0.2	1.5
470	576	543	0.3	1.5
543	582	450	0.4	1.5

c)



Obr. 56 Porovnání jednotlivých složek řezné síly všech druhů destiček a) Řezná složka, b) Pasivní složka, c) Posuvová složka

## Výpočet složek řezné síly

Velikost výsledné řezné síly pro určité řezné podmínky u jednotlivých způsobů obrábění v praxi se určuje na základě experimentálně stanovených vztahu jednotlivých složek řezné síly k hodnotám hloubky řezu a posuvu. Závislost mezi těmito vztahy má obvykle polytropický charakter a naměřené hodnoty se proloží mocninou křivkou. Vzniklé koeficienty se pak představí ve tvaru:

- Materiálových konstant, jejichž hodnoty závisí na mechanických vlastnostech materiálu obrobku, řezné rychlosti, geometrii břitu a řezném prostředí
- Exponentů vlivů hloubky řezu a posuvu, jejichž hodnoty závisí na tloušťce třísky a způsobu soustružení (podélné, zapichování, tvarové apod.)

Pro znázornění teoretického výpočtu hodnot složek řezné síly v této práci byl použit průběh naměřených hodnot pro destičku WNMG-M3.

Výpočet hodnot se prováděl na základě vztahů z kapitoly "Řezné síly při obrábění" v této práci:

$$F_c = C_{F_c} * a_p^{x_{F_c}} * f^{y_{F_c}}$$

$$F_p = C_{F_p} * a_p^{x_{F_p}} * f^{y_{F_p}}$$

$$F_f = C_{F_f} * a_p^{x_{F_f}} * f^{y_{F_f}}$$

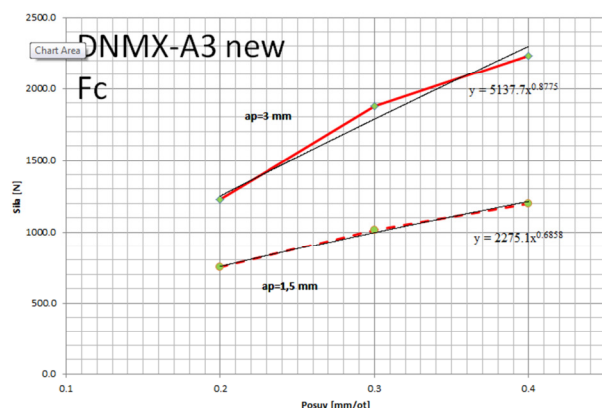
kde  $C_{F_c}$ ,  $C_{F_f}$ ,  $C_{F_p}$  jsou materiálové konstanty

$x_{F_c}$ ,  $x_{F_f}$ ,  $x_{F_p}$  jsou exponenty vlivu hloubky řezu

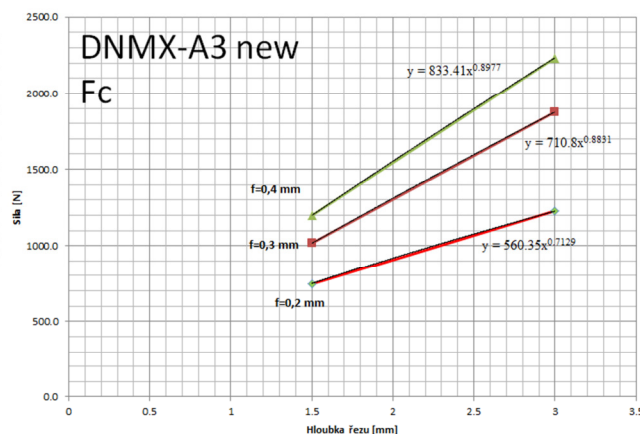
$y_{F_c}$ ,  $y_{F_f}$ ,  $y_{F_p}$  jsou exponenty vlivu posuvu

V programu Microsoft Excel byly vytvořeny dva grafy pro každou ze složek řezné síly, ve kterých byla znázorněna jejich změna v závislosti na hloubce řezu a hodnotě posuvu. Za předpokladu, že tato změna má polytropický charakter, jednotlivé body měření byly proloženy mocninou křivkou.

### Řezná složka výsledné řezné síly:



Obr. 57.1 Závislost řezné složky výsledné řezné síly na posuvu



Obr. 57.2 Závislost řezné složky výsledné řezné síly na hloubce řezu

Pro snadnější výpočet vztah pro výpočet řezné složky byl upraven pro závislosti vzniklé ve grafech.

$$F_c = C_{F_{cf}} * f^{y_{F_c}}$$

$$F_c = C_{F_{cap}} * a_p^{x_{F_c}}$$

Následně z grafů byl proveden výpočet exponentů vlivu posuvu  $y_{F_c}$  a hloubky řezu  $x_{F_c}$  a byl stanoven aritmetický průměr jejich hodnot:

$$y_{F_c} = \frac{0,685+0,877}{2} = 0,781$$

$$x_{F_c} = \frac{0,712+0,883+0,897}{3} = 0,831$$

Na základě zprůměrovaných hodnot exponentů a koeficientu zjištěných z grafů byl proveden výpočet materiálové konstanty  $c_{F_c}$ :

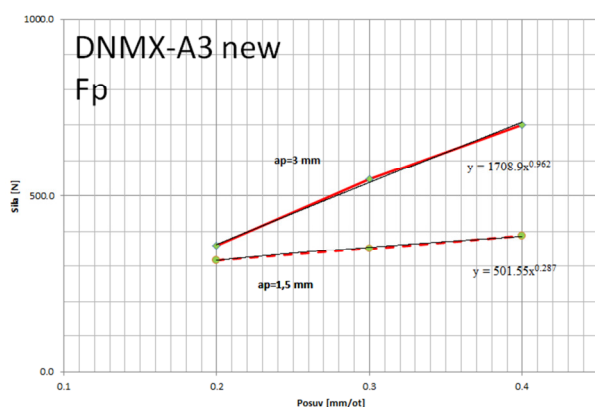
$$C_{F_c}^I = \frac{C_{F_{cf}}}{a_p^{x_{F_c}}} = \frac{2275}{1,5^{0,831}} = 1624,2 ; \quad C_{F_c}^{II} = \frac{C_{F_{cf}}}{a_p^{x_{F_c}}} = \frac{5137}{3^{0,831}} = 2061,7$$

$$C_{F_c}^{III} = \frac{C_{F_{cf}}}{f^{y_{F_c}}} = \frac{560,3}{0,2^{0,781}} = 1969,3 ; \quad C_{F_c}^{IV} = \frac{C_{F_{cf}}}{f^{y_{F_c}}} = \frac{710}{0,3^{0,781}} = 1818,1 \quad C_{F_c}^{III} = \frac{C_{F_{cf}}}{f^{y_{F_c}}} = \frac{833,4}{0,4^{0,781}} = 1704,7$$

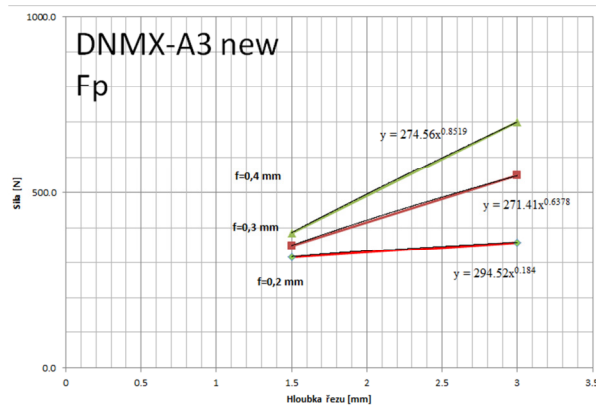
$$C_{F_c} = \frac{1624,2 + 2061,7 + 1969,3 + 1818,1 + 1704,7}{5} = 1835,6$$

### Pasivní složka výsledné řezné síly:

Obdobně se provedl výpočet pasivní složky výsledné řezné síly.



Obr. 58.1 Závislost pasivní složky výsledné řezné síly na posuvu



Obr. 58.2 Závislost pasivní složky výsledné řezné síly na hloubce řezu

Úpravené vztáhy:

$$F_p = C_{F_{pf}} * f^{y_{F_p}}$$

$$F_p = C_{F_{pap}} * a_p^{x_{F_p}}$$

Výpočet exponentů vlivu posuvu  $y_{F_p}$  a hloubky řezu  $x_{F_p}$ :

$$y_{F_p} = \frac{0,287+0,962}{2} = 0,625$$

$$x_{F_p} = \frac{0,184+0,637+0,851}{3} = 0,557$$

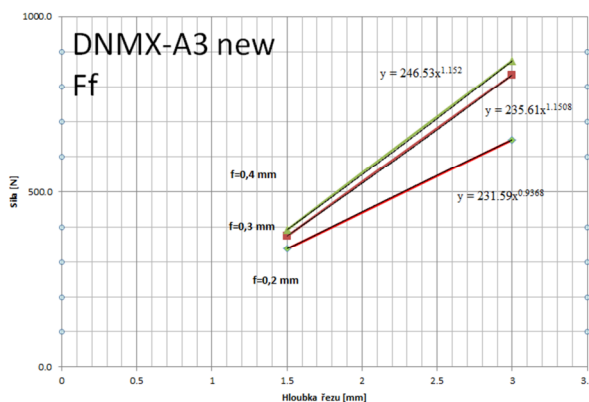
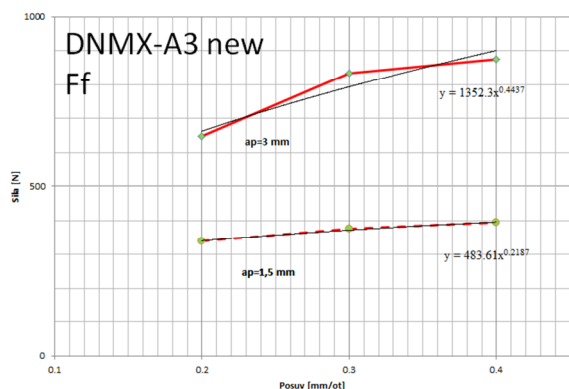
Výpočet materiálové konstanty  $c_{F_p}$ :

$$C_{F_p}^I = \frac{C_{F_{pf}}}{x_{F_p}} = \frac{501,5}{1,5^{0,557}} = 400,1; \quad C_{F_p}^{II} = \frac{C_{F_{pf}}}{a_p} = \frac{1708}{30,557} = 926,3$$

$$C_{F_p}^{III} = \frac{C_{F_{pf}}}{f^{y_{F_p}}} = \frac{294,5}{0,2^{0,625}} = 805,3; \quad C_{F_p}^{IV} = \frac{C_{F_{pf}}}{f^{y_{F_p}}} = \frac{271,4}{0,3^{0,625}} = 576; \quad C_{F_p}^{V} = \frac{C_{F_{pf}}}{f^{y_{F_p}}} = \frac{274,5}{0,4^{0,625}} = 486,7$$

$$C_{F_p} = \frac{400,1 + 926,3 + 805,3 + 576 + 486,7}{5} = 638,88$$

**Posuvová složka výsledné řezné síly:**



Obr. 59.1 Závislost posuvové složky výsledné řezné síly na posuvu

Obr. 59.2 Závislost posuvové složky výsledné řezné síly na hloubce řezu

Upravené vztahy:

$$F_f = C_{F_{ff}} * f^{y_{F_f}}$$

$$F_f = C_{F_{fap}} * a_p^{x_{F_f}}$$

Výpočet exponentů vlivu posuvu  $y_{F_f}$  a hloubky řezu  $x_{F_f}$ :

$$y_{F_f} = \frac{0,218 + 0,443}{2} = 0,331$$

$$x_{F_f} = \frac{0,936 + 1,15 + 1,152}{3} = 1,079$$

Výpočet materiálové konstanty  $c_{F_f}$ :

$$C_{F_f}^I = \frac{C_{F_{ff}}}{x_{F_f}} = \frac{483,6}{1,5^{1,079}} = 312,2; \quad C_{F_f}^{II} = \frac{C_{F_{ff}}}{a_p} = \frac{1352}{31,079} = 413,2$$

$$C_{F_f}^{III} = \frac{C_{F_{ff}}}{f^{y_{F_f}}} = \frac{231,5}{0,2^{0,331}} = 394,4; \quad C_{F_f}^{IV} = \frac{C_{F_{ff}}}{f^{y_{F_f}}} = \frac{235,6}{0,3^{0,331}} = 351; \quad C_{F_f}^{V} = \frac{C_{F_{ff}}}{f^{y_{F_f}}} = \frac{246,5}{0,4^{0,331}} = 333,8$$

$$C_{F_f} = \frac{312,2 + 413,2 + 394,4 + 351 + 333,8}{5} = 360,9$$

Po zjištění všech exponentů a materiálových konstant v programu Microsoft Excel se provedl výsledný výpočet složek řezné síly a jejich porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami na základě vztahů:

a) **Řezná složka**  $F_c = C_{F_c} * a_p^{x_{F_c}} * f^{y_{F_c}}$

CFc	XFc	YFc	ap	f	Fc teor	Fc naměř
1835.6	0.831	0.781	1.5	0.2	731	748
1835.6	0.831	0.781	1.5	0.3	1004	1017
1835.6	0.831	0.781	1.5	0.4	1257	1199
1835.6	0.831	0.781	3	0.2	1301	1226
1835.6	0.831	0.781	3	0.3	1786	1875
1835.6	0.831	0.781	3	0.4	2236	2235

b) **Pasivní složka**  $F_p = C_{F_p} * a_p^{x_{F_p}} * f^{y_{F_p}}$

CFp	XFp	Yfp	ap	f	Fp teor	Fp naměř
638.88	0.557	0.625	1.5	0.2	293	317
638.88	0.557	0.625	1.5	0.3	377	352
638.88	0.557	0.625	1.5	0.4	452	388
638.88	0.557	0.625	3	0.2	431	361
638.88	0.557	0.625	3	0.3	555	547
638.88	0.557	0.625	3	0.4	664	700

c) **Posuvová složka**  $F_f = C_{F_f} * a_p^{x_{F_f}} * f^{y_{F_f}}$

CFf	XFf	YFf	ap	f	Ff teor	Ff naměř
360.9	1.079	0.331	1.5	0.2	328	339
360.9	1.079	0.331	1.5	0.3	375	376
360.9	1.079	0.331	1.5	0.4	413	393
360.9	1.079	0.331	3	0.2	693	648
360.9	1.079	0.331	3	0.3	793	834
360.9	1.079	0.331	3	0.4	872	874

Tab. 10 Výpočet teoretických hodnot složek řezný síly a) řezné složky, b) pasivní složky, c) posuvové složky

## Závěr

Na základě provedeného výzkumu lze stanovit, že průběh naměřených hodnot složek řezné síly u většiny destiček odpovídal teoretickým předpokladům.

Nejvíce odpovídajícím teoretickým výpočtům vyšel průběh řezné složky výsledné řezné síly, vyvolané při obrábění obrobku z oceli 12 050 (C45). V případech použití nejnamáhanějších řezných podmínek: posuvu 0,4 mm a hloubce řezu 3 mm, nejvyšší hodnoty řezné složky se projeví u destiček WNMG-AB, WNMG-A a WNMG-AA, když destičky DNMG-AA, DNMG-AB a DNMX-A3 ukázaly menší hodnoty.

Průběh pasivních složek méně odpovídal teoretickým předpokladům. Nejhuř vyšel průběh hodnot pro pasivní složku řezné síly při posuvu 0,3 mm a hloubce řezu 1,5 mm, kdy se u některých destiček, jako například WNMG-A objevil neočekávaný nárůst hodnot pasivní složky. Při více namáhanějších podmínkách posuvu a hloubce řezu 3 mm, ale průběh hodnot vypadal jak se očekávalo: pasivní složka řezné síly stále stoupala na horu, u některých destiček téměř s lineární závislostí.

Důsledkem jevu hodnot sil neodpovídajících teoretickým předpokladům může být fakt, že řezné podmínky pro určité druhy destiček přesáhly oblast optimálního obrábění a z těchto důvodů mohlo vzniknout příliš vysoké chvění nástroje. Dalšími důsledky mohou být kmitání obrobku vyvolané jeho velkým obvodovým pohybem, kdy se obrábělo na konci upnutém do koníku nebo i nehomogenní drsnost povrchu, která rovněž mohla ovlivnit posuvnou a pasivní složku řezné síly.

Toto měření je pouze prvním kolem zkoušek pro nově navržené tvary utvářečů třísek. Na základě pouze tohoto měření nelze stanovit skutečný vliv utvářečů na vyvolané řezné síly. Pro zjištění nejvhodnější oblasti hodnot řezných podmínek pro obrábění pro všechny druhy destiček je doporučováno provádět další kola měření.

## Seznam použité literatury

1. MÁDL, Jan Prof. Ing. CSc. a KAFKA, Jindřich Doc. Ing. CSc. *Technologie obrábění*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2007, 2. přeprac. vyd., ISBN 978-80-0103-7522
2. MÁDL, Jan Prof. Ing. CSc. *Experimentální metody v teorii obrábění*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1988.
3. ČEP, Robert a PETRŮ, Jana. *Experimentální metody v obrábění*. Učební text. Ostrava: Vydavatelství VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011, ISBN 978-80-248-2533
4. FOREJT, Milan Prof. Ing. CSc. a HUMÁR, Anton Doc. Ing. CSc. *Experimentální metody*. [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT-FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, 2003. [18-12-2014]  
Dostupné z:  
[http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/experimentalni\\_metody\\_\\_cviceni\\_\\_forejt\\_piska\\_humar\\_janicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf)
5. MÁDL, Jan Prof. Ing. CSc. a BARCAL, Jaroslav. *Základy technologie II*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, ISBN 80-010-2610-8
6. KISTLER HOLDING AG. *3-Component Dynamometr Type 9265B*. [online]. Winterthur: Kistler Group, 2009. [18-12-2014]  
Dostupné z:  
<http://web.sensor-ic.com:8000/ZLXIAZAI/KISTLER/000-152e-12.09.pdf>
7. KISTLER HOLDING AG. *Multichannel Charge Amplifier Type 5019B*. [online]. Winterthur: Kistler Group, 2009. [18-12-2014]  
Dostupné z:  
<http://web.sensor-ic.com:8000/ZLXIAZAI/KISTLER/000-744e-05.11.pdf>
8. PRAMET TOOLS, s.r.o. *Průručka obrábění 2004*. [online]. [18-12-2014].  
Dostupné z:  
[http://www.mavslovakia.sk/pdf/pramet/prirucka\\_cz.pdf](http://www.mavslovakia.sk/pdf/pramet/prirucka_cz.pdf)
9. TULMIKOVO. *Geometrie nástrojů*. [online]. [18-12-2014].  
Dostupné z:  
<http://www.tumlikovo.cz/rubriky/geometrie-nastroju>
10. DRASTÍK, František. *Strojnické tabulky pro konstrukci i dílnu*. Druhé doplněné vydání. Montanex, 1999, 1. dotisk 2002. ISBN 80-85780-95-X