

Frézování

je výrobní metoda, pomocí níž obrábíme rovinné nebo zakřivené plochy vícebřítým nástrojem – **frézou** a provádí se většinou na stroji, který se nazývá **frézka**.

1.1.1 Charakteristika výrobní metody

Hlavní rotační pohyb vykonává vícebřítý nástroj - **fréza**. **Vedlejší pohyb obrobku** je buď **přímočarý**, nebo **kruhový** – obvykle kolmý na osu otáčení nástroje. **Výsledný řezný pohyb** má tedy tvar **cykloidy**, která se liší velmi málo od kruhové dráhy, z níž vycházíme při výpočtu hlavního parametru, tj. **řezné rychlosti**:

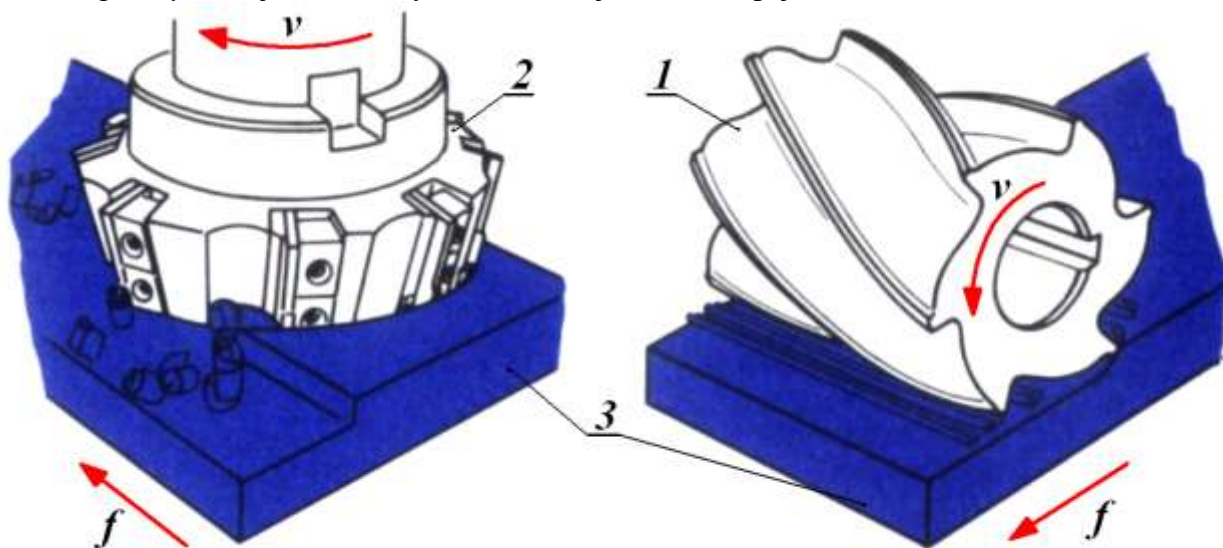
$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [m \cdot \min^{-1}]; \quad D \dots \text{průměr frézy [mm]}$$
$$n \dots \text{otáčky nástroje [ot \cdot \min^{-1}]}$$

Posuv u frézování udáváme třemi možnými způsoby:

- za minutu, označujeme f_m [$mm \cdot \min^{-1}$],
- za otáčku, označujeme f_{ot} [$mm \cdot ot^{-1}$], případně označujeme jen krátce f
- na zub, označujeme f_z [$mm \cdot z^{-1}$]

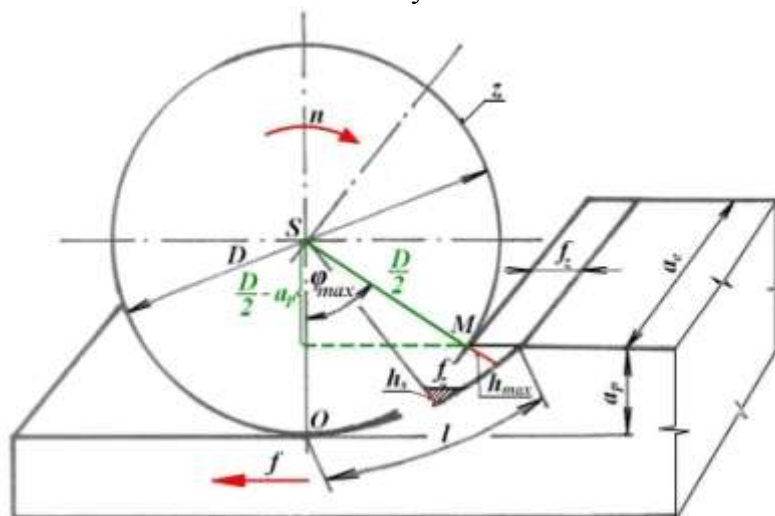
Platí mezi nimi tento vzájemný vztah: $f_m = f_{ot} \cdot n = f_z \cdot z \cdot n$

Rovinné plochy frézujeme **válcovými** a **čelními frézami**, resp. **frézovacími hlavami**.



1 - válcová fréza, 2 - čelní fréza (frézovací hlava), 3 - obrobek

1.1.2 Frézování válcovými frézami



- z počet zubů frézy
- D průměr frézy [mm]
- n otáčky nástroje [ot. min⁻¹]
- f_z ... posuv na zub [mm . z⁻¹]
- h_{max} ... maximální tloušťka třísky [mm]
- h_s ... střední tloušťka třísky [mm]
- a_e ...pracovní záběr v tomto případě je roven šířce obrobku [mm]
- a_p ... hloubka řezu [mm]
- l ... délka záběru 1 zubu [mm]
- φ_{max} ... maximální polohový úhel [°]
- p ... měrný (specifický) řezný odpor obráběného materiálu [MPa] – směrné hodnoty viz Tab. 12

Obr. 289 Frézování válcovou frézou – odebrání třísky

Z výše uvedeného obrázku vyjdeme při zjišťování velikosti **řezné síly** a **řezného výkonu** při frézování válcovou frézou:

Maximální řezná síla na 1 zub: $F_{z,max} = h_{max} \cdot a_e \cdot p$ [N]; $h_{max} = f_z \cdot \sin\varphi_{max}$ [mm]

$$\cos\varphi_{max} = \frac{\frac{D}{2} - h}{\frac{D}{2}} = \frac{D - 2h}{D} = 1 - \frac{2h}{D} \Rightarrow \varphi_{max} = \arccos\left(1 - \frac{2h}{D}\right)$$

Tato síla však odpovídá maximálnímu průřezu třísky, tj. podle způsobu frézování - buď pouze na začátku nebo na konci záběru zubu, kdy tloušťka třísky je maximální (h_{max}). Výsledná řezná síla je vektor, který se rovná součtu vektorů řezných sil působících na jednotlivých zubech. Pro naše potřeby nám postačí udělat zjednodušení, při kterém budeme uvažovat, že celková řezná síla bude rovna násobku střední řezné síly $F_{z,s}$, odpovídající střednímu průřezu, tedy i tloušťce třísky

$$h_s = \frac{h_{max}}{2} \text{ a počtu zubů v záběru } z_{\check{r}}$$

Potom tedy **střední hodnota řezné síly:** $F_{z,s} = h_s \cdot a_e \cdot p = \frac{h_{max}}{2} \cdot a_e \cdot p$ [N],

celková řezná síla: $F_z = F_{z,s} \cdot z_{\check{r}} = \frac{h_{max}}{2} \cdot a_e \cdot p \cdot z_{\check{r}}$ [N],

užitečný výkon: $P_{u\check{z}} = \frac{F_z \cdot v}{1000}$ [kW]; $v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60\,000}$ [m . s⁻¹]

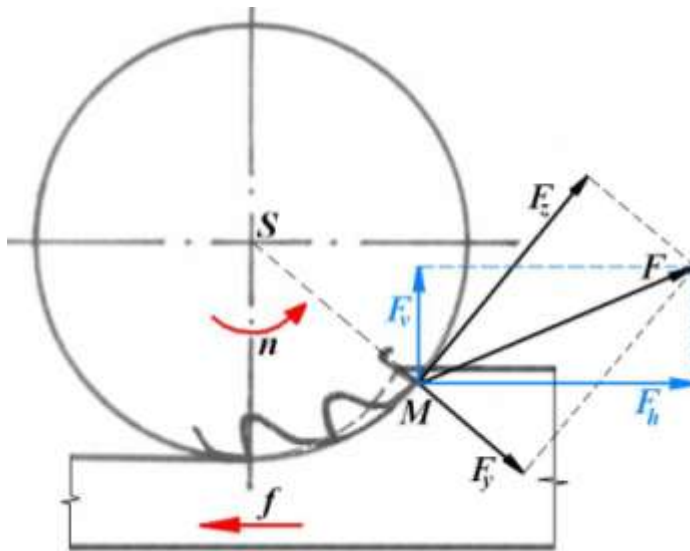
- D průměr frézy [mm]
- n nástroje [ot. min⁻¹]
- v řezná rychlost
- $z_{\check{r}}$ počet zubů v záběru

$$z_{\check{r}} = \frac{\varphi_{max}}{\varphi_z}; \quad \varphi_z = \frac{360^\circ}{z} \quad \varphi_z \dots \text{úhel mezi dvěma zuby}$$

příkon elektromotoru:
$$P_e = \frac{P_{uz}}{\eta} \quad [kW]; \quad \eta \dots \text{účinnost } (\eta = 0,7)$$

Podle vzájemného pohybu frézy a obrobku rozlišujeme dva základní způsoby frézování válcovými frézami:

a) Nesousledné frézování



F ... výsledná řezná síla
 F_y ... radiální složka řezné síly
 F_z ... tangenciální složka řezné síly
 F_h ... horizontální složka řezné síly
 F_v ... vertikální složka řezné síly

n ... otáčky nástroje
 f ... posuv stolu s obrobkem

Obr. 290 Rozklad řezné síly při nesousledném frézování

Jak vyplývá z výše uvedeného obrázku při tomto způsobu frézování se *nástroj otáčí proti posuvu obrobku*. (Odtud *nesousledné*, v některé literatuře také označované jako *nesouhlasné* frézování). Tloušťka třísky h se postupně zvětšuje od nuly do maximální hodnoty h_{max} a tím se také samozřejmě stejným způsobem zvětšuje i průřez třísky. Záběr je tedy plynulý, což je jistá výhoda.

Nevýhodou tohoto způsobu jsou velké nároky na způsob upnutí obrobku, neboť vertikální složka F_v výsledné řezné síly F nadzvedává obrobek. Další nevýhodou je také větší drsnost povrchu obrobené plochy než u frézování sousledného.

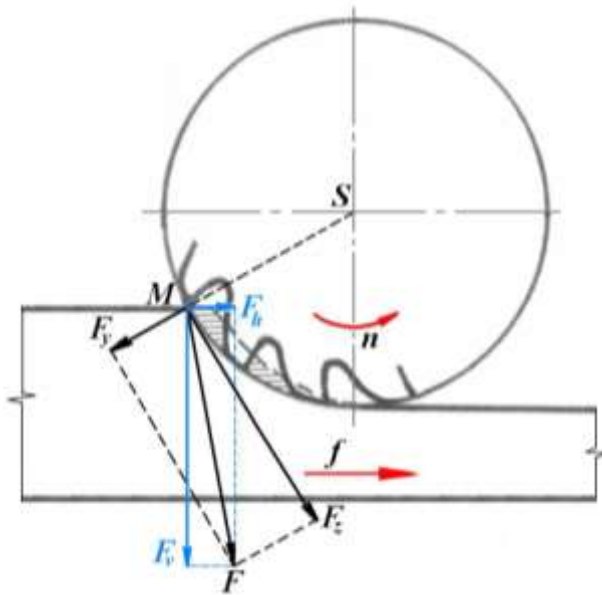
b) Sousledné frézování

V tomto případě se *fréza otáčí ve směru posuvu stolu s obrobkem*. Tloušťka i průřez třísky se postupně zmenšují z maximálních hodnot až na nulu – viz obr. 291.

Způsobuje to sice rázy, což je jistá nevýhoda, která se však dá eliminovat použitím frézy se šikmými zuby nebo se zuby ve šroubovici.

Velkou výhodou tohoto způsobu jsou příznivější podmínky pro upínání obrobku, neboť vertikální složka řezné síly přitlačuje obrobek ke stolu, což umožňuje v případě tuhého stroje možnost velkého záběru – větší hloubku řezu a tím i vyšší produktivitu obrábění díky velkému hospodárnému úběru materiálu. Výhodou je také menší drsnost povrchu obrobené plochy v porovnání s předcházejícím případem.

1.1.3 Frézování čelními frézami

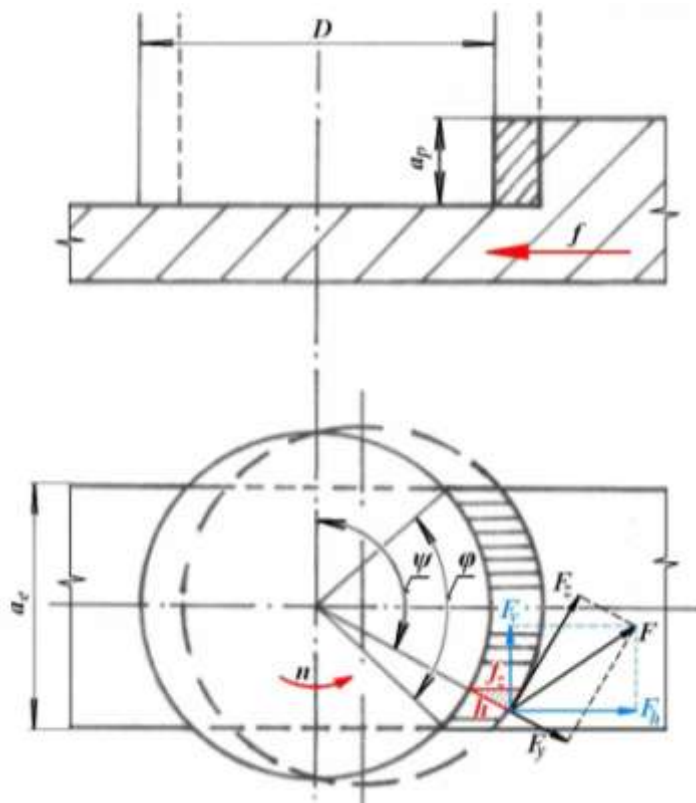


Obr. 291 Rozklad řezné síly při sousledném frézování



Obr. 292 Frézovací hlava hrubovací

Při tomto způsobu obrábění je osa rotujícího nástroje kolmá k obrobené ploše. Dráha břitu frézy je rovněž cykloida, ale odebíraná tříska se tvarem liší od třísky odebírané válcovou frézou – viz obr. 293. Tohoto způsobu se používá hlavně při výkonném obrábění velkých rovinných ploch frézovacími hlavami, nejčastěji s břitovými destičkami ze slinutého karbidu – viz obr. 292.



Obr. 293 Tvar třísky při frézování čelní frézou symetricky vzhledem k obrobku

1.1.4 Frézky

jsou obráběcí stroje, na kterých se opracovávají rovinné i tvarové plochy v dnešní době vysoce produktivním způsobem díky použití výkonných nástrojů se slinutými karbidy a keramickými řeznými destičkami.

Podle polohy vřetena rozdělujeme frézovací stroje na dvě základní skupiny:

1. **vodorovné** – označení FH (frézka horizontální)
2. **svislé** – označení FV (frézka vertikální)

Podle účelu a konstrukce se frézky dělí na:

- a) **konzolové** – vodorovné nebo svislé (vřeteník lze natáčet o $0 \pm 45^\circ$)
 - univerzální – podélný pracovní stůl je natáčivý až do 45° , což umožňuje frézování šneků a šroubových drážek
- b) **stolové** - svislé a vodorovné. Používají se pro frézování větších součástí.
- c) **rovinné** - jsou určeny pro obrábění největších obrobků. Stavějí se pro šířky pracovního stolu od 800 mm. Stůl má pouze podélný posuv, vřeteník má příčný a svislý posuv.
- d) **portálové** - mají dva stojany, příčník a čtyři vřeteníky, které se dají i natáčet, což umožňuje obrábění vodorovných, svislých a šikmých ploch na těžkých obrobcích. Díky velké tuhosti konstrukce se zpravidla pracuje frézovacími hlavami, čímž se dosahuje velkých úběrů materiálu.
- e) **speciální** - kopírovací (mechanické, elektrokontaktní, hydraulické a elektroinduktivní) pro frézování tvarových ploch.
 - číslicově řízené s revolverovou hlavou buď jako souřadnicové NC v režimu pravoúhlém nebo souvislém, nebo nejmodernější s řízením CNC s mikroprocesory.
 - obráběcí centra – k obrábění rozměrných skříňových a plochých součástí s automatickým upínáním a polohováním obrobku s možností provádět v CNC řízeném pracovním cyklu také automatickou výměnu nástrojů ze zásobníku (15 až 30 nástrojů, velkokapacitní 60 i více nástrojů).

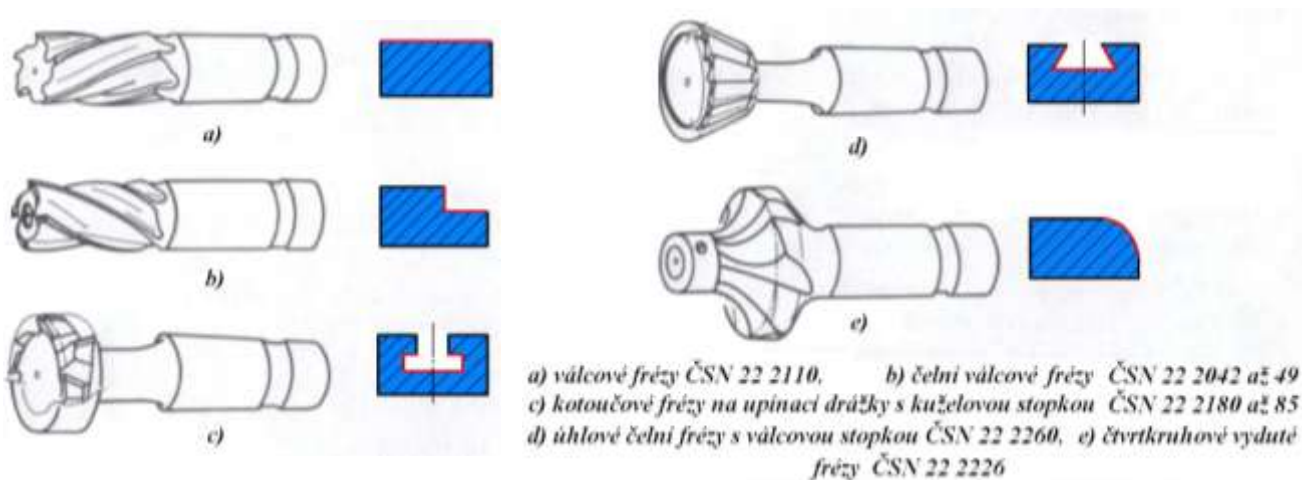


Obr. 294 CNC frézka

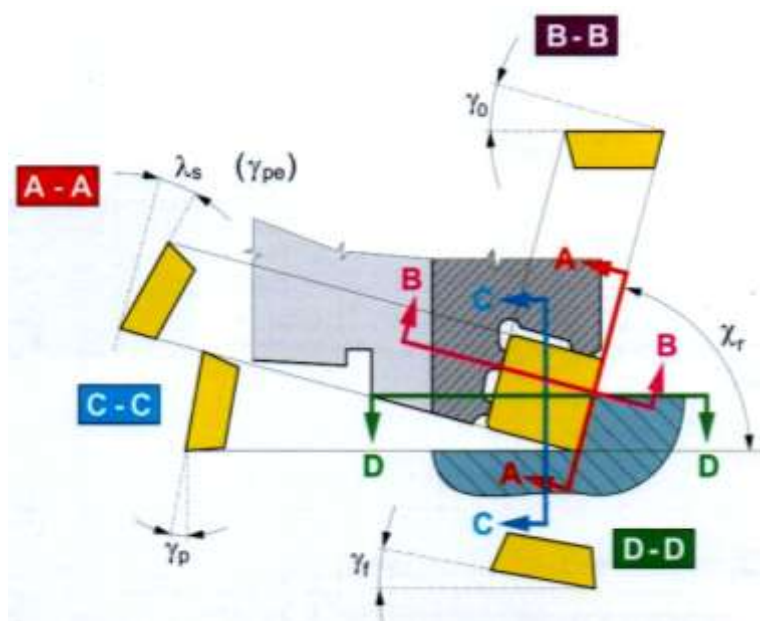
1.1.5 Nástroje pro frézování

většinou rozdělujeme podle těchto pěti hledisek:

- podle ploch na nichž leží ostří:** válcové, čelní, čelní válcové, kotoučové, úhlové, tvarové
- podle průběhu ostří:** s ostřím přímým, rovnoběžným s osou otáčení, s ostřím šikmým mimoběžným s osou rotace, s ostřím šroubovitým – ve šroubovici a se střídavým šroubovitým ostřím
- podle způsobu upínání:** se stopkou válcovou nebo kuželovou a frézy nástrčné s válcovou dírou
- podle směru otáčení:** pravořezné – otáčejí se ve směru hodinových ručiček při pohledu od vřeteníku a levořezné
- podle konstrukce:** celistvé z jednoho kusu z rychlořezné oceli nebo monolitické ze SK svařované – řezná část je z rychlořezné oceli a je přivařena k upínací části složené – mají zuby mechanicky upnuté zejména tvořené VBD ze SK.



Obr. 295 Základní tvary fréz z rychlořezné oceli se stopkou



Obr. 296 Geometrie frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami

Dnes se používají hlavně **nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami se slinutých karbidů**. Geometrie takové frézy je na obr. 296, ze kterého jsou zřejmé:

1. **Konstrukční nástrojové úhly**, které slouží k základní orientaci polohy lůžka, do kterého je upnuta VBD a má význam hlavně pro konstrukci tělesa frézy. Jsou dva:
 - **axiální úhel čela γ_p** – nástrojový zadní úhel čela
 - **radiální úhel čela γ_f** – nástrojový boční úhel čela.
2. **Pracovní – funkční úhly** – ovlivňují výrazně funkci nástroje – velikost řezné síly, specifické zatížení břitu a tím opotřebení a trvanlivost břitu, na odvádění třísky z místa řezu. Jsou to tyto tři úhly:
 - **Ortogonální úhel čela γ_o** – čím je větší, tím menší jsou řezné síly a také potřebný výkon elektromotoru. Naopak jeho zmenšením rostou řezné síly a také teplota v místě řezu.
 - **Úhel nastavení χ_r** – čím je menší, tím je také menší tloušťka třísky h a tedy při dané axiální hloubce řezu a_p je větší šířka třísky, čímž se snižuje specifické zatížení břitu a také jeho opotřebení a naopak se zvětšuje jeho trvanlivost.
 - **Úhel sklonu ostří λ_s** – ovlivňuje spolu s výše uvedenými úhly polohu prvního dotyku břitu s obrobkem. Hlavně při obrábění přerušovaným řezem ovlivňuje odolnost břitu vůči křehkému porušení. Také ovlivňuje směr odchodu třísky z místa řezu.



Obr. 297 Frézovací nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami firmy Pramet Tools, s.r.o.

V katalogu firmy Pramet Tools, s.r.o. je uveden kompletní výrobní sortiment fréz s vyměnitelnými břitovými destičkami včetně jejich systému značení:

- **rovinné frézy** – frézy do rohu, čelní frézy (s pozitivní, velmi pozitivní, negativní geometrií, hrubovací, pro těžké hrubování);
- **stopkové frézy** – frézy do rohu, závrtné frézy, stopkové frézy pro sražení;
- **válcové frézy** - hrubovací válcové frézy s břity ve šroubovici –dělené a nedělené, pájené;
- **kotoučové frézy** – k řezání a drážkování, kotoučové frézy oboustranné a jednostranné;
- **kopírovací frézy** – nástrčné, stopkové kopírovací, šroubovací, vyměnitelné hlavičky pro modulární systém, modulární frézy, kulové frézy, stopkové frézy do rohu, zapichovací frézy,

Katalog obsahuje také **upínací prvky** a **vyměnitelné břitové destičky** včetně systému jejich značení. Je zde také **technická část** s obdobnou skladbou jako u soustružení včetně podrobné **metodiky návrhu nástroje pro frézování a návrhu startovních řezných podmínek**. Postup práce s katalogem byl naznačen u soustružení jako základní metody obrábění. Pro frézování již z důvodu rozsahu učebního textu nebudeme tuto problematiku dále rozebírat.

1.1.5.1 Nástroje pro frézování na CNC strojích

Na tyto frézy jsou kladeny zvláštní požadavky, kterým musí vyhovovat. Patří mezi ně tyto požadavky:

- přesně definovaná poloha břitu nástroje
- možnost opakovatelného nastavení přesné polohy a rozměru nástroje
- vyloučení havárie nástroje při otupení nebo zničení ostří
- způsobilost nástroje pro automatickou manipulaci a výměnu
- nástroje se seřizují vždy mimo stroj, zpravidla v přípravcích, aby se neomezoval pracovní chod drahého stroje
- současná CNC technika a vývoj nástrojových materiálů umožňují realizaci tzv. vysokorychlostního obrábění, které předpokládá použití nástrojů malých průměrů z vysoce kvalitních nástrojových materiálů, převážně povlakovaných, pracujících při otáčkách až do 100 tisíc otáček za minutu s malými hloubkami řezu, avšak s relativně velkými posuvy. I při hrubování tvarových ploch dochází tak ke vzniku velmi malých stupínků, které se snadno odstraní obráběním na čisto, což činí tento způsob obrábění vysoce produktivním. Nástroje mají kvůli vysokým otáčkám vesměs turbínový pohon a musí být chlazeny velkým proudem chladicího média. Tento způsob obrábění umožní opracování i tvarově velmi složitých dílů jako jsou například formy na lisování plastických hmot apod. Nástroje – viz následující obrázek 298.



Obr. 298 Nástroje pro vysokorychlostní obrábění

1.1.6 Řezné podmínky pro frézování

Efektivní frézovací proces probíhá jen za správně předem stanovených řezných podmínek. Jde o správné stanovení tzv. **finální startovní řezné rychlosti** v_c s ohledem na zařazení obráběného materiálu do jedné ze skupin (P, M, K, ...), na polotovar – jeho povrch (např. okujený apod.), na druh nástroje - nástrojový materiál – zejména jeho trvanlivost, na charakter frézování – lehké, střední, těžké, což současně ovlivní volbu dalších parametrů frézování. Podobně jako u soustružení, bude finální startovní řezná rychlost dána součinem startovní řezné rychlosti v_{30} a korekčních součinitelů dle tabulek v katalogu:

$$v_c = v_{30} \cdot k_{vx} \cdot k_{vT} \cdot k_{vHB} \cdot (k_{vM}) ; \quad v_{30} \dots \text{startovní řezná rychlost podle obráběného materiálu,}$$

charakteru frézování;

$k_{vx} \dots$ korekč. souč. zohledňující povrch polotovaru;
 $k_{vT} \dots$ korekč. souč. zohledňující trvanlivost nástroje;
 $k_{vHB} \dots$ korekč. souč. zohledňující tvrdost polotovaru;
 $k_{vM} \dots$ korekč. souč. zohledňující materiál (druh litiny,...).

Druhým důležitým parametrem frézování je **hloubka řezu** a_p , která je u výkonového (těžkého) hrubování omezena tuhostí soustavy stroj – nástroj – obrobek. Obvykle bývá 3 až 10 [mm]. U vysokorychlostního obrábění platí kritéria poněkud odlišná a jsou naznačena v předcházející kapitole.

Posledním parametrem je **posuv** f_z . Ten nejvýrazněji ovlivňuje hlavně drsnost povrchu. Proto u hrubování volíme posuv na horní hranici možností, naopak u frézování na čisto, kdy hloubka řezu bývá do 1 [mm] při vysoké řezné rychlosti volíme posuv co možná nejmenší.

Metodika a směrné hodnoty pro volbu řezných podmínek pro frézování jsou uvedeny jednak v katalogu výrobců řezných nástrojů (např. Pramet Tools, s.r.o.) a také v normativních řezných podmínkách.

1.1.7 Dosahovaná přesnost a drsnost povrchu při frézování

Přesnost a drsnost povrchu je ovlivněna druhem a jakostí frézovacího nástroje (jeho možností z hlediska použití řezných podmínek), tuhostí a přesností stroje, způsobem frézování a použitou řeznou kapalinou pro chlazení nástroje. Na drsnost povrchu má také vliv přesnost seřízení nástroje – hlavně u frézovacích hlav, kde se může projevit negativně vliv házení břitů. Dále ji ovlivňuje řezná rychlost, stupeň otupění frézy, velikost posuvu na zub s_z a v neposlední řadě je ovlivněna také geometrií nástroje.

Při frézování podle charakteru práce můžeme dosáhnout parametrů uvedených v následujících tabulkách:

Tab. 27 Dosahovaná přesnost a drsnost povrchu při frézování válcovými frézami

Způsob práce	Přesnost IT	Drsnost povrchu Ra [μm]
Hrubování do délky $l = 300 \text{ mm}$	10 až 12	6,3 až 25
Hrubování do délky $l = 1200 \text{ mm}$	11 až 13	6,3 až 25
Na čisto do délky $l = 300 \text{ mm}$	9 až 11	1,6 až 6,3
Na čisto do délky $l = 1200 \text{ mm}$	9 až 12	1,6 až 6,3

Tab. 28 Dosahovaná přesnost a drsnost povrchu při frézování frézovacími hlavami

Způsob práce	Přesnost IT	Drsnost povrchu Ra [μm]
<i>Hrubování do délky l = 300 mm</i>	10 až 13	6,3 až 25
<i>Hrubování do délky l = 1200 mm</i>	11 až 13	6,3 až 25
<i>Na čisto do délky l = 300 mm</i>	6 až 10	1,6 až 3,2
<i>Na čisto do délky l = 1200 mm</i>	8 až 11	1,6 až 3,2
<i>Jemné frézování</i>	7 až 8	0,8 až 1,6

1.1.8 Produktivita při frézování a strojní časy

- a) Při **hrubování** je měřítkem produktivity **objem třísek** odebraných za časovou jednotku, tzv. **hospodárný úběr**.

$$Q_h = \frac{f_m \cdot a_p \cdot a_e}{1000} \quad [\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$$

n_{opt} ... optimální otáčky [ot.min⁻¹]

$$Q_h = \frac{n_{opt} \cdot f_z \cdot z \cdot a_p \cdot a_e}{1000} \quad [\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$$

f_z ... posuv na zub [mm . z⁻¹]

a_e ... radiální hl. řezu, resp. šířka obrobku [mm]

a_p ... axiální hloubka řezu [mm]

z ... počet zubů frézy [1]

- b) Při **práci na čisto** je mírou produktivity frézování **velikost obrobené plochy** v požadované kvalitě.

- c) Při výpočtu **strojních časů** t_s (dle normativů označovaných t_{A12}) **známe**, nebo **volíme** podle tabulek **řeznou rychlost** v_c [m.min⁻¹], **axiální hloubku řezu** a_p [mm] a **průměr frézy** D [mm]. **Počítáme hlavně skutečnou délku relativního pohybu nástroje vůči obrobku**, kterou značíme L [mm].

Pro stanovení **strojního času při frézování** platí:

$$t_s = \frac{L \cdot i}{f_{ot} \cdot n} = \frac{L \cdot i}{f_m} \quad [\text{min}]$$

f_{ot} ... posuv na otáčku [mm.ot⁻¹];

f_m ... posuv za minutu [mm.min⁻¹]

n ... otáčky nástroje [ot.min⁻¹] – vypočteme je ze vzorce pro řeznou rychlost:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \Rightarrow n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D}$$

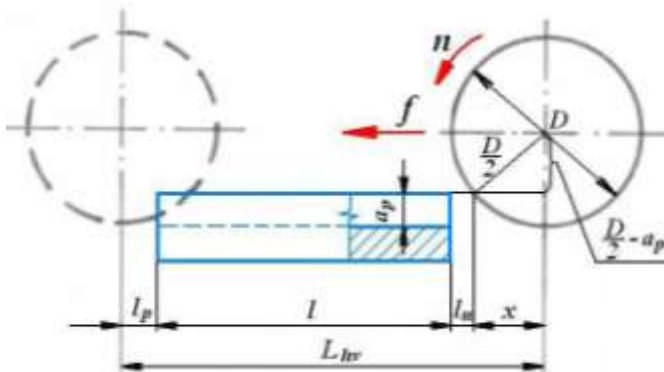
v_c řezná rychlost [m.min⁻¹]

D průměr frézy [mm]

i počet třísek [1] – limitován při hrubování tuhostí soustavy S – N – O

L skutečná délka dráhy relativního pohybu nástroje vůči obrobku [mm] – závisí na způsobu frézování a na druhu frézy. Mohou nastat následující tři případy:

1. Celková dráha válčové frézy při hrubování:



$$L_{hv} = x + l_n + l + l_p$$

$$x = \sqrt{\left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - a_p\right)^2\right]} =$$

$$\sqrt{\left[\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D^2}{4} - D \cdot a_p + a_p^2\right)\right]} =$$

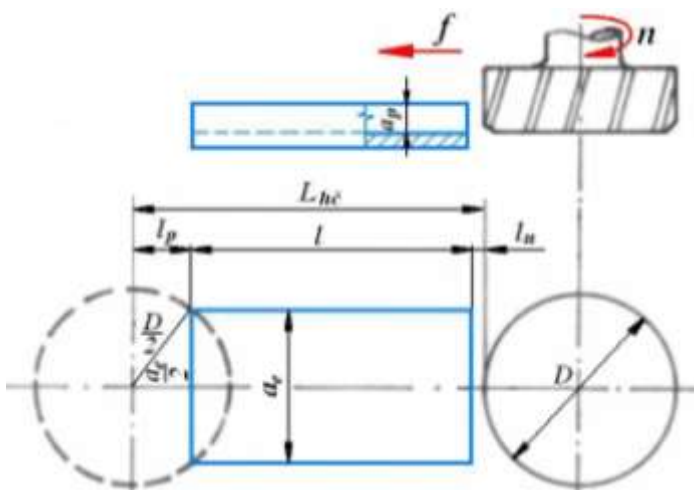
$$= \sqrt{D \cdot a_p - a_p^2} \Rightarrow x = \sqrt{a_p \cdot (D - a_p)}$$

Délka náběhu a přeběhu bývá:

$$l_n = 3 \text{ [mm]}, \quad l_p = 5 \text{ až } 15 \text{ [mm]}$$

Obr. 299 Dráha nástroje při hrubování válčovou frézou

2. Celková dráha čelní frézy při hrubování:



$$L_{hc} = \frac{D}{2} + l_n + l + l_p$$

Délku přeběhu musíme vypočítat:

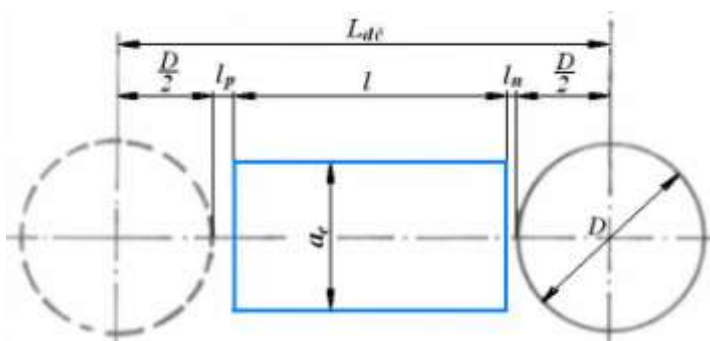
$$l_p = \sqrt{\left[\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{a_e}{2}\right)^2\right]} = \sqrt{\left(\frac{D^2}{4} - \frac{a_e^2}{4}\right)} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{4} \cdot (D^2 - a_e^2)} \Rightarrow l_p = \frac{1}{2} \sqrt{D^2 - a_e^2}$$

Délku náběhu volíme opět $l_n = 3 \text{ až } 5 \text{ [mm]}$

Obr. 300 Dráha nástroje při hrubování čelní frézou, resp. frézovací hlavou

3. Celková dráha čelní frézy při dokončování (práci na čisto):



$$L_{dc} = D + l_n + l + l_p$$

$$l_n = l_p = 3 \text{ až } 5 \text{ [mm]}$$

Průměr frézy (frézovací hlavy) volíme tak, aby byla splněna podmínka:

$$a_{e,max} = 0,8 \cdot D$$

Obr. 301 Dráha nástroje při dokončování čelní frézou, resp. frézovací hlavou