

# DYNAMICKÁ OBROBITELNOST KONSTRUKČNÍCH POLYMERŮ FRÉZOVÁNÍM

Aleš Popelka

---

Bakalářská práce  
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Zde patří oficiální zadání diplomové práce.

**Tato strana se ze šablony netiskne. Je to výstup z IS STAG.**

## **ABSTRAKT**

### *Abstrakt česky*

Předložená práce se zabývá dynamickou obrobiteľnosťou konstrukčných polymerů frézováním. Frézoval se PVC, frézou se čtyřmi břity o  $\varnothing$  8 mm. Měnil se posuv, řezná rychlost a hloubka řezu. Po obrobení materiálu se měřila drsnost povrchu. Tyto hodnoty se vyhodnocovaly a u sousledného frézování bylo zpracování i grafické. Dále se určovaly řezné síly u obrábění z výkonu při konstantním posuvu a různých řezných rychlostí.

### *Abstrakt v anglickém jazyce*

Submitted thesis with accuracy of dynamic workability constructional polymer of milling. There were milled polyvinyl chloride, four edge milling cutter with the same 8 mm diameter was used for cutting. During that action feed, cutting speed and depth of cut were changed. After finishing material was measured roughness surface. The values was interpreted and by climb milling elaboration was graphic. Next the cutting force was assessed during cutting operation from performance with constant feed and different cutting speed.

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své bakalářské práce panu Doc. Ing. Imrichu Lukovicsovi, CSc. za odborné vedení, cenné připomínky a rady, které mi poskytoval v průběhu vypracování celé bakalářské práce.

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 26. 5. 2006

.....

podpis

# OBSAH

<b>OBSAH</b> .....	<b>5</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>8</b>
<b>1 OBRÁBĚNÍ</b> .....	<b>9</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY PROCESU OBRÁBĚNÍ .....	9
1.2 NÁSTROJ.....	11
<b>2 FRÉZOVÁNÍ</b> .....	<b>11</b>
2.1 TEORIE FRÉZOVÁNÍ.....	11
2.1.1 Sousedné frézování.....	13
2.1.2 Nesousedné frézování.....	14
2.2 TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ.....	15
2.2.1 Výkon při frézování.....	15
2.2.2 Dosahovaná přesnost a jakost povrchu.....	16
2.2.3 Řezné podmínky a strojní čas.....	17
2.3 FRÉZY.....	17
2.3.1 Typy fréz.....	18
2.4 NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY.....	24
2.4.1 Nástrojové oceli.....	25
2.4.2 Slinuté karbidy.....	26
2.4.3 Cermety .....	28
2.4.4 Řezná keramika .....	29
2.4.5 Polykrystalický diamant .....	30
2.5 FRÉZOVACÍ STROJE.....	31
2.5.1 Konzolové frézky .....	31
2.5.2 Stolové frézky.....	32
2.5.3 Rovinné frézky .....	33
<b>3 OBROBITELNOST, ŘEZIVOST NÁSTROJE</b> .....	<b>33</b>
3.1 OBROBITELNOST.....	33
3.2 ŘEZNÉ SÍLY PŘI FRÉZOVÁNÍ.....	35
3.2.1 Síly působící na zubu frézy.....	35
3.2.2 Obvodová síla při válcovém frézování.....	36
3.3 ŘEZIVOST NÁSTROJE.....	40
<b>4 METODY A APARATURY PRO URČOVÁNÍ ŘEZNÝCH SIL</b> .....	<b>40</b>
4.1 NEPŘÍMÉ MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL.....	41
4.2 PŘÍMÉ MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL.....	41

<b>II. PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>44</b>
<b>5 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....</b>	<b>46</b>
<b>6 FRÉZOVÁNÍ, MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU A VÝKONU.....</b>	<b>46</b>
6.1 FRÉZOVACÍ STROJ FC 16 CNC .....	46
6.2 MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU .....	47
6.3 MĚŘENÍ VÝKONU .....	47
<b>7 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL.....</b>	<b>49</b>
7.1 POLYVINYLCHLORID (PVC).....	49
7.1.1 Tvrdý PVC.....	49
7.1.2 Měkčený PVC.....	50
<b>8 NAMĚŘENÉ HODNOTY DRSNOSTI A JEJICH ZPRACOVÁNÍ.....</b>	<b>50</b>
8.1 VLIV POSUVU NA JAKOST POVRCHU .....	50
8.1.1 Program pro frézování se změnou posuvu .....	50
8.1.2 Naměřené hodnoty a jejich zpracování při změně posuvu .....	51
8.2 VLIV HLOUBKY ŘEZU NA JAKOST POVRCHU .....	52
8.2.1 Program pro frézování se změnou hloubky řezu .....	52
8.2.2 Naměřené hodnoty a jejich zpracování při změně hloubky řezu.....	54
8.3 VLIV ŘEZNÉ RYCHLOSTI NA JAKOST POVRCHU .....	54
8.3.1 Řezná rychlost a otáčky .....	55
8.3.2 Program pro frézování se změnou řezné rychlosti .....	55
8.3.3 Naměřené hodnoty a jejich zpracování při změně řezné rychlosti .....	57
<b>9 URČENÍ ŘEZNÝCH SIL Z VÝKONU.....</b>	<b>57</b>
9.1 NAMĚŘENÉ HODNOTY A JEJICH ZPRACOVÁNÍ.....	57
9.1.1 Použité vztahy při zpracování.....	59
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>59</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>60</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>61</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>63</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>64</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>65</b>

## ÚVOD

Obrábění je výrobní technologií, kterou se zabývá několik vědních oborů. Tato technologie dosáhla svého rozmachu v 19. a 20. století a od té doby je jedním z nejdůležitějších procesů ve zpracování materiálů.

Hned po soustružení je druhým nejvýznamnějším způsobem obrábění frézování. Tato metoda měla nahradit méně produktivní hoblování, u něhož je vratný pohyb konán naprázdno, čili bez úběru materiálu.

Průmyslová výroba si žádá stále větší požadavky na vlastnosti svých výrobků, větší efektivitu práce a lepší ekonomické zhodnocení celého výrobního procesu. Pro uspokojení těchto nároků se hledají a vyvíjejí nové materiály. V posledních letech se stále více používají polymery. Jejich rozšíření je zajištěno díky svým vlastnostem jako jsou odolnost proti korozi, nízká hmotnost aj. Tato skutečnost nás vede k tomu, abychom se zabývali jejich zkoumáním a možnostmi zpracování.

Pro třískové metody obrábění je jedna z nejdůležitějších technologických vlastností materiálů jejich obrobiteľnosť. Obrobiteľnosť nám charakterizuje vhodnosť materiálu k obrábění. Čím lépe se bude daný materiál obrábět, tím budou výrobní časy nižší, dojde k energetické úspoře, produktivita práce se zvýší a cena výrobku půjde dolů. Ovšem pojem obrobiteľnosť nelze vztáhnout pouze k samotnému obráběnému materiálu, ale i k vhodnému řeznému prostředí, řezným materiálům a v neposlední řadě i ke geometrii nástroje. Proto je důležité volit vhodné řezné podmínky.

Do budoucna se dá očekávat vzrůstající spotřeba polymerů, stejně jako předpokládáme, že obrábění bude mít ve výrobě své místo.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**



# 1 OBRÁBĚNÍ

## 1.1 Základní pojmy procesu obrábění

Obrábění je technologický proces, kterým vytváříme povrchy obrobku určitého tvaru, rozměru a jakosti odebráním částic nebo oddělováním částí materiálu pochody mechanickými, elektrickými, chemickými apod., popř. jejich kombinací.

Řezání je obrábění pochody mechanickými tj. odebráním částic nebo oddělování částí materiálu břitem řezného nástroje ve tvaru třísky.

Obrobek je obráběný nebo již obrobený předmět.

Obráběná plocha je část povrchu obrobku odstraňovaná obráběním.

Obrobená plocha je plocha obrobku vzniklá obráběním.

Plocha řezu (řezná plocha) je plocha obrobku vznikající těsně za břitem nástroje

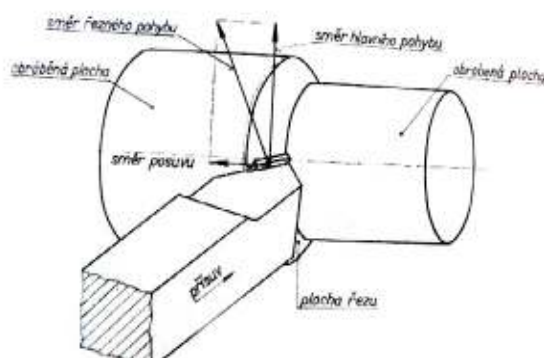
Aby nastal proces řezání, tj. oddělení částí materiálu z výchozího polotovaru (z obrobku), musí se nástroj pohybovat proti obrobku určitou rychlostí po určité dráze, která podle druhu obrábění je přímka (hoblování, protahování), šroubovice (podélné soustružení, vrtání), cykloida (frézování, rovinné broušení) atp.

Tento tzv. řezný pohyb vykonává buď nástroj (vrtání), nebo obrobek (hoblování), anebo oba současně (soustružení, frézování). Zpravidla je tento pohyb výslednicí dvou pohybů – pohybu hlavního (točivý pohyb obrobku při soustružení, frézy při frézování, vrtáku při vrtání) a posuvu (přímočarý pohyb nástroje ve směru osy obrobku při podélném soustružení, přímočarý pohyb obrobku při frézování, přímočarý pohyb vrtáku ve směru jeho osy při vrtání atp.).

Tyto pohyby můžeme definovat takto:

řezný pohyb je relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem. Tímto pohybem se uskutečňuje obrábění (řezání);

hlavní pohyb je složka řezného pohybu, která se shoduje se základním obráběcího stroje. Koná jej buď nástroj, nebo obrobek. Může být točivý, přímočarý nebo složený;



Obr. 1. Obráběná plocha, obrobená plocha,  
plocha řezu

posuv je pohyb nástroje nebo obrobku, který spolu s hlavním pohybem umožňuje obrábění. Zpravidla se koná ve směru kolmém na směr hlavního pohybu buď plynule nebo přerušovaně;

posuv plynulý je posuv konaný nepřerušovaně současně s hlavním pohybem točivým;

posuv přerušovaný je posuv konaný po přetrzích před pracovním zdvihem (v úvratích), tj. v době, kdy se hlavní pohyb nekoná;

řezná rychlost je rychlost řezného pohybu. Obvykle se však počítá s rychlostí pohybu hlavního. Označuje se  $v_c$  a udává se buď v m/min, nebo v m/s. Při rotačních pohybech se vypočte podle rovnice

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

kde  $D$  je průměr obrobku nebo nástroje v mm,

$n$  – otáčky obrobku nebo nástroje za minutu;

rychlost (velikost) posuvu je dráha, kterou vykoná břit nástroje proti obrobku ve směru posuvu za jednotku času, za jednu otáčku obrobku apod.

Dalším pohybem, který je součástí pracovního cyklu obrábění, netvoří však složku řezného pohybu je přísuv, který definujeme takto:

přísuv je pohyb nástroje nebo obrobku, kterým se nastavuje nástroj do pracovní polohy; hloubka řezu je vzdálenost mezi plochou obráběnou a obrobenou, měřená kolmo na obrobenou plochu. Označujeme ji písmenem  $t$  [mm]. [4]

## 1.2 Nástroj

Nástroj umožňuje realizaci řezného procesu. Z geometrického hlediska je nástroj identifikován svými prvky, plochami, ostřím a rozměry ostří.

Těleso – část nástroje, na které jsou přímo vytvořené nebo upevněné elementy ostří.

Stopka – část nástroje určena pro upnutí.

Upínací díra – souhrn vnitřních ploch tělesa nástroje, určených pro nastavení a upnutí nástroje.

Osa nástroje – teoretická přímka využívaná při výrobě, ostření a upnutí nástroje. Obecně je osa středová čára stopky nebo upínací díry nástroje.

Řezná část – funkční část nástroje, která obsahuje prvky tvořící třísku. Patří sem ostří, čelo a hřbet. V případě vícezubého nástroje má každý zub svou řeznou část.

Základna – plochý prvek stopky nástroje, který je zpravidla rovnoběžný nebo kolmý k základní rovině nástroje. Slouží pro umístění a orientaci nástroje při jeho výrobě, kontrole a ostření. Ne všechny nástroje mají určenou základnu.

Břit – prvek řezné části nástroje ohraničený čelem a hřbetem nástroje. Může být spojen s hlavním i vedlejším ostřím. [1]

## 2 FRÉZOVÁNÍ

### 2.1 Teorie frézování

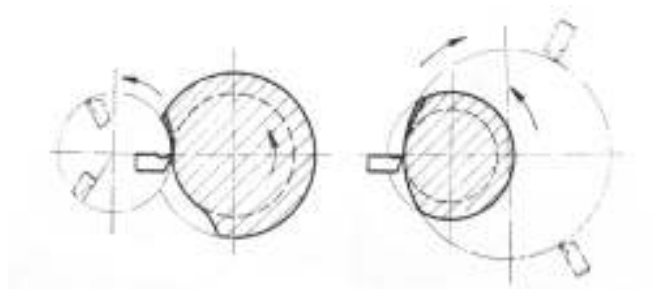
Frézování je po soustružení nejpoužívanější metoda obrábění, při kterém každý břit – zub víceklínového nástroje odebírá třísku. Nástroj – fréza vykonává hlavní pohyb, vedlejší pohyb – posuv zpravidla vykonává obrobek. Úběr materiálu při frézování je přerušovaný, řezný klín po vyjetí ze záběru se uchyluje až do nového záběru. Frézováním se vyrábí

rovinné a tvarové přímkové plochy. Podle způsobu záběru frézy do materiálu obrobku rozeznáváme frézování válcové, čelní a okružovací.

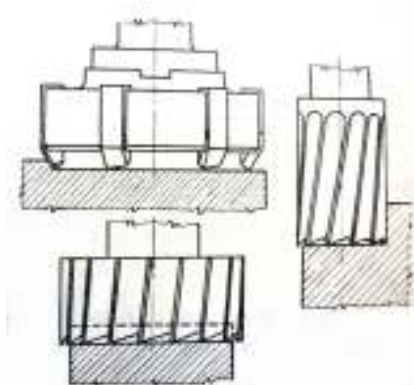
Při válcovém frézování se odebírá z obrobku třísky břity uspořádanými po obvodě frézy. Směr posuvu je kolmý k ose frézy. Výsledný řezný pohyb, tj. dráha břitu nástroje vzhledem k obrobku, je prodloužená cykloida, vytvořená otáčivým pohybem břitu nástroje a podélným, přímočarým pohybem obrobku. Podle směru posuvu obrobku vzhledem k směru otáčení frézy rozeznáváme frézování sousledné a nesousledné.

Při čelním frézování je osa frézy kolmá k frézované ploše, z níž se oddělují třísky břity na čele. Může však fréza (stopková) oddělovat i třísky břity na obvodu, případně jen na obvodu. Pak je opracovávaná plocha rovnoběžná s osou frézy a podle jejího tvaru to může být buď plocha rovinná nebo tvarová.

Při okružovacím frézování se vícebřitý nástroj (např. několikanožová hlava) otáčí vně obrobku, který se rovněž otáčí. Tím můžeme vytvořit frézováním rotační plochy válcové i tvarové. Nejčastěji se používá na výrobu závitů. [3]



Obr. 2. Okružovací frézování



Obr. 3. Čelní frézování

### 2.1.1 Sousedné frézování

Pohybuje-li se v okamžiku záběru posunová složka hlavního pohybu v témže smyslu jako posuv, jedná se o frézování sousledné.

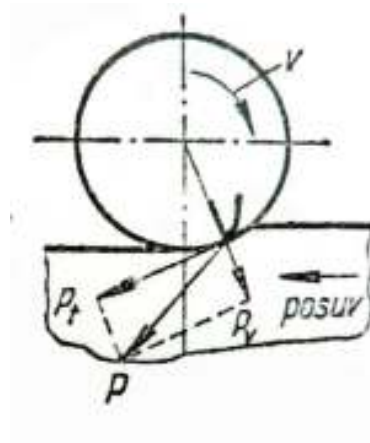
Sledujeme-li ostří nástroje v jeho relativním pohybu vzhledem k obrobku, je to při sousledném frézování zkrácená cykloida. [2]

Tloušťka třísky je v tomto případě při záběru zubu maximální a zmenšuje se do nuly při výběhu zubu z materiálu. Tento způsob záběru frézy má mnoho předností před frézováním nesousledným. Výsledná řezná síla směřuje do materiálu, což umožňuje zmenšit upínací síly, zmenšuje se náchylnost frézy a frézovacího trnu ke chvění a do určité míry se i zlepšuje jakost frézované plochy. Další předností je možnost použít větších posuvů na zub při nezměněné hodnotě trvanlivosti, a tím dosáhnout vyšší produktivity frézování. Hospodárný úběr je možno při sousledném frézování zvýšit o 100% proti frézování nesouslednému.

Nevýhodou sousledného frézování je značný silový ráz při záběru každého zubu do materiálu. Dá se však odstranit použitím fréz se šikmými zuby. Sousedné frézování není vhodné pro obrábění obrobků s tvrdým a znečištěným povrchem (ocel na odlitky, odlitky se zapečeným pískem apod.). Vzhledem k většímu výkonu a posuvu musí se při sousledném frézování používat frézy s menším počtem zubů a větším stoupáním šroubovice.

Sousledně lze frézovat pouze na zvlášť k tomu upravených strojích. Při sousledném frézování působí pasivní odpory pracovního stolu v opačném směru, než složka řezné síly působící ve směru posuvu. Proto by u normálních frézek docházelo při sousledném frézování k opakovanému přerušování pohybu. Při vyjetí zubu frézy ze záběru převáží pasivní odpory pracovního stolu a jeho pohyblivého mechanismu složku řezné síly působící ve směru posuvu. Tím se přesune vůle matice pohybového šroubu na druhý bok závitu, což vede na zlomek vteřiny k zastavení podélného posuvu a k rázům v pohybovém mechanismu podélného posuvu frézky.

Předpokladem pro použití sousledného frézování je proto vymezení vůle v matici pohybového šroubu. To lze uskutečnit různým způsobem. Například dvěma maticemi pohybového šroubu, z nichž jedna je pevně spojena se stolem a druhá přesuvná pákovým zařízením v opačném směru působení pasivních odporů. Jiná konstrukce má dva vodící šrouby, jeden pravochoďový, druhý levochoďový. Vůli lze také vymežit hydraulickým přídatným zařízením. [4]



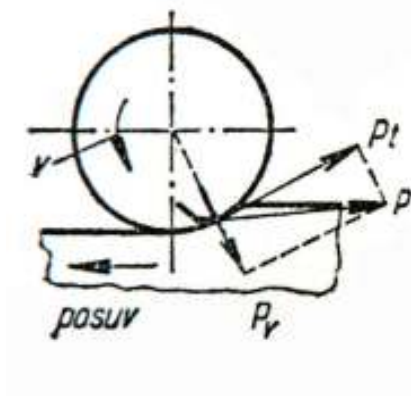
Obr. 4. Sousedné frézování

### 2.1.2 Nesousledné frézování

Pohybuje-li se v okamžiku záběru břit proti směru posuvu, mluvíme o nesousledném frézování.

Sledujeme-li ostří nástroje v jeho relativním pohybu vzhledem k obrobku je při nesousledném frézování dráha výsledného pohybu prodloužená cykloida. [2]

Břit každého zubu frézy začíná v tomto případě odebírat materiál od minimální tloušťky, která se zvětšuje až do určitého maxima. Poněvadž ostří zubu frézy není ve skutečnosti ostrá hrana, nýbrž zaoblená ploška o poloměru 8 až 30  $\mu\text{m}$ , začne břit odřezávat materiál, až tloušťka třísky dostoupí určité velikosti. Do té doby břit materiál pouze stlačuje. Tímto stlačování materiálu se jednak zhoršuje jakost obrobenej plochy, jednak také se zvětšuje intenzita opotřebování břitů frézy. Nevýhodou tohoto způsobu frézování je také, že řezná síla směřuje nahoru, což má nepříznivý vliv na způsob upnutí obrobku. [4]



Obr. 5. Nesousledné frézování

## 2.2 Technologie frézování

### 2.2.1 Výkon při frézování

Výkon frézování měřený objemem odfrézovaného materiálu závisí na obrobitelnosti frézovaného materiálu, na druhu frézy a na výkonu motoru frézky.

Měrný výkon  $U_m$  [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ], tj. úběr materiálu dosahovaný výkonem 1 kW, bývá v těchto hodnotách:

Tab. 1. Měrný výkon

	$s_z = 0,06 \text{ mm}$		$s_z = 0,25 \text{ mm}$	
	frézy ostré	frézy tupé	frézy ostré	frézy tupé
ocel $\sim 50 \text{ kp/mm}^2$	14 $\text{cm}^3/\text{min}$	7,5 $\text{cm}^3/\text{min}$	23,5 $\text{cm}^3/\text{min}$	15 $\text{cm}^3/\text{min}$
ocel 51 až 80 $\text{kp/mm}^2$	13 $\text{cm}^3/\text{min}$	7,0 $\text{cm}^3/\text{min}$	22 $\text{cm}^3/\text{min}$	14 $\text{cm}^3/\text{min}$
ocel 81 až 100 $\text{kp/mm}^2$	12 $\text{cm}^3/\text{min}$	6,5 $\text{cm}^3/\text{min}$	20 $\text{cm}^3/\text{min}$	11 $\text{cm}^3/\text{min}$
litina 170 až 190 HB	25 $\text{cm}^3/\text{min}$	9,5 $\text{cm}^3/\text{min}$	34 $\text{cm}^3/\text{min}$	22 $\text{cm}^3/\text{min}$
litina 191 až 210 HB	21 $\text{cm}^3/\text{min}$	8,0 $\text{cm}^3/\text{min}$	31 $\text{cm}^3/\text{min}$	20,5 $\text{cm}^3/\text{min}$

Potřebný efektivní výkon motoru:

$$N = \frac{t \cdot b \cdot s_{\min}}{1000 \cdot U_m} [kW] \quad (2)$$

kde  $t$  je hloubka odfrézované vrstvy materiálu v mm

$b$  – šířka frézované plochy v mm,

$s_{\min}$  – posuv za minutu

### 2.2.2 Dosahovaná přesnost a jakost povrchu

Tab. 2. Dosahovaná přesnost a jakost povrchu

	IT	R <sub>a</sub> [μm]
při frézování válcovými frézami		
hrubování do délky ploch 300mm	10 až 12	6,3 až 25,0
hrubování do délky ploch 1200mm	11 až 13	6,3 až 25,0
práce na čisto do délky ploch 300mm	9 až 11	1,6 až 6,3
práce na čisto do délky ploch 1200mm	9 až 12	1,6 až 6,3
při frézování frézovacími hlavami		
hrubování do délky ploch 300mm	10 až 13	6,3 až 25,0
hrubování do délky ploch 1200mm	11 až 13	6,3 až 25,0
práce na čisto do délky ploch 300mm	6 až 10	1,6 až 3,2
práce na čisto do délky ploch 1200mm	8 až 11	1,6 až 3,2
jemné frézování	7 až 8	0,8 až 1,6

Výkon i jakost frézované plochy se zvětšuje použitím řezných kapalin. Při použití řezných kapalin se třísky na břit nenalepují, což zlepšuje jakost obrobené plochy.

Drsnost povrchu frézované plochy závisí na házení břitů, na velikosti posuvu  $s_z$ , na řezné rychlosti, na stupni otupení frézy a jejím průměru.



$$R_{MAX} = \frac{s_z^2}{8 \left( R \pm \frac{s_z z}{\pi} \right)} [mm] \quad (3)$$

kde R je poloměr frézy [mm]

z – počet zubů frézy

Znaménko + ve jmenovateli platí pro frézování nesousledné, znaménko – pro frézování sousledné. [4]

### 2.2.3 Řezné podmínky a strojní čas

Určování řezných podmínek je složitější než u obrábění s jednobitovými nástroji. Řezná rychlost se volí podle obráběného materiálu, druhu materiálu nástroje, poměrné délky záběru (proti celkové otáčce stroje) a podle druhu chlazení. Musí se přihlížet i k průměru frézy, počtu břitů, hloubce záběru a k posuvu.

Řezný čas:

$$t_s = \frac{L}{s_{\min}} [\text{min}] \quad (4)$$

kde L je celková dráha frézy i s přeběhy, které jsou při čelním frézování o něco větší než poloměr frézy; při obvodovém frézování o něco menší, podle hloubky řezu;

$s_{\min}$  - posuv za minutu. [2]

## 2.3 Frézy

Řezný nástroj, užívaných na frézkách, se nazývá frézou. Těleso frézy je obvykle válcové, otáčí se kolem své osy a má na obvodě stejnosměrně rozdělené zuby, zabírající postupně do materiálu.

Frézy se rozdělují podle těchto vlastností:

1. Frézy jsou buď celistvé (zuby tvoří s tělesem frézy jeden celek) nebo s vyměnitelnými zuby (zuby jsou vsazeny do příslušných zářezů nebo otvorů v tělese frézy, v nichž jsou vhodným mechanickým způsobem připevněny).
2. Frézy mají břity s ostřím buď přímým (rovnoběžným s osou otáčení frézy) nebo šroubovým, (břity jsou skloněny pod úhlem, nazvaným úhlem sklonu ostří zubu).
3. Frézy bývají buď: a) nástrčné (pro upnutí na trn)
  - b) se stopkou (pro vsunutí do konce vřetena frézky)
  - c) se zapuštěnou dosedací plochou
4. Frézy jsou buď pravořezné nebo levořezné a s pravou nebo levou šroubovicí.

Směr řezu zjistíme, hledíme-li na frézu, upnutou ve frézce, směrem od vřetena. Pravořezná fréza vyžaduje otáčení vřetena ve směru hodinových ručiček, levořezná fréza proti směru hodinových ručiček. Podle toho mluvíme pak o pravém nebo levém řezu.

Směr stoupání šroubovice určíme, hledíme-li na zuby nebo zubové drážky frézy od vřetena. Stoupají-li zuby doprava, je směr šroubovice pravý, stoupají-li doleva je směr šroubovice levý.

### 2.3.1 Typy fréz

#### **Válcové frézy**

Jejich zuby jsou uspořádány pouze na obvodu válcové plochy. Vyrábějí se v nejrůznějších průměrech a šířkách.

Válcové frézy se rozdělují do těchto skupin:

- a) Lehké válcové frézy. Nepřesahuje-li jejich šířka 20 mm, jsou jejich zuby rovné (rovnoběžné s osou frézy). Frézy širší, než 20 mm mívají šroubové ozubení o úhlu sklonu ostří zuby asi  $25^\circ$ . Těchto fréz se užívá pro lehké řezy. Nejsou však dost vhodné pro běžné frézovací práce, neboť mají příliš mnoho zubů a nedostatečný prostor pro vývin třísky.
- b) Těžké válcové frézy. Zhotovují se pouze o větších šířkách. Jejich zuby mají větší úhel sklonu ostří zuby než  $25^\circ$ , avšak nepřesahující asi  $45^\circ$ . Těžké válcové frézy mají méně zubů než lehké válcové frézy a nazývají se též „frézami s hrubými zuby“. Těžké válcové frézy jsou určeny pro velký odběr materiálu. Se zřetelem na menší počet zubů umožňuje širší zubní mezera dostatečný prostor pro vývin třísky. Válcové frézy s úhlem sklonu ostří zuby  $45^\circ$  až  $60^\circ$  nebo ještě větším, nazýváme šroubovými frézami. Šroubová fréza se stopkou se velmi dobře osvědčuje při kopírovacím frézování.



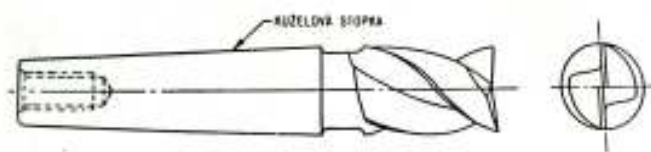
Obr. 6. Válcová fréza se zuby ve šroubovici

### Čelní válcové frézy

Tyto frézy mají břity nejen na obvodu válcové plochy, ale také na jedné čelní ploše. Kromě nástrčných válcových čelních fréz, mají všechny druhy těchto fréz stopku, sloužící jednak k upnutí a jednak k unášení frézy. Užívá se jich pro frézování ploch, profilů a k zapouštění.

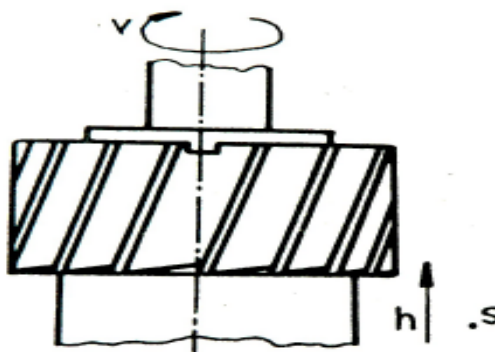
Rozdělují se na:

- Čelní válcové frézy se stopkou
- Čelní válcové frézy dvoubřité (drážkovací)



Obr. 7. Normální dvoubřitá drážkovací fréza

- a) Nástrčné čelní válcové frézy mají zuby na obvodu válcové plochy a na jedné čelní ploše. Nemají stopku, nýbrž vrtání. Nástrčných čelních válcových fréz se s výhodou užívá k plošnému frézování dvou navzájem kolmých povrchů.



Obr. 8. Nástrčná čelně – válcová fréza

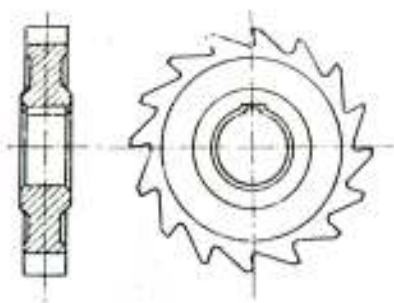
### Kotoučové frézy

Kotoučové frézy mají zuby na obvodu válcové plochy a také na jednom nebo na obou čelech. Nasazují se na trn. Tyto frézy se vyrábějí v několika druzích:

- Frézy jednostranné mají břity na obvodu válcové plochy a na jednom čele. Hodí se pro plošné frézování v těch případech, kde je zapotřebí, aby řezala pouze jedna čelní strana frézy.
- Frézy oboustranné jsou poměrně úzké a mají zuby na obvodu válcové plochy a na obou čelech. Užívá se jich při frézování drážek a pro různá plošná frézování.
- Dělené nastavitelné frézy se západkovými zuby se skládají ze dvou oboustranných kotoučových fréz, tvořících ve skutečnosti jednu frézu se západkovými zuby.

Zmíněné frézy jsou zvláště výhodné pro přesné frézování mělkých nebo středně hlubokých drážek.

- d) Frézy se střídavými zuby jsou úzké kotoučové frézy, jejichž zuby mají pravidelně vystřídání směr šroubovice. Aby se ulehčil chod frézy a zabránilo se poškození předmětu, jsou boky zubů vybrány a pouze za ostřím je ponechána malá část zubu v jeho plné tloušťce. Frézy se střídavými zuby jsou výhodné pro řezání klínových a jiných drážek.



Obr. 9. Kotoučová fréza

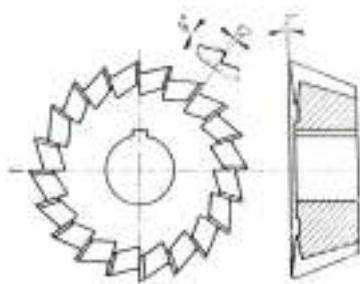
### Okružní pily na kov

Okružní pily na kov jsou tenké kotoučové frézy se slabě vybranými (vydutými) bočními stěnami k ulehčení chodu a k zabránění nadměrného tření nástroje o kov. Mají obvykle větší počet zubů než normální kotoučové frézy stejného průměru. Užívá se jich k rozřezávání a k frézování hlubokých, úzkých drážek.

### Úhlové frézy

Tyto frézy mají tvar kuželového kotouče a užívá se jich k frézování rybin, zářezů, drážek, jemných drážek, zubů výstružníků apod. Zhotovují se ve dvou provedeních:

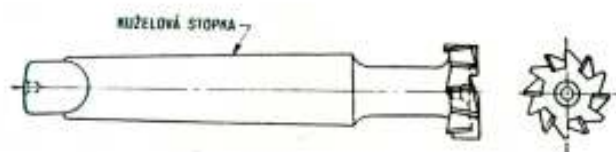
- Jednostranné úhlové frézy. Zubové břity jsou skloněny kuželovitě na jednu stranu. Zubové břity jsou většinou provedeny také na čele frézy.
- Oboustranné úhlové frézy. Zubové břity jsou skloněny kuželovitě na obě strany ve tvaru „V“.



Obr. 10. Úhlová fréza

### Frézy na drážky T

Jsou to speciální frézy se stopkou, výhodné pro frézování rozšířeného dna drážek T. Tyto frézy mají přímé nebo střídavé zuby na obvodě a na obou čelech.



Obr. 11. Normální fréza na drážky T

### Frézy na drážky pro Woodruffovy klíny

Frézy na drážky pro Woodruffovy klíny jsou malé drážkovací frézy, podobného provedení jako válcové nebo kotoučové frézy. Frézy menších velikostí mají přímé zuby pouze na obvodě a pro ulehčení řezu jsou v bocích vybrány. Frézy větších průměrů mají střídavé zuby jak na obvodě, tak i na čelech.

### Tvarové frézy

Tvarové frézy mají obvykle zakřivený zubní obrys a užívá se jich k frézování rozličných tvarů. Rozdělují se do dvou skupin:

- a) Jednoduché tvarové frézy mají nepravidelný tvar nebo profil zubů, jinak jsou však podobné válcovým frézám. Zhotovují se buď jako celistvé, nebo s vyměnitelnými zuby. Jejich použití se omezuje pouze na frézování jednoduchých tvarů, neboť je obtížné dodržet při jejich ostření stálou přesnost profilu.
- b) Podsoustružené tvarové frézy se zhotovují jako celistvé. Zuby podsoustružených tvarových fréz mají buď radiální čelo (úhel čela =  $0^\circ$ ), nebo čelo skloněné v určitém úhlu (úhel čela). Dále mívají zuby buď přímé (rovnoběžné s osu otáčení), nebo šroubovitě. Úhel sklonu ostří zubu bývá obvykle  $5^\circ$  až  $10^\circ$ .

Pro běžnou produkční práci, kde jakost ofrézovaného povrchu má podružný význam, užívá se fréz s přímými zuby. Frézy se šroubovitými zuby dávají zase lepší jakost povrchu a řezou hladce, takže se jimi dá frézovat při vyšších rychlostech.

### **Letmé frézy**

Letmá fréza je jednobřítý rezný nástroj, zasazený do trnu. Břit může být vybroušen do libovolného tvaru. Letmých fréz se převážně užívá v pokusných dílnách a nářadovněch.

### **Frézy s vyměnitelnými zuby**

Téměř veškeré druhy fréz se dají upravit pro vsazené zuby (nože). Tyto frézy se zhotovují s válcovým tělesem z levné oceli. Do tohoto tělesa se vyříznou zářezy nebo drážky pro vsazení zubů (nožů). Toto provedení umožňuje rychlou výměnu zubů, jakož i jejich seřízení po opotřebení. Dále to poskytuje možnost použití zubů z rozličných druhů materiálu, jako je např. z rychlořezné oceli nebo ze slinutého karbidu. Výhoda fréz s vyměnitelnými zuby tkví také v tom, že není třeba vyřadit celou frézu, jestliže se náhodou nějaký zub zlomí nebo jinak poškodí. Rozličné druhy fréz s vsazenými zuby patří do těchto skupin:

- a) Čelní frézy (frézovací hlavy) jsou nejužívanějšími frézami s vyměnitelnými zuby a jsou zvláště účinné při plošném frézování širokých povrchů. Pokud tyto frézy

nepřesahují průměr 150 mm, nasazují se na kuželové stopky a nazývají se nástrčnými čelními válcovými frézami s vyměnitelnými zuby. Je-li jejich průměr větší, než 150 mm, upínají se přímo na konec vřetena frézky a nazývají se prostě frézovacími hlavami.

- b) Válcové frézy s vyměnitelnými zuby jsou dlouhé válcové frézy velkého průměru. Zuby jsou vsazeny do šroubových drážek ve válcovém tělese frézy a jsou upevněny klíny a šrouby. Aby se usnadnilo lámání třísky na menší částičky, bývají řezné hrany zubů opatřeny vruby (zářezy).

### **Čelní frézy (frézovací hlavy) celistvé, s destičkami na tvrdo připájenými**

Čelní frézy (frézovací hlavy) zhotovují se také tím způsobem, že se na zuby frézy, jež jsou v jednom celku s tělesem, připájí natvrdo řezné destičky. Takové frézy mívají obvykle menší počet zubů než frézy z rychlořezné oceli. Takto konstruovaná fréza je pak tužší a má lepší řezný účinek. [6]

## **2.4 Nástrojové materiály**

Průběh a výstupy řezného procesu významně závisí na vlastnostech řezné části nástroje, která je zhotovena z příslušného nástrojového materiálu.

K základním požadavkům na nástrojový materiál patří jeho tvrdost, odolnost proti opotřebení, tepelná vodivost, pevnost v ohybu, houževnatost apod. Všechny uvedené vlastnosti by měl nástrojový materiál splňovat při vyšších a vysokých teplotách po dostatečně dlouhou dobu.

### **2.4.1 Nástrojové oceli**

Nástrojové oceli – NO – jsou zařazeny ve třídě 19 a jejich rozdělení je uvedeno v (Tab. 3).

Tab. 3. Rozdělení a označování nástrojových ocelí

Zákl. číselná značka	Význam třetí číslice v základní značce oceli
----------------------	--



19 0xx	Dvojčíslí ze 3. a 4. číslice vyjadřuje střední obsah uhlíku	Nástrojové oceli nelegované
19 1xx		
19 2xx		
19 3xx	Oceli manganové, křemíkové, vanadové	Nástrojové oceli legované
19 4xx	Oceli chromové	
19 5xx	Oceli chrómmolybdenové	
19 6xx	Oceli niklové	
19 7xx	Oceli wolframové	
19 8xx	Oceli rychlořezné	
19 9xx	Volné	

### Nástrojové oceli nelegované

Na vlastnostech těchto ocelí má největší vliv obsah uhlíku. Tvrdost oceli v zakaleném stavu vzrůstá se stoupajícím obsahem uhlíku.

V současné době ztrácejí na významu a jsou často nahrazovány legovanými nástrojovými oceli.

### Nástrojové oceli legované

Hlavními legujícími prvky těchto ocelí jsou karbidotvorné prvky Cr, V, W, Mo, které vytváří tvrdé a až do vysokých teplot stálé karbidy. Další legující prvky Ni, Si, Co nejsou karbidotvorné.

Z legovaných nástrojových ocelí se vyrábějí téměř všechny druhy řezacích, stříhacích, tvářecích a jiných nástrojů. Oproti nelegovaným ocelím jsou legované oceli charakteristické zejména větší prokalitelností a zvýšenou odolností proti popouštění, avšak jsou náročnější na tepelné zpracování.

### Rychlořezné oceli

Rychlořezné oceli – RO – jsou uváděny jako samostatná skupina legovaných nástrojových ocelí, a to pro své zcela specifické vlastnosti a využitelnost, zejména pro vysoce výkonné řezné nástroje. Obsahují karbidotvorné prvky W, Cr, V, Mo a nekarbidotvorný Co. Uhlíku obsahují zpravidla méně než 1%. Podle obsahu legujících prvků a vlastností jsou vhodné

pro řezné nástroje na obrábění ocelí, ocelí na odlitky o vysoké pevnosti a tvrdosti a těžkoobrobitelných materiálů.

Rychlořezné oceli jsou charakteristické střední odolností proti opotřebení a vysokou lomovou pevností. Nejčastěji jsou rychlořezné oceli používány pro tvarové nástroje, výstružníky, závitníky, frézy menších rozměrů, protahovací trny a nástroje vystavené rázům při přerušovaném řezu.

Důležitým předpokladem optimálního využití nástrojů z rychlořezných ocelí je použití vhodného řezného prostředí, tj. řezných emulzí a olejů.

#### 2.4.2 Slinuté karbidy

Slinuté karbidy – SK – jsou produktem práškové metalurgie a vyrábí se z různých karbidů a kovového pojiva. [1]

Hlavní strukturní složkou slinutých karbidů je velmi stálý karbid wolframu a titanu (WC, TiC). Spojení částic karbidu je zprostředkováno přísadou kobaltu, který při slinování vytváří kapalnou fázi, tím zanikají póry a vzniká kompaktní struktura. Slinuté karbidy nelze tepelně zpracovávat jako oceli a není možné je tvářet za studena ani za tepla. Obrábění je možné jenom broušením a elektroerozivními způsoby.

Slinutých karbidů se vyrábí několik druhů, které se liší obsahem kobaltu, tvrdostí a pevností. Se zvyšováním obsahu kobaltu vzrůstá pevnost v ohybu a klesá tvrdost. [3]

SK se vyrábějí ve tvaru destiček normalizovaných tvarů a rozměrů, které se pájí, ale nejčastěji mechanicky upínají na řeznou část nástroje. Mechanicky upínané destičky mají několik ostří, která se využívají postupně. Po otupení všech ostří se destička vyřazuje.

V technologické praxi se aplikují SK ve standardním provedení (nepovlakované) a slinuté karbidy opatřené různými druhy povlaků. [1]

#### Nepovlakované slinuté karbidy

Slinuté karbidy se dle ČSN ISO 516 (22 0801) člení v závislosti na svém složení a oblasti použití do tří skupin.

- *Slinuté karbidy typu P – WC, TiC, Co*

Jsou určeny pro obrábění železných kovů se vznikem dlouhé třísky – oceli, oceli na odlitky, temperované litiny. Nástroje se slinutými karbidy typu P se označují modrou barvou.

- ***Slinuté karbidy typu M – WC, TiC, TaC, Co***

Používají se při obrábění železných kovů se vznikem dlouhé i krátké třísky a pro obrábění neželezných kovů – manganové oceli, austenitické oceli, oceli na odlitky. Nástroje jsou označovány žlutou barvou.

- ***Slinuté karbidy typu K – WC, Co***

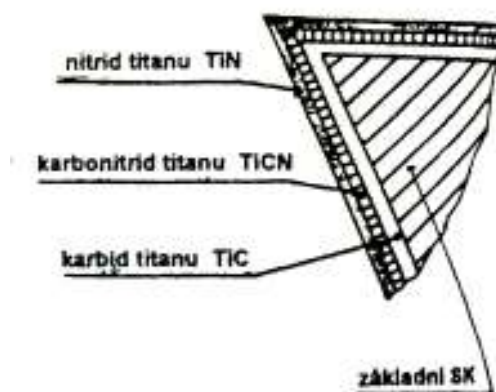
Jsou určeny pro obrábění železných kovů s krátkou třískou – šedé litiny, neželezných kovů, měď, bronz, hliník a nekovových materiálů. Nástroje se označují červenou barvou.

### **Povlakované slinuté karbidy**

Od řezných nástrojů ze slinutého karbidu se vyžaduje, aby vykazovaly co největší otěruvzdornost a současně i velkou houževnatost. Ideálním druhem by byla taková řezná destička, která by měla tvrdý otěruvzdorný povrch a houževnaté jádro. Tomuto požadavku vyhovují vyměnitelné destičky ze slinutého karbidu s tvrdými povlaky karbidu titanu TiC, nitridu titanu TiN nebo oxidu hlinitého Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Povlaky mohou být jedno- nebo vícevrstvé, s jedním nebo více komponenty.

Jednovrstvé povlaky jsou nejčastěji tvořeny TiC nebo TiCN, případně TiN. Tloušťka jednovrstvých povlaků dosahuje až 13 μm.

Vícevrstvé povlaky představují dvě, tři a více vrstev. Jako první jsou na základní slinutý karbid obvykle nanášeny vrstvy s dobrou přilnavostí k podkladu, které však mají relativně nižší odolnost proti opotřebení. Jako poslední jsou nanášeny vrstvy, které mají dobrou přilnavost k předchozí vrstvě a současně vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení.



Obr. 12. Příklad třívrstvého povlaku  
břítu nástroje

Povlakované SK nachází široké uplatnění pro soustružení, vrtání, frézování převážně části strojírenských materiálů, včetně těžkoobrobitelných.

### 2.4.3 Cermety

Cermet je řezný materiál obsahující tvrdé částice (TiC, TiN, TiCN, TaN) v kovovém pojivu (Ni, Mo, Co), který je vyráběn práškovou metalurgií. Název je tvořen počátečními písmeny slovního spojení CERamic/METal a vyjadřuje označení keramických částic v kovovém pojivu.

Větší obsah TiC způsobuje vysokou tvrdost a tím i větší odolnost proti deformaci. Tyto materiály však nejsou tak houževnaté jako slinuté karbidy, a proto se používají především pro dokončovací operace do řezné rychlosti cca  $360 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . V praxi jsou mezi cermety počítány materiály na bázi karbidu titanu, nitridu titanu a karbonitridu.

Nástroje osazené cermety jsou vhodné pro obrábění ocelí, litiny, lité oceli, neželezných kovů a snadno obrobitelných slitin. Používají se ve formě vyměnitelných destiček pro soustružení, řezání závitů a frézování. [1]

### 2.4.4 Řezná keramika

Keramické břitové destičky snesou zahřátí až na 1200 °C. Jsou však velmi křehké, s malou pevností v ohybu (26 až 35 kg/mm<sup>2</sup>). Lze jich použít bez chlazení. [2]

Podle ČSN ISO 513 (22 0801) se pro rozdělení a značení keramických řezných materiálů používají symboly:

CA – oxidická keramika na bázi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

CM – směsná keramika na bázi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> s přísadou neoxidických komponent

CN – neoxidická keramika na bázi nitridu křemíku Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>

Řezná keramika se vyrábí ve tvaru destiček, které jsou mechanicky upínané na řeznou část nástroje. Tyto destičky jsou vyměnitelné a po opotřebení se vyřazují.

### **Řezná keramika na bázi oxidu hlinitého**

Jakkoliv je dnes k dispozici široký sortiment keramických kysličnickových materiálů, žádná z těchto komerčně dostupných sloučenin nedoznala tak širokého použití jako kysličník hlinitý Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. K významným vlastnostem této keramiky patří vysoká pevnost v tlaku, tvrdost, vysoký bod tání, tepelná vodivost, korozivzdornost a vysoká odolnost proti opotřebení. [3]

Řeznou keramiku na bázi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> je možné rozdělit na čistou, poločistou a směsnou.

Čistá keramika obsahuje 99,9 % kysličníku hlinitého Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Je doporučována většinou pro dokončovací soustružení šedé litiny, uhlíkových a nízkolegovaných ocelí při použití řezné rychlosti přesahující 100 m.min<sup>-1</sup>.

Barva čisté keramiky lisované za studena je bílá, u keramiky lisované za tepla je šedá.

Polosměsná keramika vzniká přidáním různých přísad do čisté keramiky, nejčastěji kysličníku zirkonu ZrO<sub>2</sub> – až do 20 %.

Vyměnitelné břitové destičky vyráběné za tepla mají černou barvu.

Směsná keramika obsahuje vedle korundu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  přísadu 20 – 40 % karbidu titanu  $\text{TiC}$ . Tento materiál má v porovnání s čistou keramikou větší odolnost proti teplotním a mechanickým rázům. Je doporučována pro frézování šedé litiny a oceli, pro soustružení načisto a jemné soustružení ocelí cementačních, zušlechtěných a tvrdé litiny.

Při výrobě vyměnitelných destiček za tepla mají černou barvu.

### **Řezná keramika na bázi nitridu křemíku**

Keramika na bázi nitridu křemíku má relativně vysokou odolnost proti mechanickému porušení břitu a doporučuje se pro dokončování i hrubování šedé litiny. Je vhodná i pro přerušované řezy, odolná proti teplotním rázům, vhodná pro soustružení žárovevých slitin na bázi niklu.

Keramika na bázi  $\text{Si}_3\text{N}_4$  si zachovává vysoký stupeň tvrdosti za tepla při teplotách, které slinutý karbid již nesnáší.

Tento řezný materiál je doporučován pro obrábění šedé litiny za sucha i při chlazení, řeznými rychlostmi až  $400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

### **2.4.5 Polykrystalický diamant**

Nejtvrdším známým materiálem je přírodní monokrystalický diamant, jehož tvrdosti syntetický polykrystalický diamant PD téměř dosahuje. Jemné krystaly diamantu jsou spojovány slinováním za vysokých teplot a tlaků. Poloha krystalů je nahodilá a v žádném směru nevytváří místa, která by mohla být zdrojem lomu. Malé břity z PD jsou pevně zakotveny na vyměnitelné břitové destičce ze slinutého karbidu, která jim zaručuje odolnost proti tepelným a rázovým šokům. Trvanlivost břitu je mnohonásobně vyšší než u slinutých karbidů.

Polykrystalický diamant je doporučen pro obrábění všech neželezných kovů a nekovových materiálů jako např. sklolaminátů, výlisků plněných abrazivními plnidly, tvrdého kaučuku, grafitu, skla atd. Z kovových materiálů je vhodný zejména pro obrábění slitin hliníku, mědi

a jejich slitin, obrábění titanu a jeho slitin. Perspektivní je jeho nasazení v oblasti obrábění dřeva. Je vhodný pro soustružení, frézování a vrtání. [1]

## 2.5 Frézovací stroje

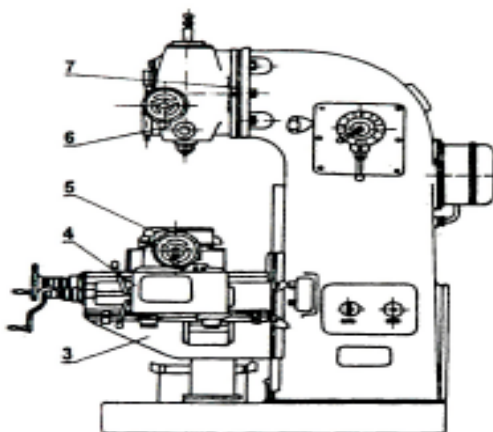
Frézky jsou vyráběny a dodávány ve velkém počtu modelů a velikostí, často pak s rozsáhlým zvláštním příslušenstvím. Zpravidla se člení do čtyř základních skupin – konzolové, stolové, rovinné a speciální. Z hlediska řízení pracovního cyklu se rozlišují frézky ovládané ručně a řízené programově.

Velikost frézky určuje šířka upínací plochy stolu a velikost kužele ve vřetenu pro upnutí nástroje.

### 2.5.1 Konzolové frézky

Charakteristickou částí těchto strojů je výškově přestavitelná konzola po vedení stojanu. Po konzole se pohybuje příčný stůl s podélným pracovním stolem. Tato kombinace pohybů umožňuje přestavování obrobku upnutého na pracovním stole ve třech pravoúhlých souřadnicích vzhledem k nástroji.

Konzolové frézky jsou vhodné pro frézování rovinných a tvarových ploch u menších a středně velkých obrobků v kusové a malosériové výrobě. Vyrábějí se ve třech základních variantách, a to jako konzolové frézky svislé, vodorovné a univerzální frézky.

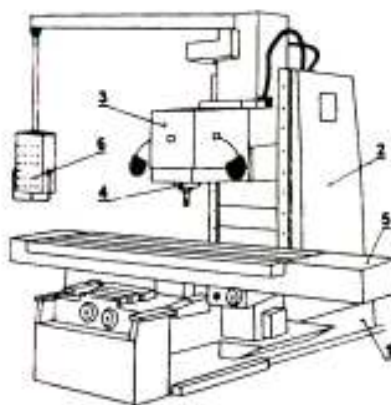


Obr. 13. Konzolová frézka svislá

### 2.5.2 Stolové frézky

Stolové frézky nemají konzolu a mají obvykle podélný a příčný stůl. Pohyb ve svislém směru pro nastavení nástroje vzhledem k obrobku je zajištěn přemísťováním frézovacího vřeteníku po vedení stroje.

Na stolových frézkách lze kvalitativně a produktivně obrábět rozměrnější a těžší součástky. Vyrábějí se jak v provedení svislém, tak i vodorovném.

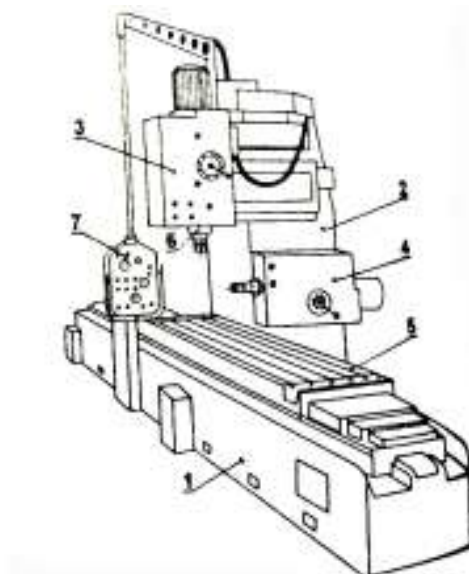


Obr. 14. Svislá stolová frézka

### 2.5.3 Rovinné frézky

Patří mezi nejvýkonnější druh frézek. Jsou robustní konstrukce a umožňují obrábět těžké obrobky. Jsou vhodné v kusových a malosériových výrobách, uplatňují se však dobře i v sériové výrobě. Pracuje se na nich nejčastěji frézovacími hlavami při obrábění vodorovných, svislých a šikmých ploch a stopkovými frézami při frézování úzkých ploch a drážek. U rovinných frézek má pracovní stůl jeden stupeň volnosti, pohybuje se pouze v jednom vodorovném směru. [1]





Obr. 15. Rovinná frézka

### 3 OBROBITELNOST, ŘEZIVOST NÁSTROJE

#### 3.1 Obrobitelnost

Obrobitelnost je technologická vlastnost daného materiálu, která charakterizuje jeho vhodnost k obrábění. Zahrnuje vliv mechanických a fyzikálních vlastností materiálu, chemického složení, tepelného zpracování, struktury a způsoby výroby polotovaru na kvalitativní, kvantitativní a ekonomické výsledky procesu řezání.

Obrobitelnost nelze vztáhnout jen k samotnému materiálu, protože závisí i na způsobu obrábění a řezných podmínkách. Teoretický pojem obrobitelnosti nelze tedy odloučit od pojmu řezivost nástroje, protože konečný ekonomický, energetický a kvalitativní výsledek obrábění závisí mimo uvedené charakteristiky materiálu obrobku také na fyzikálních vlastnostech břitu nástroje. [1]

Podle způsobu a rozsahu hodnocení rozlišujeme absolutní, relativní a komplexní vyjádření obrobitelnosti. Absolutní obrobitelnost je vyjádřena absolutní hodnotou příslušného ukazatele obrobitelnosti. Při relativním hodnocení obrobitelnosti porovnáváme vlastnosti určitého materiálu s vlastnostmi základního nebo etalonového materiálu a vztah vyjádříme převodovým číslem nebo indexem obrobitelnosti. Při komplexním hodnocení obrobitelnosti se snažíme jedním číselným ukazatelem vyjádřit několik technologických vlastností zkoumaného materiálu.

Absolutní obrobiteľnosť môžeme rozlíšiť na tieto druhy:

- kinetická obrobiteľnosť,
- dynamická obrobiteľnosť,
- mikrogeometrická obrobiteľnosť.

### **Kinetická obrobiteľnosť**

je stanovená na základe otupení rezného břitu.

### **Dynamická obrobiteľnosť**

Rezná síla, krútiaci moment alebo výkon potrebný k úberu obráběného materiálu a rezné teplo jsou mírou dynamické obrobiteľnosti.

### **Mikrogeometrická obrobiteľnosť**

Jakost obrobeného povrchu a přesnost lineárních rozměrů závisí na mikrogeometrické obrobiteľnosti. [5]

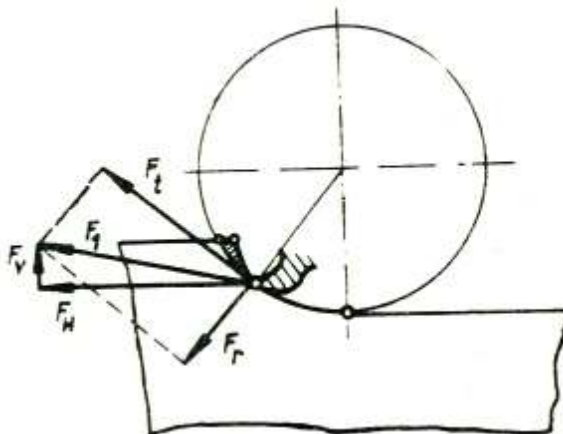
## **3.2 Řezné síly při frézování**

Při frézování se mění průřez třísky, čím se mění i rezné síly. Velikost rezných sil závisí také na počtu zubů v záběru a na nich okamžité plochy. Výsledný rezný odpor je potom součtem rezných odporů projevujících se na jednotlivých zubech.

### **3.2.1 Síly působící na zubu frézy**

Rezné síly, kterými působí zub válcové frézy na materiál, si můžeme představit jako dvě síly:

1. Obvodová síla  $F_c$ , která je tangenciální k dráze pohybu řezné hrany po kružnici.
2. Radiální síla  $F_{cN}$ , která směřuje ze středu této kružnice



Obr.16. Schéma rozkladu sil působící  
na zub válcové frézy

Výslednice těchto sil  $F_a$  se rozkládá na dvě složky – horizontální sílu  $F_f$  a vertikální sílu  $F_{fN}$ . Pokud má fréza šikmé nebo šroubové zuby, působí na zubu v osové směru ještě síla  $F_o$ , která se silou  $F_a$  dává výslednou sílu  $F$ .

Podobný rozklad sil můžeme udělat i pro práci s čelními frézami, a to jak při symetrickém, tak i nesymetrickém frézování.

Nejdůležitější řeznou silou je obvodová síla  $F_c$ , která vykonává práci na odřezání třísky. Podle ní se vypočítá jednak efektivní výkon  $P_c$ , stejně se počítají uzly mechanismu hlavního pohybu. Osová síly  $F_o$  působí tlakem na axiální ložiska vřetena frézovacího stroje a na upínací přípravky pro obrobek a zatěžuje matici příčného posuvu a vedení stroje.

Radiální síla  $F_{cN}$  působí tlakem na ložiska vřetena – vytváří doplňující moment tření. Přitom ohýbá trn frézy a je důležitým faktorem při výpočtu složitěho namáhání (ohyb od radiální síly a krut od obvodové síly)

Horizontální složka  $F_f$  zatěžuje mechanismus posuvu frézovacího stroje. Podle její velikosti se dimenzují uzly posunového mechanismu a elementy upínání obrobku a přípravků.

Vertikální složka  $F_{fN}$  namáhá konzolu frézovacího stroje ohybem. Boční síla  $F_x$  vyvolává tření v podélném vedení stolu.

Uvedené složky řezných sil se nejčastěji stanovují pokusně dynamometry speciální konstrukce.

### 3.2.2 Obvodová síla při válcovém frézování

Poměr obvodové síly k průřezu odebrané vrstvy je měrný řezný odpor. Hloubka odebrané vrstvy se po délce frézování mění, takže se bude měnit i měrný řezný odpor. Okamžitá hodnota měrného řezného odporu bude:

$$k_f = C_\omega C_1 h_x^k \quad (5)$$

kde  $C_1$  je konstanta, která vyjadřuje všeobecné podmínky frézování,

$C_\omega$  – koeficient, který vyjadřuje vliv úhlu sklonu šroubovice,

$h_x$  – hloubka třísky v dané poloze zubu,

$k$  – exponent, který závisí na vlastnostech obráběného materiálu, opotřebení zubu frézy a na řezné kapalině (obvykle je -0,2 až -0,4)

Pokud má fréza rovné zuby

$$F_c = k_f S_x$$

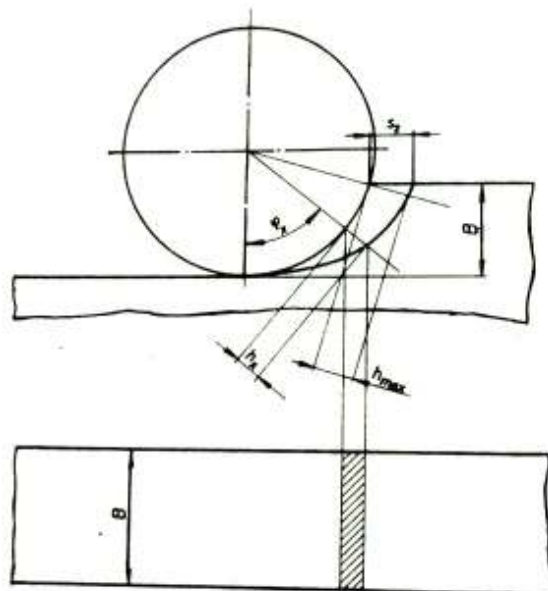
kde  $S_x = h_x B$  je průřez třísky při dané poloze zubu, přičemž

$$h_x = s_z \sin \varphi_x$$

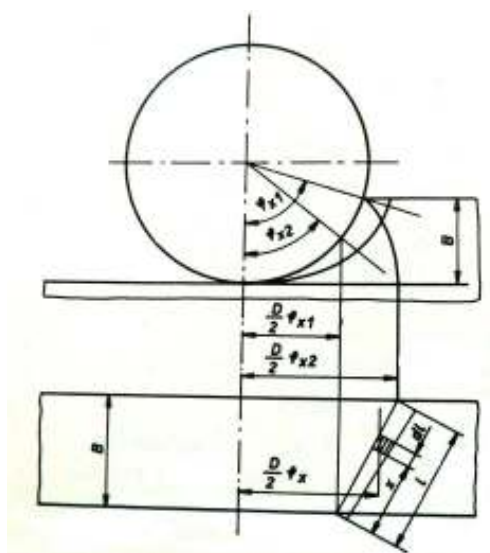
$$F_c = k_f S_x = C_\omega C_1 h_x^k h_x B = C_\omega C_1 h_x^{k+1} B = C_\omega C_1 (s_z \sin \varphi_x)^{k+1} B \quad (6)$$

Jestliže má fréza šroubové zuby, hodnota hloubky třísky se mění podle polohy jednotlivých bodů řezné hrany zubu. Obvodovou sílu můžeme stanovit integrováním. Na zubu frézy vymežeme nekonečně malý element  $dl$ . Síla na tomto elementu, kolmá na řeznou hranu, bude:

$$dF' = k_f h_x dl$$



Obr. 17. Schéma změny hloubky odebrané vrstvy na délce oblouku při frézování



Obr. 18. Schéma pro výpočet obvodové síly při válcovém frézování

avšak

$$dl = \frac{D}{2} d\varphi_x \frac{1}{\sin \omega}$$

Průmět síly  $dF'$  do směru obvodové síly je:

$$dF_c = dF' \cos \omega$$

a po dosazení

$$dF_c = \frac{D}{2} k_f h_x \cot g \omega d\varphi_x = \frac{D}{2} C_\omega C_1 s_z^{k+1} \sin^{k+1} \varphi_x \cot g \omega d\varphi_x$$

Úplnou hodnotu síly na zubu frézy je možné vyčíslit integrováním  $dF_t$  v hranicích úhlů pracovní části řezné hrany

$$F_c = \frac{D}{2} C_\omega C_1 s_z^{k+1} \cot g \omega \int_{\varphi_{x1}}^{\varphi_{x2}} \sin^{k+1} \varphi_x d\varphi_x \quad (7)$$

Podle poznatků o integraci trigonometrických funkcí

$$\int_{\varphi_{x1}}^{\varphi_{x2}} \sin^{k+1} \varphi_x d\varphi_x = \cos^k \frac{\varphi_0}{2} \frac{2^{k+2}}{k+2} \left( \sin^{k+2} \frac{\varphi_{x2}}{2} - \sin^{k+2} \frac{\varphi_{x1}}{2} \right)$$

kde  $\varphi_0$  je velikost úhlu, který je mezi integračními intervaly.

Pokud  $k$  je záporné a malé ( $k = -0,2 \div -0,4$ ) a úhel  $\varphi_0/2$  je také poměrně malý, můžeme předpokládat, že

$$\cos^k \frac{\varphi_0}{2} \cong 1$$

Potom vzorec pro výpočet okamžité hodnoty obvodové síly na zubu frézy bude mít tvar

$$F_c = \frac{2^{k+2}}{k+2} \frac{D}{2} C_\omega C_1 s_z^{k+1} \cot g \omega \left( \sin^{k+2} \frac{\varphi_{x2}}{2} - \sin^{k+2} \frac{\varphi_{x1}}{2} \right) \quad (8)$$

Pokud je v záběru víc zubů, vzorec pro celkovou obvodovou sílu na fréze bude:

$$F_c = \frac{2^{k+2}}{k+2} \frac{D}{2} C_\omega C_1 s_z^{k+1} \cot g \omega \sum \left( \sin^{k+2} \frac{\varphi_{x2}}{2} - \sin^{k+2} \frac{\varphi_{x1}}{2} \right) \quad (9)$$

Vzorec pro kroutící momenty bude mít tvar

$$M = \frac{D}{2} \sum F_c [kp.mm] \quad (10)$$

a pro výkon na řezání

$$P_c = \frac{\sum F_c v_c}{102.60} [KW] \quad (11)$$

Rovnice pro výpočet je možné zjednodušit. Pro zjednodušení dostaneme strukturu rovnic pro výpočet obvodové síly a výkonu. Tvar těchto rovnic (při počtu zubů frézy  $z$ ) je pro celkovou obvodovou sílu

$$F_c = C_{Fc} B_{S_z}^{y_{Ft}} t^{x_{Ft}} z D^{-q_{Fc}} [kp] \quad (12)$$

pro řezný výkon

$$P_c = C_c n B S_z^{y_{Pc}} t^{x_{Pc}} z D^{q_{Pc}} [kW] \quad (13)$$

Struktura rovnic pro obvodovou sílu a výkon je podobná i pro jiné druhy fréz – kromě tvarových. To má potom vzorec pro výpočet výkonu odlišnou strukturu.

Rovnice pro výpočet obvodové síly a výkonu pro čelní frézování se liší od rovnic pro výpočet těchto veličin při válcovém frézování tím, že obvodová síla a výkon se v závislosti od šířky frézování lineárně nemění, takže [8]

$$F_c = C_{Fc} B^{z_{Fc}} t^{x_{Fc}} S_z^{y_{Fc}} z D^{-q_{Fc}} [kp] \quad (14)$$

$$P_c = C_P B^{z_{Pc}} t^{x_{Pc}} S_z^{y_{Pc}} z D^{q_{Pc}} n [kW] \quad (15)$$

### 3.3 Řezivost nástroje

Aby mohl řezný nástroj oddělovat v procesu řezání z obráběného materiálu třísku vnikáním jeho řezného klínu do obrobku, musí splňovat tyto požadavky:

- mít vyšší tvrdost než obráběný materiál,
- být odolný proti mechanickému a tepelnému namáhání,

- tvar břitu musí být jednoznačně určen veličinami (úhly a rozměry) tak, aby byl podle nich vyrobitelný a dal se po otupení obnovit ostřením. Soustava prvků, jímž je definována břitová část nástroje, se nazývá geometrie břitu. [7]

## 4 METODY A APARATURY PRO URČOVÁNÍ ŘEZNÝCH SIL

Při obrábění kovů je třeba znát kromě ostatních parametrů charakterizujících proces tvoření třísky též velikost řezné síly a jejich složek, ovlivňující soustavu stroj - nástroj - obrobek.

Existuje několik způsobů při určování řezných sil:

- určování řezných sil na základě analytických vzorců (z geometrie nože a rozměrů třísky),
- určování řezných sil pomocí měrného řezného odporu,
- určování řezných sil z empirických vzorců,
- měření řezných sil při obrábění.

Jelikož velikost jednotlivých složek řezné síly je ovlivňována řeznými podmínkami, jsou výsledky získané výpočtem ze vzorců pouze přibližné a v praxi je nutno je porovnávat s experimentálně zjištěnými výsledky.

Řeznou sílu a její složky můžeme při obrábění měřit dvojím způsobem:

- nepřímým měřením sil,
- přímým měřením dynamometrem.

### 4.1 Nepřímé měření řezných sil

Pro běžné měření v praxi obvykle vystačíme s méně přesnými metodami určení střední hodnoty řezné síly: změřením výkonu motoru stroje nebo kroučícího momentu na vřetenu. Z těchto hodnot vypočítáme tangenciální složku  $F_z$ .

### 4.2 Přímé měření řezných sil



Nepřesnost metod nepřímého měření řezných sil vede k užívání přesnějších metod přímého měření řezné síly a jejich složek pomocí dynamometrů. Metoda záleží v měření pružných deformací některého vhodného elementu dynamometru, které vznikají při zatížení řeznou silou resp. její složkou. Z deformací tohoto elementu se po zesílení usuzuje na velikost i směr jednotlivých složek řezné síly. Řezné síly můžeme vhodnými prostředky sledovat nejen staticky (střední hodnotu), ale i dynamicky znázorňovat jejich průběh oscilografy. Podle počtu složek řezných sil, které současně měříme, dělíme dynamometry na jednosložkové, dvousložkové, třísložkové. Podle druhů operací, pro něž dynamometr používáme, rozlišujeme dynamometry pro soustružení, vrtání, frézování atd. Požadavky na aparaturu k měření řezných sil jsou:

- tuhost,
- malá setrvačnost,
- přesnost,
- citlivost,
- stabilita cejchování,
- dostatečný měřicí rozsah,
- minimální ovlivňování složek navzájem,
- minimální rozměry a hmotnost,
- spolehlivost.

Dynamometr se obvykle skládá ze tří základních částí:

1. Pružný článek, který se vlivem vnějšího zatížení pružně deformuje nebo se pružně přemísťuje atd.
2. Snímač, který mění mechanickou změnu pružného článku na hodnotu elektrickou nebo tlakovou.
3. Přijímač, který zpracovává signál snímače, zesiluje jej, a popřípadě jeho velikost zaznamenává.

Měřicí metody používané u dynamometrů:

1. mechanické,
2. hydraulické,

3. pneumatické,
4. elektrické.

Největší a také nejrozšířenější skupinu tvoří dynamometry elektrické. U všech typů těchto dynamometrů je základem měření přeměna měřené veličiny na veličinu elektrickou. Získaná elektrická veličina je dále upravována a měřena vhodným citlivým elektrickým přístrojem, cejchovaným v jednotkách měřené veličiny.

Předností elektrických metod měření je větší přesnost a citlivost, rychlost měření a jednoduchá registrace. Nevýhodou je větší pořizovací cena a vyšší náklady na údržbu zařízení.



Obr. 19. Blokové schéma zařízení pro elektrické měření  
neelektrických veličin

Měřicí obvod zesiluje nebo mění veličinu získanou na výstupu snímače na veličinu měřitelnou měřidlem (napětí, proud).

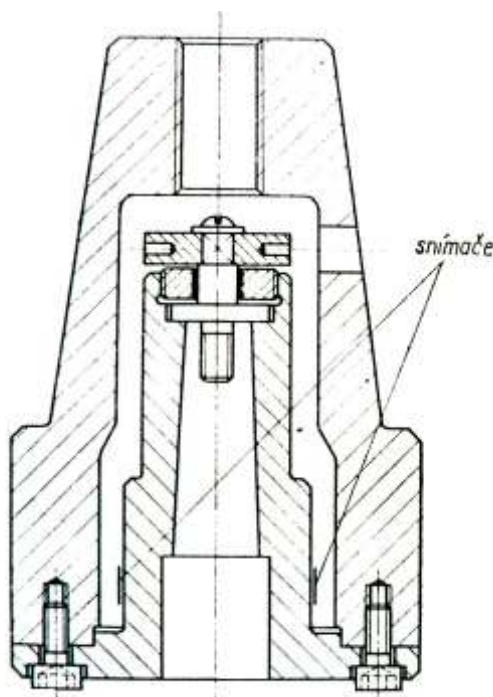
Měřidlo v běžném případě zajišťuje optickou indikaci měřené veličiny číselníkovým přístrojem, nebo přímo zapisuje registračním přístrojem časový průběh měřené veličiny. Měřicí obvod a měřidlo tvoří dohromady přijímač. Podle typu změny měřené veličiny ne veličinu elektrickou dělíme snímače do dvou skupin:

1. Snímače aktivní (generátorové): jsou to snímače, jejichž výstupní veličina je elektrický proud nebo napětí, tedy veličina, již lze po případném zesílení měřit.
2. Snímače pasivní (parametrické): jsou to snímače, které měří měřenou veličinu na jinou elektrickou veličinu (např. kapacitu) a tuto dále v měřícím obvodu mění na napětí nebo proud. Kapacita je potom parametrem elektrického obvodu. [5]

Na měření řezných sil při frézování se používají většinou speciální nožové hlavy se vsazenými nástroji. Deformační elementy jsou vytvořené pomocí drážek resp. otvorů vyfrézovaných do tělesa nožové hlavy. Deformace elementů se měří zpravidla odporovými

tenzometry, nebo se v důsledku deformace mění mezera mezi kotvou a jádrem indukční cívky a změnu indukčního odporu registruje měřící aparatura.

Při komplexních měření se měří i osová síla, přičemž deformační element tvoří membrána. Odpor proti posuvu se měří tak, že se obrobek upne na upínací stůl, kde jsou drážkami vytvořené deformační elementy, na kterých jsou nalepené tenzometrické pásy. [8]



Obr. 20. Dynamometrická nožová hlava  
na měření řezných sil při frézování

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍL BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

1. Studium obrobitelnosti a měření řezných sil při frézování
2. Základy programování číslicově řízených strojů
3. Konstrukce, vývoj dynamometru pro frézování kovů a polymerů

## 6 FRÉZOVÁNÍ, MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU A VÝKONU

### 6.1 Frézovací stroj FC 16 CNC

Frézování bylo prováděno na CNC frézovacím stroji FC 16 CNC. Tento obráběcí stroj je stolová frézka, která je řízená přes počítač. Pro frézování je možné užít nástroje s válcovou upínací stopkou do  $\varnothing 10\text{mm}$  a nástrčné s upínacím průměrem 16 mm. Možno použít nástroje jak z rychlořezné oceli tak i ze slinutých karbidů, kvalitní a pečlivě naostřené. Běžně můžeme obrábět hliníkové slitiny a polymerní materiály vhodné pro třískové obrábění. Při užití šedé litiny (42 2425) je nutno uvažovat pouze o dokončovacím obrábění s malými úběry materiálu. Rozsah velikosti otáček je 0 – 3000 ot/min a rozsah velikosti posuvu je 0 – 1000 mm/min. [10]

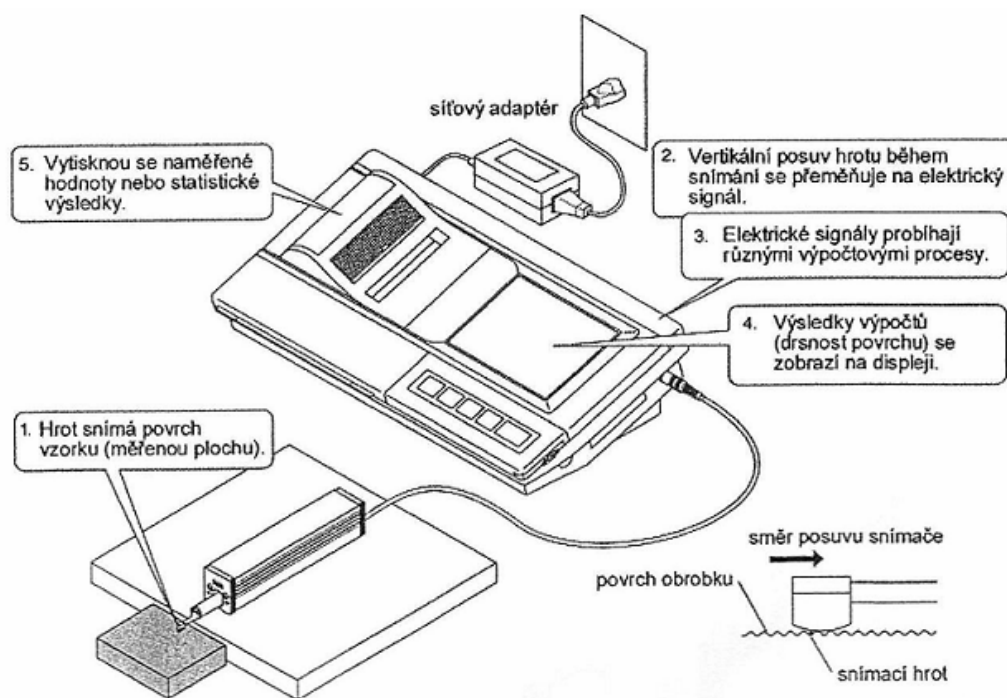


Obr. 21. Frézka FC 16 CNC

## 6.2 Měření drsnosti povrchu

Měření drsnosti povrchu bylo prováděno na přístroji MITUTOYO SJ – 301. Tento měřicí přístroj je určen na měření v dílenském prostředí. Svým snímacím hrotem dokáže měřit strukturu povrchu a charakterizovat ji za pomoci řady parametrů podle různých národních a mezinárodních norem. Výsledky měření se zobrazí digitálně a graficky na speciální na dotek citlivé ovládací obrazovce a pomocí vestavěné tiskárny se vytisknout.

Snímací hrot tohoto přístroje zaznamenává i nejmenší nepravidelnosti povrchu vzorku. Drsnost povrchu se vypočítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu, ke kterému dochází, když snímací hrot přejíždí přes nepravidelnosti povrchu. Poloha snímacího hrotu vůči obrobku musí být zajištěna tak, aby posuv měření byl rovnoběžný s povrchem obrobku. [9]



Obr. 22. Přístroj na měření drsnosti povrchu – MITUTOYO SJ – 301

## 6.3 Měření výkonu

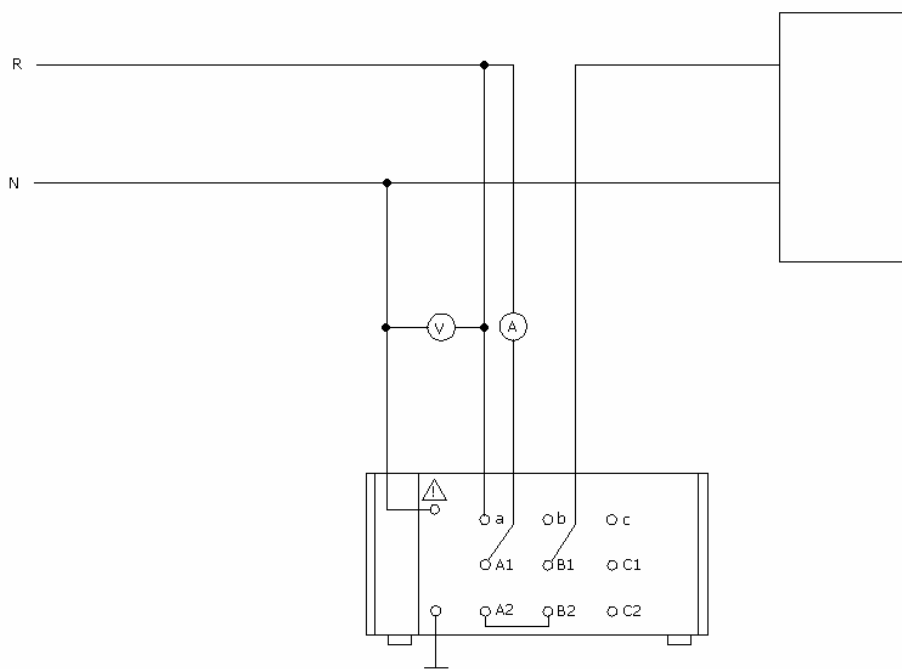
Měření výkonu bylo prováděno na přístroji WATTREG 1. Přístroje typu WATTREG 1 až 3 se řadí svým principem do skupiny registračních přístrojů s přímým ovládním zapisovacího ústrojí, tzn., že energie potřebná pro pohyb zapisovacího ústrojí je podávána

z obvodu měřené veličiny. Liniový zápis v pravoúhlých souřadnicích provádí zapisovací pero napojené na zásobník inkoustu.

Přístroj WATTREG 1 je registrační wattmetr s dvojitým ferrodynamickým měřicím ústrojím s děleními proudovými cívkami v umělém zapojení. [11]



Obr. 23. Přístroj WATTREG



Obr. 24. Schéma zapojení přístroje WATTREG v jednofázové síti



Obr. 25. Použití přístroje WATTREG v praxi

## 7 OBRÁBĚNÝ MATERIÁL

### 7.1 Polyvinylchlorid (PVC)

Jeden z nejuniverzálnějších polymerů. Amorfni s mírně větvenými molekulami, obsahuje malé množství krystalického podílu. Monomer je vinylchlorid. Polymerace je suspenzní, emulzní a bloková.

#### 7.1.1 Tvrdý PVC

Má výbornou odolnost vůči vodě, kyselinám, zásadám i organickým chemikáliím. Vyznačuje se vysokou tvrdostí a mechanickou pevností. Jeho dalšími vlastnostmi jsou vysoký lesk a čírost, samozhášivost. Zpracovává se vytlačováním, vstřikováním, válcováním, lisováním a tepelným tvarováním. Používá se na trubky a armatury, profily ve stavebnictví (okna), desky, fólie, duté výrobky (láhve na kosmetiku a čisticí prostředky).



### 7.1.2 Měkčený PVC

Vzniká přísadou změkčovadla. Zpracování měkčeného PVC je válcování, vytlačování, máčení, natírání, rotační natavování. Používá se na podlahoviny, koženky, hračky, těsnění, rukavice, fólie, desky a na izolaci elektrických vodičů.

## 8 NAMĚŘENÉ HODNOTY DRSNOSTI A JEJICH ZPRACOVÁNÍ

Frézovalo se třemi způsoby – se změnou posuvu, hloubky řezu a řezné rychlosti. Rozměry obrobku byly 150 x 100 mm a nástroj měl  $\varnothing$  8mm a čtyři břity.

### 8.1 Vliv posuvu na jakost povrchu

Posuv : 10, 30, 60, 120, 150 mm/min

Otáčky: 2000 ot./min

Hloubka řezu: 1mm

Frézování: sousledné a nesousledné

#### 8.1.1 Program pro frézování se změnou posuvů

N05 G90

N10 G00 X-10 Y-6 Z0

N15 G00 X20 Y-6 Z-1

N20 M03 S2000

N25 G01 X20 Y155 Z-1 F10

N30 G00 X92 Y155 Z-1

N35 G01 X92 Y-6 Z-1

N40 G00 X28 Y-6 Z-1

N45 G01 X28 Y155 Z-1 F30

N50 G00 X84 Y155 Z-1

N55 G01 X84 Y-6 Z-1

N60 G00 X36 Y-6 Z-1

N65 G01 X36 Y155 Z-1 F60

N70 G00 X76 Y155 Z-1

N75 G01 X76 Y-6 Z-1

N80 G00 X44 Y-6 Z-1

N85 G01 X44 Y155 Z-1 F120

N90 G00 X68 Y155 Z-1

N95 G01 X68 Y-6 Z-1

N100 G00 X52 Y-6 Z-1

N105 G01 X52 Y155 Z-1 F150

N110 G00 X60 Y155 Z-1

N115 G01 X60 Y-6 Z-1

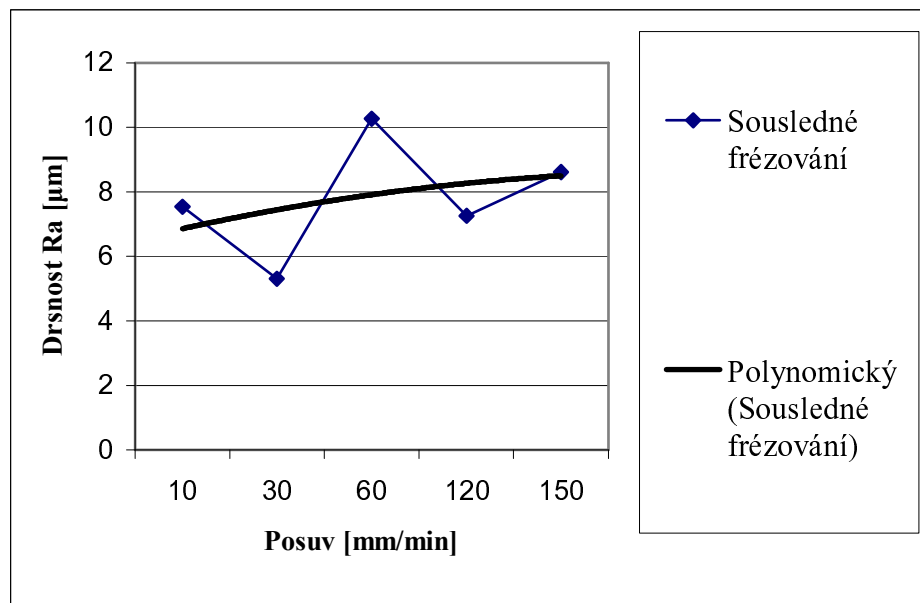
N120 G00 X-10 Y-6 Z0

N125 M30

### 8.1.2 Naměřené hodnoty a jejich zpracování při změně posuvu

Tab. 4. Naměřené drsnosti při změně posuvu

Počet měření	Posuv [mm/min]									
	10		30		60		120		150	
	Drsnost Ra [μm]		Drsnost Ra [μm]		Drsnost Ra [μm]		Drsnost Ra [μm]		Drsnost Ra [μm]	
1	3,72	5,80	5,56	5,41	12,33	6,43	6,27	9,90	8,55	8,98
2	10,35	6,24	4,03	5,02	11,54	7,05	5,42	8,11	11,24	7,44
3	9,44	8,37	3,91	3,91	7,90	5,79	7,70	8,97	12,19	8,98
4	7,52	6,95	6,67	5,33	6,51	4,13	7,80	13,70	5,60	14,01
5	7,25	7,68	6,67	6,02	16,43	8,72	8,18	9,05	5,56	14,18
6	6,12	7,74	4,58	6,30	7,84	5,30	7,71	8,54	7,64	12,54
7	8,32	6,35	5,73	5,78	9,32	6,36	7,65	8,72	9,51	11,00
<b>Průměr</b>	<b>7,53</b>	<b>7,02</b>	<b>5,31</b>	<b>5,40</b>	<b>10,27</b>	<b>6,25</b>	<b>7,25</b>	<b>9,57</b>	<b>8,61</b>	<b>11,02</b>



Obr. 26. Závislost drsnosti materiálu na posuvu

## 8.2 Vliv hloubky řezu na jakost povrchu

Hloubka řezu: 1, 2, 3, 4, 5 mm

Posuv: 30 mm/min

Otáčky: 2000 ot./min

Frézování: sousledné a nesousledné

### 8.2.1 Program pro frézování se změnou hloubky řezu

N05 G90

N10 G00 X-10 Y-6 Z0

N15 G00 X20 Y-6 Z-1

N20 M03 S2000

N25 G01 X20 Y155 Z-1 F30

N30 G00 X92 Y155 Z-1

N35 G01 X92 Y-6 Z-1

N40 G00 X28 Y-6 Z-2

N45 G01 X28 Y155 Z-2

N50 G00 X84 Y155 Z-2

N55 G01 X84 Y-6 Z-2

N60 G00 X36 Y-6 Z-3

N65 G01 X36 Y155 Z-3

N70 G00 X76 Y155 Z-3

N75 G01 X76 Y-6 Z-3

N80 G00 X44 Y-6 Z-4

N85 G01 X44 Y155 Z-4

N90 G00 X68 Y155 Z-4

N95 G01 X68 Y-6 Z-4

N100 G00 X52 Y-6 Z-5

N105 G01 X52 Y155 Z-5

N110 G00 X60 Y155 Z-5

N115 G01 X60 Y-6 Z-5

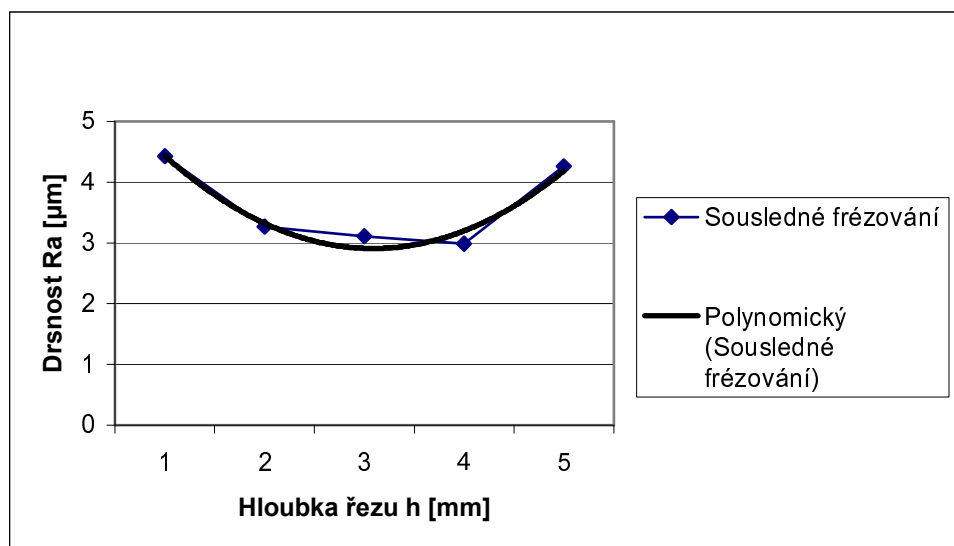
N120 G00 X-10 Y-6 Z0

N125 M30

### 8.2.2 Naměřené hodnoty a jejich zpracování při změně hloubky řezu

Tab. 5. Naměřené drsnosti při změně hloubky řezu

Počet měření	Hloubka řezu h [mm]									
	1		2		3		4		5	
	Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
1	4,70	3,79	3,41	4,12	3,03	3,32	2,80	2,69	4,53	2,09
2	4,55	2,27	2,65	3,29	3,37	3,10	2,74	3,14	6,78	2,74
3	6,92	3,33	4,31	3,96	3,07	2,74	3,20	2,51	2,50	2,64
4	4,60	3,44	3,57	2,87	3,37	3,46	3,59	2,47	3,43	3,16
5	3,53	3,85	2,80	3,37	3,12	2,75	2,72	2,59	1,93	5,09
6	3,83	3,31	3,27	6,11	2,86	3,47	2,69	2,62	2,13	3,07
7	2,86	3,25	2,91	3,18	2,98	3,48	3,19	2,87	8,49	3,27
<b>Průměr</b>	<b>4,43</b>	<b>3,32</b>	<b>3,27</b>	<b>3,84</b>	<b>3,11</b>	<b>3,19</b>	<b>2,99</b>	<b>2,70</b>	<b>4,26</b>	<b>3,15</b>



Obr. 27. Závislost drsnosti materiálu na hloubce řezu

### 8.3 Vliv řezné rychlosti na jakost povrchu

Řezná rychlost: 13, 19, 25, 38, 50, 75 m/min

Hloubka řezu: 1mm

Posuv: 30 mm/min

Frézování: sousledné a nesousledné

### 8.3.1 Řezná rychlost a otáčky

U programu na CNC obráběcí stroje se zadávají místo řezné rychlosti otáčky. Po úpravě vztahu (1) lze psát:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} [\text{min}^{-1}] \quad (16)$$

Příklad výpočtu:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 25}{\pi \cdot 8} = 994,7 [\text{min}^{-1}]$$

volím  $n = 1000 [\text{min}^{-1}]$

### 8.3.2 Program pro frézování se změnou řezných rychlostí

N05 G90

N10 G00 X-10 Y-6 Z0

N15 G00 X5 Y-6 Z-1

N20 M03 S500

N25 G01 X5 Y155 Z-1 F30

N30 G00 X93 Y155 Z-1

N35 G01 X93 Y-6 Z-1

N40 G00 X13 Y-6 Z-1

N45 M03 S750

N50 G01 X13 Y155 Z-1

N55 G00 X85 Y155 Z-1

N60 G01 X85 Y-6 Z-1

N65 G00 X21 Y-6 Z-1

N70 M03 S1000

N75 G01 X21 Y155 Z-1

N80 G00 X77 Y155 Z-1

N85 G01 X77 Y-6 Z-1

N90 G00 X29 Y-6 Z-1

N95 M03 S1500

N100 G01 X29 Y155 Z-1

N105 G00 X69 Y155 Z-1

N110 G01 X69 Y-6 Z-1

N120 G00 X37 Y-6 Z-1

N125 M03 S2000

N130 G01 X37 Y155 Z-1

N135 G00 X61 Y155 Z-1

N140 G01 X61 Y-6 Z-1

N145 G00 X45 Y-6 Z-1

N150 M03 S3000

N155 G01 X45 Y155 Z-1

N160 G00 X53 Y155 Z-1

N165 G01 X53 Y-6 Z-1

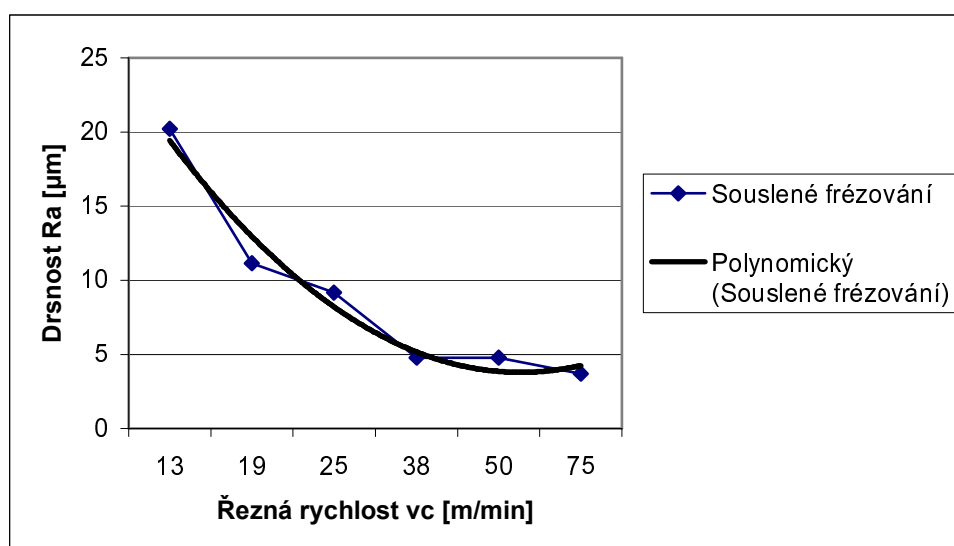
N170 G00 X-10 Y-6 Z-0

N175 M30

### 8.3.3 Naměřené hodnoty a jejich zpracování při změně řezné rychlosti

Tab. 6. Naměřené drsnosti při změně řezné rychlosti

Počet měření	Řezná rychlost [m/min]											
	13		19		25		38		50		75	
	Drsnost Ra [μm]		Drsnost Ra [μm]		Drsnost Ra [μm]		Drsnost Ra [μm]		Drsnost Ra [μm]		Drsnost Ra [μm]	
1	17,86	11,41	8,96	10,69	10,50	6,31	4,53	9,72	4,29	4,74	4,05	4,60
2	23,79	19,00	12,58	9,35	8,12	5,74	4,56	6,41	4,07	4,57	3,67	4,68
3	7,63	16,18	10,89	7,23	10,03	4,81	3,57	6,76	4,24	3,86	3,90	6,58
4	28,43	16,24	9,35	13,43	5,33	4,72	4,91	6,42	4,91	3,20	4,06	5,62
5	31,45	11,70	8,69	12,91	6,89	5,76	5,28	6,40	5,25	4,11	4,27	4,47
6	17,10	17,72	12,40	17,49	10,19	5,81	5,36	7,23	5,32	4,28	3,00	6,32
7	15,33	18,26	15,23	10,41	13,20	6,03	5,18	6,34	5,43	4,50	3,10	5,21
<b>Průměr</b>	<b>20,23</b>	<b>15,79</b>	<b>11,16</b>	<b>11,64</b>	<b>9,18</b>	<b>5,60</b>	<b>4,77</b>	<b>7,04</b>	<b>4,79</b>	<b>4,18</b>	<b>3,72</b>	<b>5,35</b>



Obr. 28. Závislost drsnosti materiálu na řezné rychlosti

## 9 URČENÍ ŘEZNÝCH SIL Z VÝKONU

Obrábělo se pouze se změnou řezné rychlosti a konstantním posuvem. Byl použit stejný CNC program jako pro měření drsnosti, pouze s jinými hodnotami.

### 9.1 Naměřené hodnoty a jejich zpracování

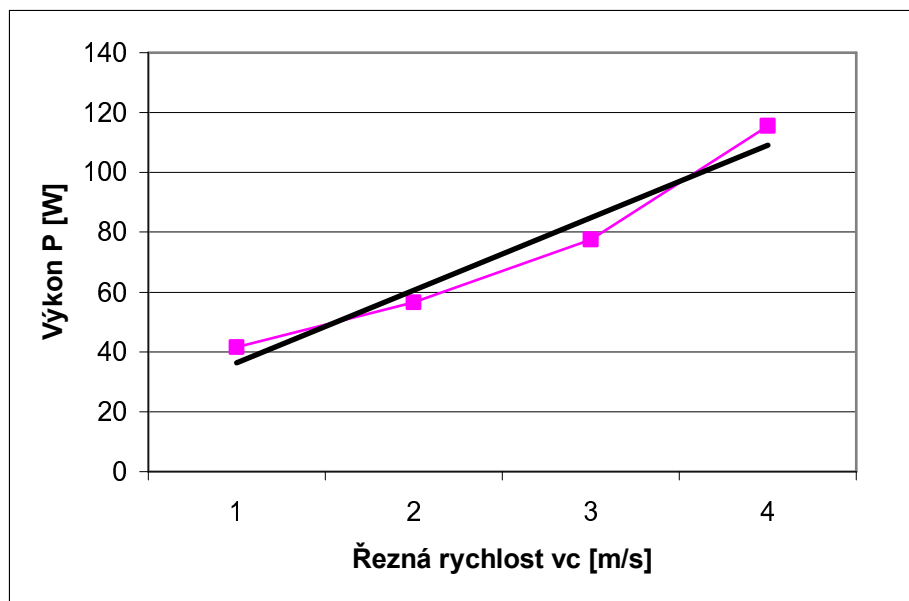
Řezná rychlost: 60, 120, 180, 240 m/min

Posuv: 0,1 mm/ot.

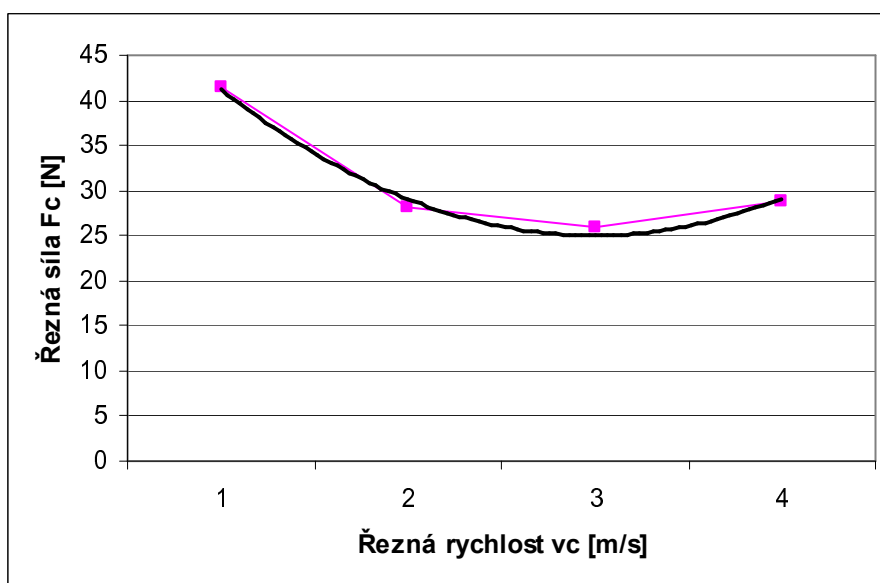


Tab. 7. Naměřené a vypočtené hodnoty

Měř.	Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	Řezná rychlost $v_c$ [m/s]	Výkon $P$ [W]	Řezná síla $F_c$ [N]
1	60	1	41,5	41,5
2	120	2	56,5	28,3
3	180	3	77,5	25,8
4	240	4	115,5	28,9



Obr. 29. Závislost výkonu na řezné rychlosti



Obr. 30. Závislost řezné síly na řezné rychlosti

### 9.1.1 Použité vztahy při zpracování

Řezná síla se vypočítá z výkonu a řezné rychlosti:

$$F_c = \frac{P}{v_c} [N] \quad (17)$$

Příklad výpočtu:

$$F_c = \frac{P}{v_c} = \frac{56,5}{2} = 28,25 [N]$$

volím  $F_c = 28,3 [N]$

## ZÁVĚR

Byla změřena závislost drsností obrobeného materiálu frézováním se změnou posuvu, hloubkou řezu a řeznou rychlostí. Frézoval se PVC, čtyřbřitým nástrojem – frézou o  $\varnothing$  8mm a sice sousledně a nesousledně. Naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek. Drsnosti, které se získaly sousledným frézováním se vynášely do grafů.

Provedený experiment nám ukazuje:

- Se zvyšováním posuvu se zvyšovala drsnost povrchu, to se také očekávalo. Nejnižší hodnota Ra 5,31 byla dosažena sousledně při posuvu 30 mm/min, otáčkách 2000 ot./min a hloubce řezu 1 mm.
- V závislost drsností obrobeného povrchu na hloubce řezu vidíme parabolickou závislost. Experiment nám tedy ukázal, že nejnižší hodnota Ra 2,99 byla dosažena při hloubce řezu 4 mm, při konstantních otáčkách vřetena 2000 ot./min a posuvu 30 mm/min u sousledného frézování. U nesousledného byla drsnost povrchu ještě nižší, a sice Ra 2,70 při stejných řezných podmínkách.
- Pokud zvyšujeme řeznou rychlost, tak nám klesá drsnost obrobeného materiálu. Dá se tedy obecně konstatovat, že čím vyšší bude řezná rychlost, tím kvalita povrchu bude vzrůstat. Podle očekávání se nejvhodnějšího výsledku dosáhlo hodnoty Ra 3,72. Řezná rychlost zde dosahoval 75 m/min s posuvem 30 mm/min.

Pro experimentální určení řezných sil se měřil výkon při konstantním posuvu a měnila se pouze řezná rychlost. Získaná data se zapisovala do tabulky a vygenerovaly se grafy.

Dané závislosti nám ukazují:

- Se vzrůstající řeznou rychlostí nám téměř lineárně vzrůstá i výkon.
- Čím vyšší řezná rychlost, tím nižší bude řezná síla.

Určování řezných sil z výkonu je nepřesné a je spíše odhadem, proto byl vyvíjen třísložkový dynamometr. Jeho výkresová dokumentace je v příloze. Jako software pro zpracování byl použit AutoCAD 2002 a Autodesk Inventor 6.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2004
- [2] ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. Praha: SNTL, 1957
- [3] LUKOVICS, Imrich. *Konstrukční materiály a technologie*. Brno: ES VUT, 1986
- [4] PŘIKRYL, Z. a kolektiv. *Technologie obrábění*. Praha: SNTL, 1967
- [5] LIEMERT, DRÁBEK, ONDRA, VAVŘÍK. *Obrábění*. Praha: SNTL, 1974
- [6] HOLVEK, J., KAČÍREK, J., TOMAN K. *Frézky, frézy a frézování*. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1951
- [7] KAŠTÁNEK, Otakar. *Strojírenské materiály a technologie*. Brno: ES VUT, 1980
- [8] BUDA, J., BÉKÉS, J. *Teoretické základy obrábění kovov*. Bratislava: ALFA, 1977
- [9] Mitutoyo SJ – 301, *Přístroj na měření drsnosti povrchu. Návod k použití*.
- [10] Microstep, s.r.o., *Uživatelská příručka řídiaceho systému FC 16 CNC*. 1993
- [11] Metra Blansko, *Návod k obsluze přenosného registračního přístroje WATTREG*.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

D	Průměr obrobku nebo nástroje
n	Otáčky obrobku nebo nástroje
t	Hloubka odfrézované vrstvy materiálu
b	Šířka frézované plochy
$s_{\min}$	Posuv za minutu
$v_c$	Řezná rychlost
N	Potřebný efektivní výkon motoru
$s_z$	Posuv na zub
R	Poloměr frézy
z	Počet zubů frézy
$t_s$	Řezný čas
L	Celková dráha frézy i s přeběhy
$s_{\min}$	Posuv za minutu
$C_1$	Konstanta, která vyjadřuje všeobecné podmínky frézování
$C_\omega$	Koeficient, který vyjadřuje vliv úhlu sklonu šroubovice
$h_x$	Hloubka třísky v dané poloze zubu
$k_f$	Měrný řezný odpor
$F_{fN}$	Vertikální složka výsledné řezné síly
$F_f$	Horizontální složka výsledné řezné síly
$F_t$	Síla tření mezi čelem nože a třískou
$\varphi$	Úhel pootočení zubu frézy
$\varphi_0$	Velikost úhlu
$S_x$	Průřez třísky
$\omega$	Kruhová frekvence

---

M	Kroutící moment
$P_r$	Řezný výkon
$C_F$	Materiálová konstanta pro určování řezné síly
q	Kvocient
$x_F$	Exponent pro výpočet řezné síly
$y_F$	Exponent pro výpočet řezné síly
B	Šířka frézování
$F_c$	Obvodová síla
$F_{cN}$	Radiální síla
$P_e$	Efektivní výkon
$F_O$	Osová síla
$U_m$	Měrný výkon
T	Trvanlivost
VB	Opotřebení hřbetu
$K_V$	Součinitel obrobiteľnosti
PVC	Polvinylchlorid
ČSN	Česká technická norma
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu
h	Hloubka řezu
k	Exponent, který závisí na vlastnostech obráběného materiálu, opotřebení zubu frézy a na řezné kapalině

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Obráběná plocha, obrobená plocha, plocha řezu. ....	10
Obr. 2. Okružovací frézování. ....	12
Obr. 3. Čelní frézování. ....	12
Obr. 4. Sousedné frézování. ....	14
Obr. 5. Nesousedné frézování. ....	15
Obr. 6. Válcová fréza se zuby ve šroubovici. ....	19
Obr. 7. Normální dvoubřitá drážkovací fréza. ....	20
Obr. 8. Nástrčná čelně-válcová fréza. ....	20
Obr. 9. Kotoučová fréza. ....	21
Obr. 10. Úhlová fréza. ....	22
Obr. 11. Normální fréza na drážky T. ....	22
Obr. 12. Příklad třívrstvého povlaku břitu nástroje. ....	28
Obr. 13. Konzolová frézka svislá. ....	32
Obr. 14. Svislá stolová frézka. ....	32
Obr. 15. Rovinná frézka. ....	33
Obr. 16. Schéma rozkladu sil působící na zub válcové frézy. ....	35
Obr. 17. Schéma změny hloubky odebrané vrstvy na délce oblouka při frézování. ....	37
Obr. 18. Schéma pro výpočet obvodové síly při válcovém frézování. ....	38
Obr. 19. Blokové schéma zařízení pro elektické měření neelektrických veličin. ....	42
Obr. 20. Dynamometrická nožová hlava na měření řezných sil při frézování. ....	44
Obr. 21. Frézka FC 16 CNC. ....	46
Obr. 22. Přístroj na měření drsnosti povrchu – MITUTOYO SJ - 301. ....	47
Obr. 23. Přístroj WATTREG. ....	48
Obr. 24. Schéma zapojení přístroje WATTREG v jednofázové síti. ....	48
Obr. 25. Použití přístroje WATTREG v praxi. ....	49
Obr. 26. Závislost drsnosti materiálu na posuvu. ....	52
Obr. 27. Závislost drsnosti materiálu na hloubce řezu. ....	54
Obr. 28. Závislost drsnosti materiálu na řezné rychlosti. ....	57
Obr. 29. Závislost výkonu na řezné rychlosti. ....	58
Obr. 30. Závislost řezné síly na řezné rychlosti. ....	58

---

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Měrný výkon .....	15
Tab. 2. Dosahovaná přesnost a jakost povrchu .....	16
Tab. 3. Rozdělení a označování nástrojových ocelí .....	25
Tab. 4. Naměřené drsnosti při změně posuvu .....	51
Tab. 5. Naměřené drsnosti při změně hloubky řezu.....	54
Tab. 6. Naměřené drsnosti při změně řezné rychlosti .....	57
Tab. 7. Naměřené a vypočtené hodnoty .....	58



**SEZNAM PŘÍLOH**

- P I      Sestava.
- P II     Sestava svěráku.
- P III    Čelist L.
- P IV    Čelist P.
- P V     Tělo.
- P VI    Ručka.