

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci  
nositelka Řádu práce  
Fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 8  
Strojírenská technologie  
zaměření obrábění a ekonomika

Katedra obrábění a montáže

Měření řezných sil při odvalovacím frézování

Vitouš Kořenovský

DP - ST - 1685/81

Vedoucí práce: Ing. Robert Kvapil, CSc. /KOM VŠST/

Konzultant: Ing. Jiří Burian /KOM VŠST/

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	:	80
Počet příloh a tabulek	:	1
Počet obrázků	:	55
Počet výkresů	:	-

KOH/E

DT:

22. května 1981

strojn $\acute{y}$  a textiln $\acute{i}$   
Vysok $\acute{a}$  škola: ..... v Liberci .....  
Fakulta: ..... strojn $\acute{i}$  .....

Katedra: ..... obr $\acute{a}$ b $\acute{e}$ n $\acute{i}$  a mont $\acute{a}$ že .....  
Školn $\acute{i}$  rok: ..... 1980/81 .....

## DIPLOMOV $\acute{Y}$ $\acute{U}$ KOL

pro ..... Vitouše K o ř e n o v s k é h o .....  
obor ..... 23 - 07 - 8 strojírenská technologie .....

Protože jste splnil..... požadavky u $\acute{c}$ ebn $\acute{i}$ ho pl $\acute{a}$ nu, zad $\acute{a}$ v $\acute{a}$  V $\acute{a}$ m vedoucí katedry ve smyslu sm $\acute{e}$ rn $\acute{i}$ c mini-sterstva školstv $\acute{i}$  a kultury o st $\acute{a}$ t $\acute{n}$ ích z $\acute{a}$ v $\acute{e}$ re $\acute{c}$ n $\acute{y}$ ch zkoušk $\acute{a}$ ch tento diplomov $\acute{y}$   $\acute{u}$ kol:

N $\acute{a}$ zev t $\acute{e}$ matu: ..... Řezné síly při odvalovacím frézování .....  
..... ozubení .....  
.....

Pokyny pro vypracování:

- 1/ Politickohospodářský význam diplomového zadání
- 2/ Možnosti a způsoby měření řezných sil při odvalovacím frézování ozubení
- 3/ Zjištění závislosti řezné síly na modulu, počtu zubů (průměru), na řezných podmínkách, na sklonu zubu pro zadaný materiál a nesousledné frézování ozubení
- 4/ Vyhodnocení technologických zkoušek a zpracování do grafů, případně analytických vztahů

Autorské právo se řídí autorským zákonem  
Právo užití v učebnicích a odborných publikacích  
je povoleno bezplatně za předpokladu, že bude  
uváděn název díla a jméno autora.  
Číslo vydání: 1/80

VYDANÉ V LIBERCI  
LIBEREC  
1980

Rozsah grafických prací: dle potřeby zadání

Rozsah průvodní zprávy: asi 60 stran textu

Seznam odborné literatury: Kvapil, R.: Konstrukce dynamometru pro měření složek řezné síly při odvalovacím frézování a obrábění pro stroje OFA 31 a OHA 32A. Výzkumná zpráva VŠST Liberec, 1976

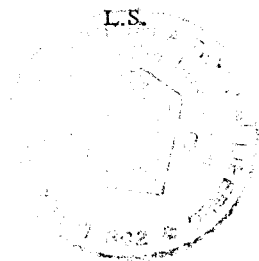
Pfanter H.: Pfanter Wälzfräsen. Berlin 1976

Vedoucí diplomové práce: Ing. Robert Kvapil, CSc

Konsultanti: Ing. Jiří Burian

Datum zadání diplomového úkolu: 15.10.1980

Termín odevzdání diplomové práce: 22.5. 1981



Doc. Ing. Vojtěch Dráb, CSc

*Vedoucí katedry*

Doc. RNDr Bohuslav Stříž, CSc

*Děkan*

Liberci 15.10 80  
V ..... dne ..... 19

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V liberci 22.5.1981

*Vítouš Kocourek*  
.....

podpis

Souhrn:

Předkládaná práce se zabývá problematikou řezných sil při odvalovacím frézování ozubení.

Cílem bylo stanovit závislosti řezné síly na modulu, počtu zubů, na řezných podmínkách a na sklonu zubu pro zadaný materiál a nesousledné frézování ozubení.

V úvodní teoretické části jsou uvedeny základní poznatky o řezných silách a faktory, které mají vliv na jejich velikost.

Tyto teoretické závěry jsou doplněny o výsledky praktických zkoušek přímého měření řezných sil při odvalovacím frézování pomocí dynamometru DOF - 32. Praktické měření bylo provedeno na odvalovací frézce OFA 71 AC v n.p. TOS Čelákovice.

Z porovnání výsledků teorie a provedeného experimentu vyplývá vyhovující shoda, čímž se potvrdila správnost použité metodiky měření a možnost její využití v praxi.

1. Obsah

	str.
Souhrn	1
1. Obsah	2
1.1. Seznam použitých symbolů	5
1.2. Úvod	7
2. Výroba ozubení odvalovacím frézováním	9
2.1. Analýza řezného procesu	9
2.1.1. Princip výroby ozubení odvalovacím frézováním	9
2.1.2. Válcová odvalovací fréza	15
2.1.3. Záběrové poměry při odvalovacím frézování	19
2.2. Řezné síly při odvalovacím frézování ozubení	25
2.2.1. Rozbor řezných sil	26
3. Možnosti a způsoby určení velikosti řezných sil při odvalovacím frézování ozubení	30
3.1. Měření řezných sil při odvalovacím frézování	30
3.1.1. Nepřímé měření řezných sil	30
3.1.2. Přímé měření řezných sil	31
3.1.2.1. Přímé měření řezných sil pomocí dynamometru	32
3.1.2.2. Přímé měření řezných sil působících na jednotlivé zuby frézy	33
3.2. Výpočet řezných sil při odvalovacím frézování	33
3.2.1. Výpočet řezných sil z empirických vztahů	33
3.2.2. Výpočet řezné síly z měrné řezné síly a průřezu odřezávané vrstvy	37

3.3.	Vliv hlavních faktorů na změnu řezné síly	str. 39
3.3.1.	Vliv modulu a posuvu	39
3.3.2.	Vliv počtu zubů a sklonu zubů	40
3.3.3.	Vliv opotřebení	41
3.3.4.	Vliv způsobu frézování na rozložení a velikost zatížení jednotlivých zubů frézy	41
4.	Vlastní měření řezných sil	42
4.1.	Použitá metoda měření	43
4.2.	Zařízení použité při měření	44
4.2.1.	Třísložkový dynamometr DOF - 32	44
4.2.2.	Obráběcí stroj	53
4.2.3.	Nástroje	55
4.2.4.	Obrobky	55
4.3.	Řezné podmínky použité při měření	55
4.4.	Naměřené hodnoty	55
5.	Vyhodnocení technologických zkoušek	59
5.1.	Metoda plánování experimentu	59
5.1.1.	Stanovení analytických závislostí pro řezné síly	62
5.2.	Závislost řezných sil $F_z$ $stř_{max}$ , $F_x$ $stř_{max}$ , $F_y$ $stř_{max}$ na modulu	63
5.3.	Závislost řezných sil $F_z$ $stř_{max}$ , $F_x$ $stř_{max}$ , $F_y$ $stř_{max}$ na počtu zubů kola	76
5.4.	Závislost řezných sil $F_z$ $stř_{max}$ , $F_x$ $stř_{max}$ , $F_y$ $stř_{max}$ na řezné rychlosti	76
5.5.	Závislost řezných sil $F_z$ $stř_{max}$ , $F_x$ $stř_{max}$ , $F_y$ $stř_{max}$ na posuvu	76

5.6.	Závislost řezných sil $F_{z \text{ stř max}}$ , $F_{x \text{ stř max}}$ , $F_{y \text{ stř max}}$ na sklonu šroubovice zubů	str. 77
6.	Závěr	78
7.	Seznam použité literatury	79



1.1. Seznam použitých symbolů

$c_M$	materiálová konstanta
$d_a$	hlavový průměr frézy /mm/
$h_p$	výška paty zubu /mm/
$h_h$	výška hlavy zubu /mm/
$h$	výška zubu ozubeného kola /mm/
$i$	počet zubových hřebenů frézy
$k$	zdvih vačky /mm/
$k_z$	měřná řezná síla /MPa/
$m$	modul /mm/
$r_z$	poloměr základního válce /mm/
$s$	posuv na otáčku frézy /mm/
$v$	řezná rychlost /m.min /
$x$	posunutí základního profilu
$z$	počet zubů ozubeného kola
$D_a$	hlavový průměr ozubeného kola /mm/
$F$	řezná síla /N/
$F_z$	hlavní složka řezné síly /N/
$F_h$	složka řezné síly, kolmá na $F_z$ /N/
$F_x$	radiální složka řezné síly /N/
$F_y$	axiální složka řezné síly /N/
$F_{z1}$	hlavní složka řezné síly, působící na jeden zub frézy /N/
$F_z$ stř	střední hodnota hlavní složky řezné síly /N/
$\alpha$	úhel záběru /°/
$\alpha_h$	úhel hřbetu na hlavě zubu /°/
$\beta_0$	úhel sklonu zubů ozubeného kola /°/
$\beta_{dw}$	úhel sklonu šroubovice zubových drážek frézy /°/

- $\alpha$  úhel stoupání šroubovice zubů zubových  
hřebenů frézy / ° /
- $\alpha_h$  úhel čela na hlavě zubu frézy / ° /
- $\sigma$  úhel nastavení frézy / ° /
- $\omega, \xi$  úhly působení řezné síly / ° /

 $x_F, y_F$  $a_F, b_F$  koeficienty $u_{Fz}, v_{Fz}$  $x_{Fz}, y_{Fz}$

## 1.2. Úvod

Program výstavby rozvinuté socialistické společnosti klade vysoké nároky na celé naše národní hospodářství. Zajištění cílů hospodářské a sociální politiky na léta 1981 - 1985, vytyčených XVI. sjezdem KSČ, předpokládá růst národního důchodu o 14 až 16 % a zvýšení průmyslové výroby o 18 až 20 %. Zabezpečení těchto náročných úkolů vyžaduje důsledně realizovat růst efektivnosti výroby a kvality veškeré práce, racionálního využívání výrobního potenciálu na základě urychleného zavádění výsledků vědy a technického pokroku do praxe. Přírůstku převážné části národního důchodu je nutné dosáhnout zvýšením produktivity práce. K tomu je, mimo jiné, nezbytně nutné podstatně lépe zhodnocovat a racionálně využívat veškeré materiály a energie, zdokonalovat a rozvíjet technologii výroby se zaměřením na maximální hospodárnost. Klíčové postavení v dynamickém rozvoji národního hospodářství pro celé období osmdesátých let má strojírenství, odněhož se očekává nejen kvantitativní ale zejména kvalitativní rozvoj.

Ve strojírenském odvětví bude v průběhu 7.pětiletého plánu zvýšena výroba o 33 až 35 % při růstu produktivity práce o 30 až 32 %.

Rozsáhlý park obráběcích strojů představuje základní fond materiální výroby. Nemalý podíl na celkovém počtu obráběcích strojů představují stroje na výrobu ozubení, protože ozubená kola jsou ve strojních zařízeních jedním z nejpoužívanějších prvků.

Vývoj obráběcích strojů na výrobu ozubení se mimo jiné zaměřuje na zvětšování tuhosti strojů a jejich funkčních skupin, zvětšováním motorického výkonu strojů, zvětšováním rozsahu posuvů, a otáček vřetena.

Aby se dala optimálně řešit vlastní konstrukce strojů na ozubení a jejich hlavních skupin, optimálně dimenzovat pohony, rozměry frézovacích vřeten a volit nejvhodnější

velikost nástrojů, je třeba znát velikost řezné síly a jejich složek, působících při řezném procesu. Působení řezných sil na deformace strojů se projevuje zvláště výrazně v přesnosti vyráběných ozubených kol, protože tvar zubů je vytvářen odvalováním nástroje po obrobku a tvar a přesnost zubů jsou dány jejich vzájemnou polohou.

Znalost průběhu řezných sil během obrábění umožňuje podrobněji zkoumat řezný proces a tím optimalizovat řezné podmínky a celou technologii výroby ozubení.

Uplatněním těchto principů se dále docílí zvýšení životnosti nástroje a samotného obráběcího stroje. Tím, že obráběcí stroj pracuje při optimálních řezných podmínkách, vznikají i další úspory, vyplývající z menších nároků na údržbu strojů, potřebu náhradních dílů apod, což ve svém souhrnu představuje růst produktivity práce.

## 2. Výroba ozubení odvalovacím frézováním

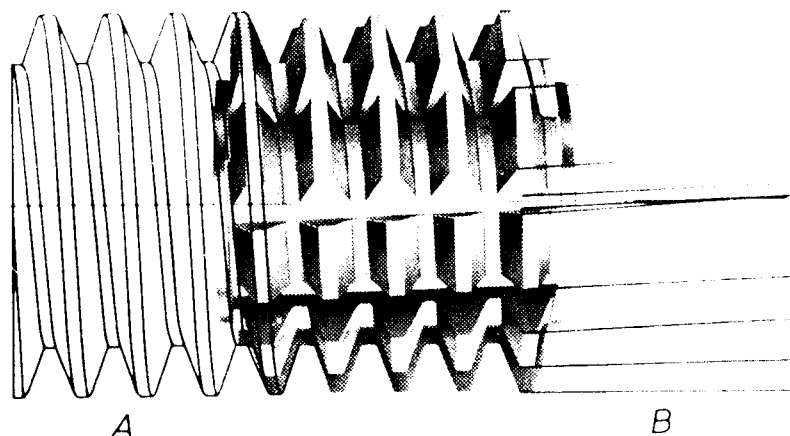
Nejrozšířenějším způsobem výroby čelního evolventního ozubení je frézování ozubení odvalovacím způsobem. Oproti jiným používaným výrobním způsobům (např. odvalovacím obrážením ozubení) má tato výrobní metoda řadu předností. Je to především vysoká produktivita práce a plynulost výrobního pochodu bez ztrátových reverzačních časů. Mezi předností patří i to, že frézou daného modulu lze vyrobit ozubení s libovolným počtem zubů, ozubení s přímými a šikmými zuby a ozubení nekorigovaná i korigovaná. Ozubená kola vyráběná odvalovacím frézováním dosahují běžně 6., 5., 4. třídy přesnosti, v případě použití korekčního zařízení na odvalovací frézce a pomocí přesné frézy i 3. třídy přesnosti. Odvalovacím frézováním lze vyrábět i jiné součásti, např. hřídele s drážkovým profilem různého provedení, řetězová a rohatková kola a jiné.

Nevýhodou odvalovacího frézování jsou ztrátové časy způsobené náběhem a výběhem odvalovací frézy. Odvalovací frézování nelze použít pro výrobu stupňovitých (stromečkových) ozubených kol.

### 2. 1. Analýza řezného procesu

#### 2. 1. 1. Princip výroby ozubení odvalovacím frézováním

Odvalovací frézování ozubení je založeno na principu záběru válcového evolventního šroubového soukolí. Jedno ze spoluzabírajících válcových kol lze považovat za obrobek, druhé válcové kolo pak představuje obalové těleso odvalovací frézy. Z tohoto tělesa vzniká celistvá (monolitní) odvalovací fréza tak, že šroubová plocha je přerušena řeznými drážkami vytvářejícími zubové mezery pro odvod třísek a zároveň vytvářejícími čelní plochy jednotlivých zubů. Drážky jsou buď přímé (rovnoběžné s osou frézy), nebo jsou ve šroubovici, kolmé na šroubovici základní. Hřbet zubů je vytvořen pod-soustružením nebo podbroušením zbývající válcové části zubů. Vznik monolitní odvalovací frézy je názorně zobrazen na obr. 1.



obr. 1.

Při frézování je odvalovací fréza a vyráběné ozubené kolo v záběru bez vůle. Pro poměr obvodových rychlostí při výrobě ozubení s přímými zuby platí:

$$\frac{\omega_N}{\omega_K} = \frac{n_N}{n_K} = \frac{z_K}{z_N} \quad (1)$$

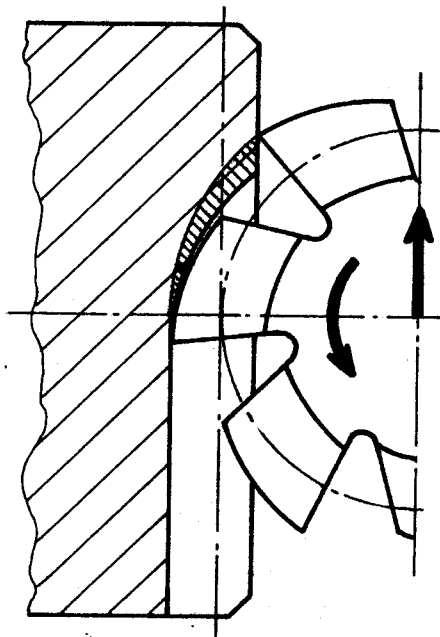
Pro jednochodou odvalovací frézu je  $z_N = 1$  a vztah (1) má pak tvar:

$$\frac{\omega_N}{\omega_K} = \frac{n_N}{n_K} = z_K \quad (2)$$

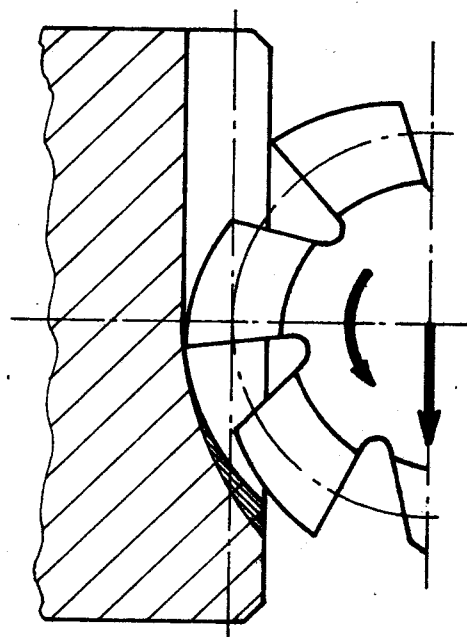
Otáčky odvalovací frézy a tedy i otáčky obrodků jsou dány požadovanou řeznou rychlostí:

$$n_N = \frac{v}{\pi d_a} \quad (3)$$

Boky zubů vyráběného ozubeného kola se vytvářejí jako obalové plochy jednotlivých poloh břitů rotující odvalovací frézy. Aby se vytvořilo ozubení po celé šířce frézovaného kola, musí se fréza kromě rotace pohybovat pracovním (axiálním) posuvem ve směru osy kola. Smysl posuvu frézy se může shodovat se smyslem otáčení frézy nebo může být opačný. První případ označujeme jako frézování sousledné (sousměrné), v druhém případě jde o frézování nesousledné (protisměrné). Oba druhy frézování jsou zachyceny na obr. 2 a obr. 3.



obr. 2



obr. 3

Z obr. 3 je patrné, že průřez odřezávané vrstvy materiálu zubové mezery má na počátku záběru zubu frézy kulovou velikost. Vzhledem k určitému malému zaoblení břitu zubu frézy, dochází k tomu, že břit po určitou dobu své dráhy pouze klouže po materiálu. Materiál není odřezáván, ale pouze stlačován, čímž vzniká tření spojené se značným vývinem tepla. Tento proces se projevuje zvýšeným opotřebením odvalovací frézy. Určitou výhodou tohoto způsobu frézování

je to, že eventuelní zpevněná kůra nebo povrchové vady obrobku jsou zuby nástroje podebírány.

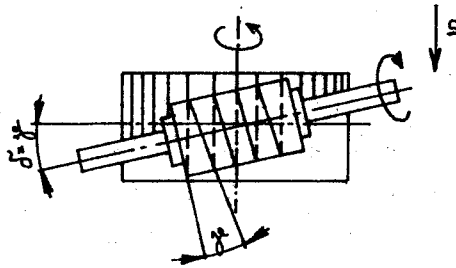
Vyšší kvality povrchu boků ozubení je dosahováno frézováním sousledným, neboť průřez odřezávané vrstvy materiálů má na počátku záběru maximální velikost, viz obr. 2. Je odstraněno klouzání břitu nástroje, snižuje se opotřebení a chvění nástroje, čímž se zvyšuje jeho životnost. Sousledné frézování ale vyžaduje frézku u níž jsou vymezeny vůle v posuvovém ústrojí.

Při frézování přímého ozubení musí být osa frézy vůči čelní rovině kola skloněna o úhel  $\sigma$ , který odpovídá úhlu stoupání šroubovice frézy na roztečném válci. Při frézování šikmých zubů být osa frézy skloněna pod takovým úhlem, aby se stoupání šroubovice frézy v místě záběru shodovalo se stoupáním šroubovice vyráběného ozubení, aby výsledná dráha břitu odvalovací frézy byla totožná se sklonem ozubení kola, musí kolu udělit přídavné otáčky. Toho se dosáhne vhodným sestavením výměnných kol diferenciálu odvalovací frézky.

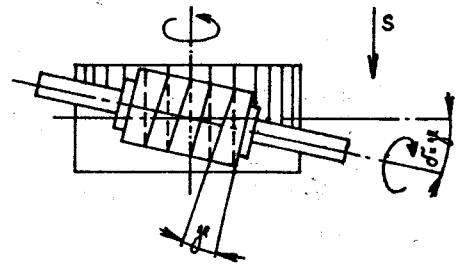
Při frézování přímého i šikmého ozubení lze frézu vyklonit vlevo nebo vpravo, podle smyslu vinutí šroubovice zubů frézy. Poloha odvalovací frézy vzhledem k vyráběnému ozubení je pro uvedené případy schematicky naznačena na obr. 4 a obr. 5.

Zubovou mezeru ozubeného kola lze vyfrézovat jedním řezem (výroba ozubených kol bez větších nároků na přesnost a kvalitu ozubení), pak se fréza přisune k obrobku radiálním posuvem o vzdálenost, odpovídající výšce zubů kola. Častěji se používá odfrézování materiálu zubové mezery dvěma řezy, tj. hrubovacím a dokončovacím. Při hrubování se fréza přisune k obrobku o menší vzdálenost než je výška zubu kola. Vzniklý přídavek se odfrézuje druhým dokončovacím řezem.



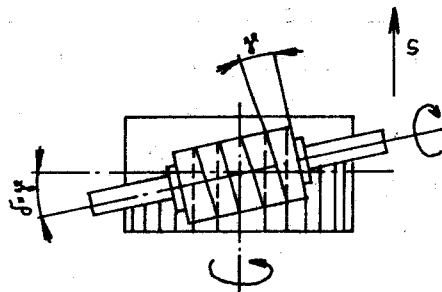


Pravá fréza

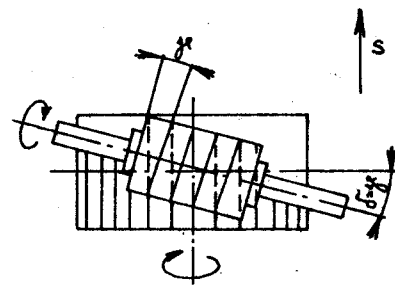


Levá fréza

Kolo s přímými zuby - frézování nesousledné

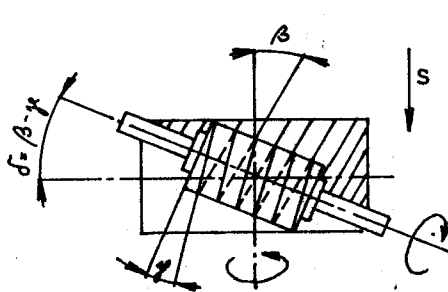


Pravá fréza

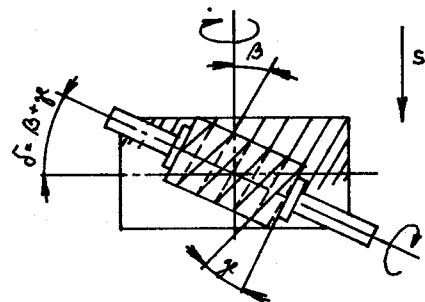


Levá fréza

Kolo s přímými zuby - frézování sousledné

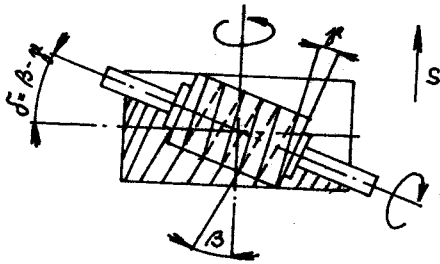


Pravá fréza

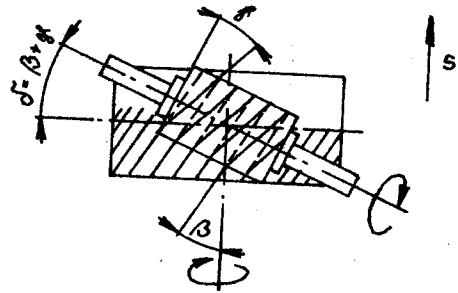


Levá fréza

Kolo se šikmými zuby s pravou šroubovicí - frézování nesousledné

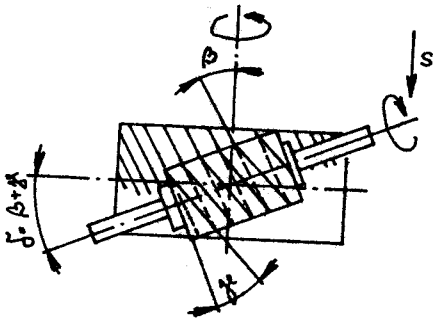


Pravá fréza

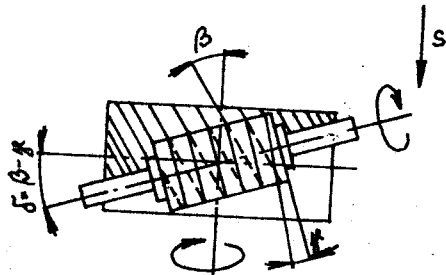


Levá fréza

Kolo se šikmými zuby s pravou šroubovicí - frézování  
sousedné

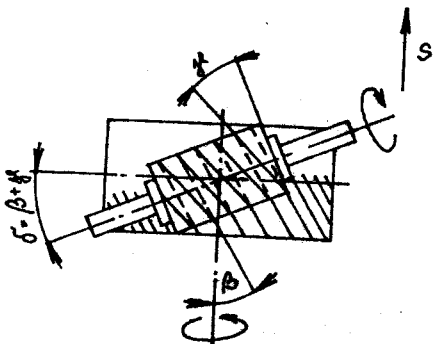


Pravá fréza

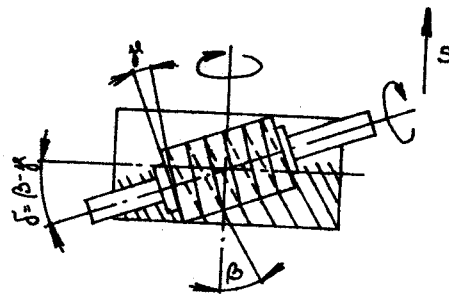


Levá fréza

Kolo se šikmými zuby s levou šroubovicí - frézování  
nesousedné



Pravá fréza



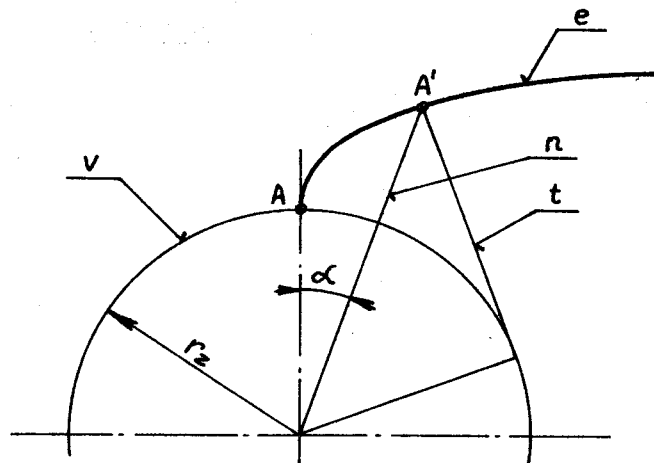
Levá fréza

Kolo se šikmými zuby s levou šroubovicí - frézování  
sousedné

### 2. 1. 2. Válcová odvalovací fréza

Válcová fréza, jak již bylo řečeno, je v podstatě válcový šroub jehož závity tvoří evolventní šroubová plocha.

Evolventní šroubová plocha vzniká šroubovým pohybem evolventy  $e$  po základním válci o poloměru  $r_2$ , viz. obr. 6 a po základní šroubovici.



obr. 6

Evolventní šroub je charakterizován tím, že v řezu kolmém na jeho podélnou osu vzniknou opět evolventy, avšak v řezu osovém i normálním nemá vypuklý profil evolventní charakter.

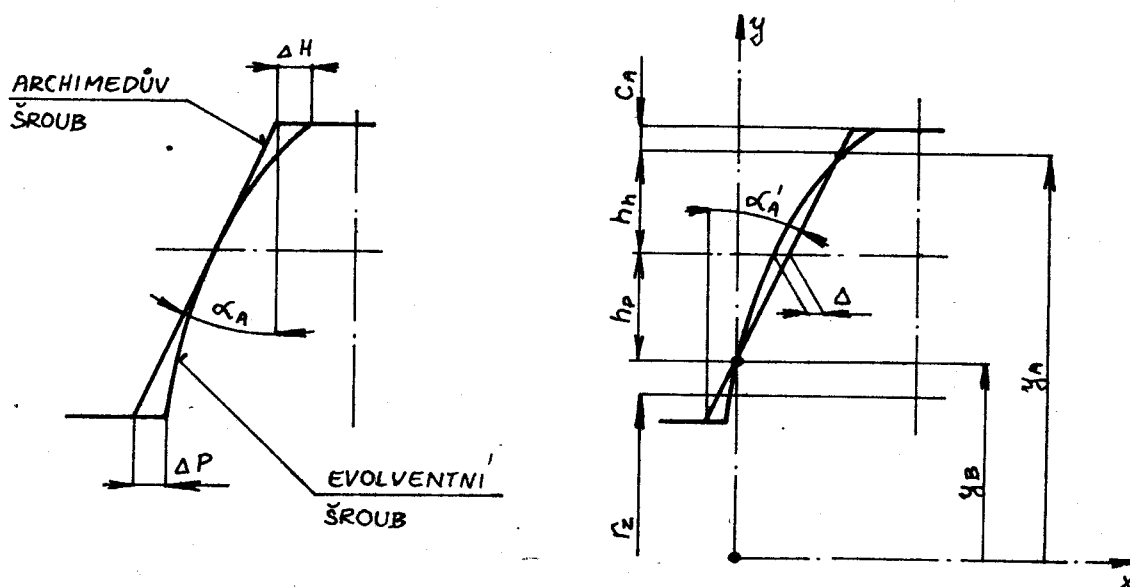
Nahradíme-li evolventní šroub šroubem Archimédovým, který vzniká pohybem přímky po šroubovici na roztečném válci, přičemž tato přímka stále prochází osou válce. Její sklon pak vůči podélné ose válce vytváří zavitový profil. V řezu kolmém na podélnou osu jsou vzniklé křivky opět Archimédovy spirály, v řezu normálním jsou boky zubů vypuklé, avšak v řezu osovém jsou boky zubu vytvořeny přímkou, tzn. tvarem snadno vyrobitelným.

Vzájemné porovnání uvedené změny, tj. nahrazení profilu evolventního šroubu profilem šroubu Archimédova, je znázorněno na obr. 7. Z obrázku je zřejmé, že přímkový profil Archimédův vytvoří zesílený profil zubu, a to jak

na jeho hlavě,  $\Delta H$ , tak i na jeho patě  $\Delta P$ . U odvalovacích fréz s malým úhlem stoupání zubů na roztečné kružnici (do  $3^\circ$ ) lze uvedené úchytky zanedbat; tato nepřesnost je do určité míry výhodná, protože se vytváří pevnější zuby v blízkosti patní kružnice, tj. místa největšího namáhání zubů.

U fréz s větším úhlem stoupání se nahrazuje evolventní profil zubu nástroje profilem přímkovým podle obr. 7, kde přímka základního profilu je proložena dvěma body A, B s úhlem sklonu  $\alpha'_A$  daným vztahem :

$$\operatorname{tg} \alpha'_A = \frac{i \cdot m (ev \alpha_A - ev \alpha_B)}{2 \cos \beta_2 (h_n + h_p + 0,5k)} \quad (4)$$



obr. 7

Úhel záběru bodu A (tj. úhel  $\alpha_A$ ) a bodu B (tj. úhel  $\alpha_B$ ) se určí pomocí vztahů:

$$\cos \alpha_A = \frac{r_z}{y_A} \quad , \quad \cos \alpha_B = \frac{r_z}{y_B} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{kde: } y_A &= \text{souřadnice bodu A} = r_z + f \cdot m \\ y_B &= \text{souřadnice bodu B} = r_z - (h_p + 0,5k) \end{aligned}$$

Při volbě součinitele hlavy zubu  $f = 1$  a vzdálenosti bodu B (tj. počátku modifikace)  $h_p = 0,55$  m lze rovnici (5) psát po úpravě v následujícím tvaru:

$$\operatorname{tg} \alpha'_A = \frac{e v \alpha_A - e v \alpha_B}{2 \cos \beta_z (1,55 + 0,5 \frac{k}{m})} \quad (6)$$

Podle uvedeného lze nahradit oblouk  $\widehat{AB}$  boku zubu přímkou AB. Tento tvar zubu frézy je pak snadno výrobitelný běžnými prostředky. Chyba úhlu  $\alpha'_A$  vzniklá popsanou úpravou, v porovnání s úhlem  $\alpha_A$  Archimedova šroubu při záběru  $\alpha = 20^\circ$  a v rozsahu běžných úhlů stoupání základní šroubovice  $\beta_z \leq 8^\circ$  je nepatrná. Vyjádřeno číselně je tato úchylka  $\Delta$ , viz obr. 7 pro běžné nástroje několik tisícín milimetru.

Přeměna výchozího povrchu nástroje (tj. evolventního nebo Archimedova šroubu) v nástroj provedena profrézováním podélných drážek, jak bylo uvedeno v kap. 2.1.1. Vznikne tak rovinná nebo šroubová plocha čela zubu nástroje. Úhel čela  $\gamma_h$  se volí nejčastěji nulový, pouze u fréz hrubovacích se volí  $\gamma_h$  v rozsahu 5 až  $15^\circ$ , viz obr. 8.

Úhel hřbetu vznikne podsoustružením nebo podoroušením hlavy a boků všech zubů frézy. Úhel hřbetu na hlavě zubu  $\alpha_h$  se volí v rozsahu 10 až  $12^\circ$ . U fréz se zuby ve šroubovici je úhel hřbetu na hlavě zubu ve směru šroubovice dán vztahem:

$$\alpha'_h = \frac{\operatorname{tg} \alpha_h}{\cos \beta_{dw}} \quad (7)$$

Úhel hřbetu na boku zubů nástroje je normální rovině dán vztahem :

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \operatorname{tg} \alpha_h \cdot \sin \alpha \quad (8)$$