



FAKULTA ústav
STROJNÍHO strojírenské
INŽENÝRSTVÍ technologie

DTB

Technologie obrábění

Cvičení č. 5

Silová a energetická náročnost při obrábění Návod do cvičení

- 1 .0 Příklad 1 – Zadání – Řezná síla při soustružení
- 2 .0 Příklad 2 – Zadání – Řezná síla při vrtání
- 3 .0 Příklad 3 – Zadání – Řezná síla při protahování
- 4 .0 Příklad 4 – Zadání – Řezná síla při broušení
- 5 .0 Příklad 5 – Zadání – Strojní čas při frézování
- 6 .0 Použité rovnice a výpočetní vztahy

Stud. skupina:	Datum:	Autor(ka):
Učebna	B1/409b	
Dílna	NE	

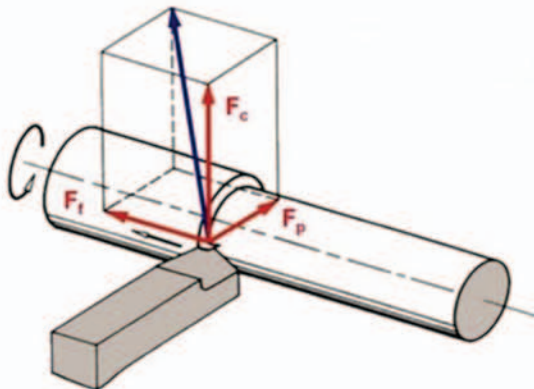
1.0 Příklad 1 – Zadání – Řezná síla při soustružení

Vypočtete celkovou řeznou sílu F , řezný výkon P_c a výkon potřebný pro posuv P_f pro podélné soustružení válcové plochy. Jsou definovány následující řezné podmínky:

- šířka záběru ostří $a_p = 0,5$ mm
- posuv $f = 0,2$ mm
- otáčky $n = 2000$ min⁻¹
- průměr obrobku $D = 24$ mm

Pro výpočet využijte empirické konstanty:

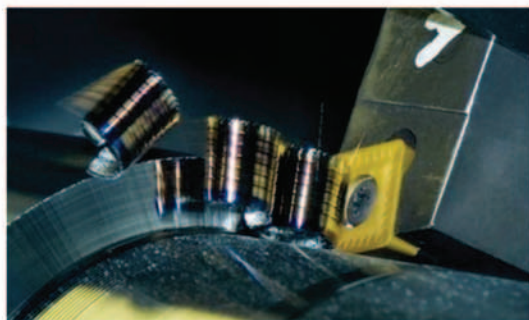
- materiálové konstanty: $C_{Fc} = 1710$ $C_{Fp} = 910$ $C_{Ff} = 550$
- exponenty vlivu na a_p : $x_{Fc} = 1$ $x_{Fp} = 0,9$ $x_{Ff} = 1,1$
- exponenty vlivu na f : $y_{Fc} = 0,78$ $y_{Fp} = 0,75$ $y_{Ff} = 0,55$



Obr. 1.1 Složky sil při soustružení.



Obr. 1.2 Soustružení.



Obr. 1.3 Tvorba třísky při soustružení.

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \text{ [N]}$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \text{ [N]}$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \text{ [N]}$$

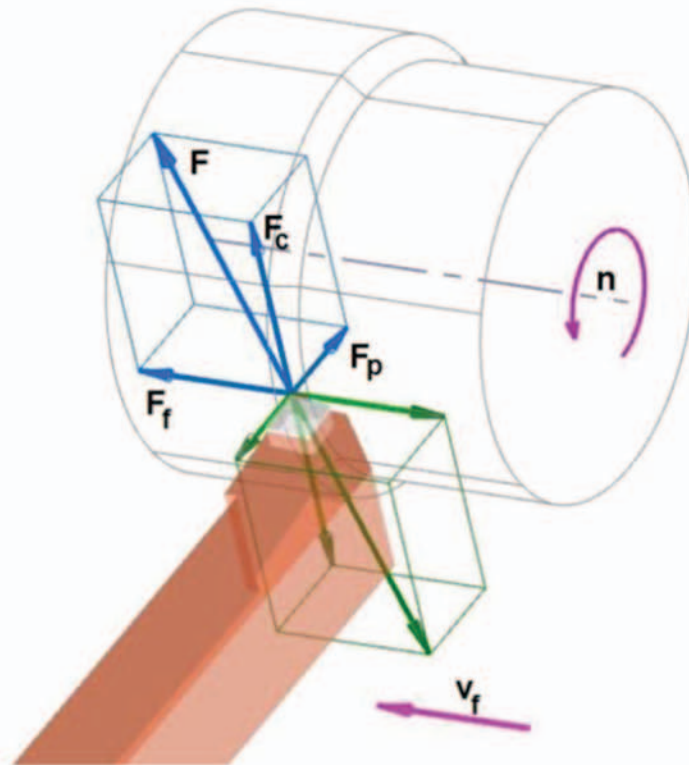
$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} \text{ [N]}$$

1.1 Příklad 1 – Vypracování

1.1.1 Příklad 1 – Teorie

Při obrábění působí nástroj na obrobek silou a v rámci Třetího Newtonova zákona akce a reakce působí stejně velkou silou opačného směru i obrobek na nástroj.

- řezné síly – působí nástroj na obrobek (na obr. 1.4 modře)
- řezné odpory – působí obrobek na nástroj (na obr. 1.4 zeleně)



Obr. 1.4 Silové zatížení při soustružení.

Celková zatěžující síla F působí v obecném směru a rozkládá se na tři složky:

- řezná síla F_c
- posuvová síla F_f
- pasivní síla F_p

Řezná síla se dá vyjádřit dvěma způsoby:

1. Empirickými vztahy (zavedl Ing. Frederick Winslow Taylor, 1856-1915)

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \text{ [N]}$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \text{ [N]}$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \text{ [N]}$$

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

Kde figurují následující empirické parametry:

- C_{Fc} , C_{Fp} , C_{Ff} jsou materiálové konstanty
- x_{Fc} , x_{Fp} , x_{Ff} jsou exponenty, které určují vliv a_p na velikost jednotlivých složek sil
- y_{Fc} , y_{Fp} , y_{Ff} jsou exponenty, které určují vliv f na velikost jednotlivých složek sil

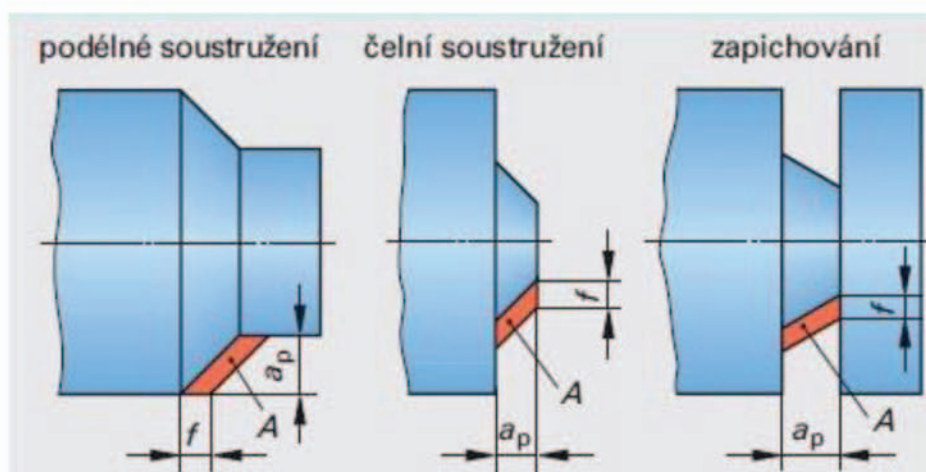
2. Pomocí měrné řezné síly (novodobý přístup k výpočtu, k_c je v katalogu nástrojů)

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

Příčemž měrná řezná síla k_c je řezná síla vztažena na jednotku plochy řezu. Prakticky je to konstanta, která záleží na fyzikálních vlastnostech obrobku (především tvrdost a pevnost), ale i na geometrii nástroje a řezném prostředí. Velikost k_c určuje napětí nutné k porušení soudržnosti materiálu při řezu.

Průřez třísky lze určit na základě řezných podmínek:

$$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot f \text{ [mm}^2\text{]}$$



Obr. 1.5 Průřez třísky A_D při soustružení.

Výpočet rychlostí:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

$$v_f = n \cdot f \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]} \Rightarrow \text{[m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

Výpočet výkonů:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3} \text{ [kW]}$$

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{60 \cdot 10^3} \text{ [kW]}$$

1.1.2 Příklad 1 – Úvaha

Výpočet má daný postup.

Poznámka: Hodnoty konstant a exponentů platí pro posuv na otáčku $f = 0,06 - 0,25$ mm, úhel nastavení nástroje $\kappa_r = 45^\circ$ a poměr $h_D/b_D = 1/10$ až $1/20$.

1.1.3 Příklad 1 – Řešení příkladu (analytické řešení)

1. Výpočet složek celkové řezné síly

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} = \quad \text{N}$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} = \quad \text{N}$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} = \quad \text{N}$$

2. Celková řezná síla

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} = \quad \text{N}$$

3. Řezná rychlost

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \quad \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$$

4. Posuvová rychlost

$$v_f = n \cdot f = \quad \text{mm} \cdot \text{min}^{-1} = \quad \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$$

5. Řezný výkon

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3} = \quad \text{kW}$$

6. Výkon potřebný pro posuv

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{60 \cdot 10^3} = \quad \text{kW}$$

1.1.4 Příklad 1 – Závěr

Řezný výkon je výrazně vyšší než výkon potřebný pro posuv. To může být důležité mimo jiné z pohledu na použitý stroj, tj. dimenzování jeho pohonu a uložení pro hlavní vřeteno versus pro pohon posuvu.

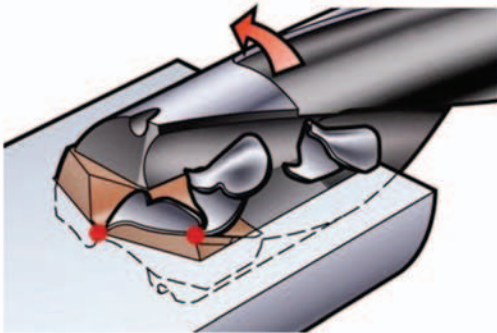
2.0 Příklad 2 – Zadání – Řezná síla při vrtání

Vypočítejte řeznou sílu F_c , posuvovou sílu F_f , krouticí moment M_k a výkon na vřetenu vrtačky P_c . Jsou definovány následující řezné podmínky:

- posuv $f = 0,24$ mm (je vztažen na 1 otáčku vícebřitého nástroje, ovšem v katalogu je pouze f_z , tj. posuv na zub)
- otáčky $n = 450 \text{ min}^{-1}$
- průměr vrtáku $D = 10$ mm

Pro výpočet využijte empirické konstanty:

- materiálové konstanty: $C_{Fc} = 1360$ $C_{Ff} = 847$
- exponent vlivu na a_p : $x_{Fc} = 0,91$ $x_{Ff} = 0,97$
- exponent vlivu na f : $y_{Fc} = 0,82$ $y_{Ff} = 0,70$



Obr. 2.1 Vrtání (vrták je vícebřítý nástroj, zpravidla dvoubřítý).

$$F_c = c_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} [\text{N}]$$

$$F_f = c_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} [\text{N}]$$

2.1 Příklad 2 – Vypracování

2.1.1 Příklad 2 – Doplněk k zadání

Další zadání, pro případné zájemce:

Zadání	D	f	n	F_c	F_f	M_K	P_c
1	10	0,24	450				
2	12	0,22	420				
3	14	0,20	400				
4	16	0,18	350				
5	18	0,16	300				
6	20	0,14	300				
7	10	0,22	300				
8	12	0,20	400				
9	14	0,18	400				
10	16	0,16	350				
11	18	0,14	350				
12	20	0,12	350				
13	10	0,20	420				
14	12	0,18	420				
15	14	0,16	420				
16	16	0,14	400				
17	18	0,12	350				
18	20	0,10	320				
19	10	0,24	300				
20	12	0,22	400				

2.1.2 Příklad 2 – Teorie

Síly při vrtání

Využívají se empirické vztahy:

řezná síla (celková, tj. na 2 břity)

$$F_c = c_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} [\text{N}]$$

posuvová síla (celková, tj. na 2 břity)

$$F_f = c_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} [\text{N}]$$

Řezná rychlost

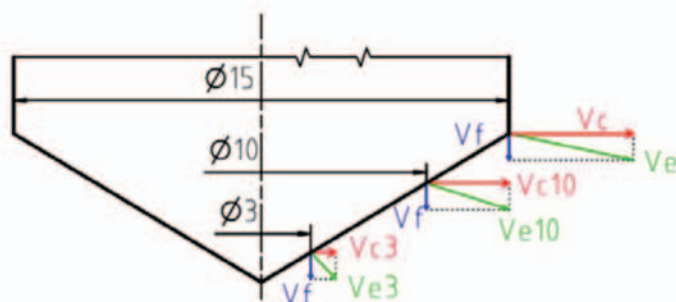
Vztah pro výpočet řezné rychlosti je univerzální (jde o rotační pohyb):

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$$

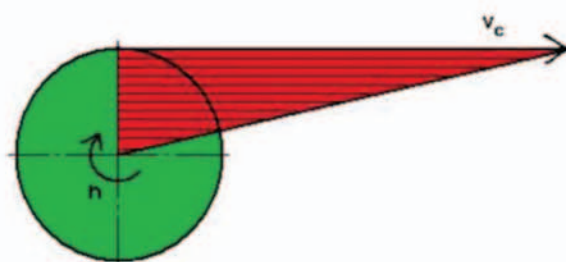
Poznámka:

Při dosazení průměru vrtáku za D vyjde řezná rychlost pro obvod vrtáku. Podél břitu vrtáku směrem k ose rotace však řezná rychlost postupně klesá, v ose vrtáku je nulová. Proto je např. pro výpočet výkonu důležitá střední řezná rychlost (pro poloviční průměr vrtáku).

$$v_{c1/2} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{2 \cdot 1000} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$$



Obr. 2.2 Řezná rychlost pro různé průměry vrtáku.



Obr. 2.3 Řezná rychlost v závislosti na průměru vrtáku.

Výkon řezné síly

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_{c1/2}}{60 \cdot 10^3} [\text{kW}]$$

Krouticí moment

Pro výpočet krouticího momentu se pak počítá s celkovou řeznou silou na 2 břity, důležité je její působíště vycházející z působíště „střední síly“, tj. momentové rameno $D/4$.

$$M_k = F_c \cdot \frac{D}{4} = c_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \cdot \frac{D}{4} [\text{N} \cdot \text{mm}]$$

2.1.3 Příklad 2 – Řešení příkladu

1. Celková hodnota řezné síly

$$F_c = c_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} = \quad \text{N}$$

2. Celková hodnota posuvové síly

$$F_f = c_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} = \quad \text{N}$$

3. Výkon na vřetenu stroje

$$v_{c1/2} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{2 \cdot 1000} = \quad \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_{c1/2}}{60 \cdot 10^3} = \quad \text{kW}$$

4. Celková hodnota krouticího momentu

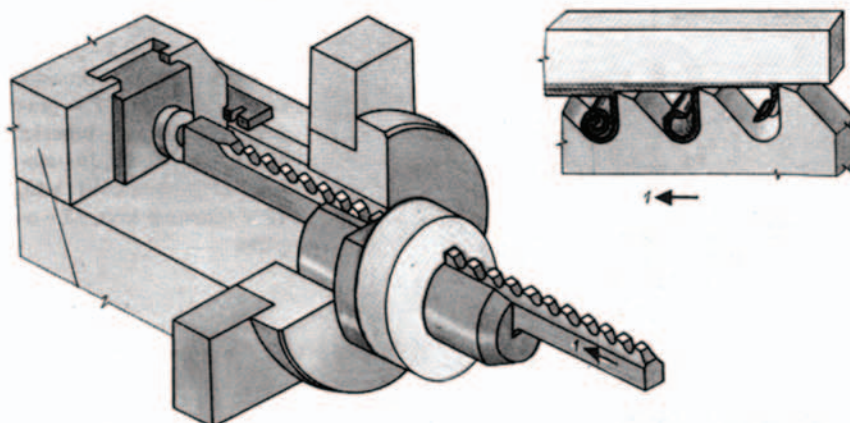
$$M_k = F_c \cdot \frac{D}{4} = \quad \text{N} \cdot \text{mm} = \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

2.1.4 Příklad 2 – Závěr

Byla určena řezná síla, posuvová síla, výkon na vřetenu a krouticí moment. Vypočtené hodnoty odpovídají vstupním údajům.

3.0 Příklad 3 – Zadání – Řezná síla při protahování

Vypočítejte řeznou sílu F_c při protahování drážky. Obrábí se drážka pro těsné pero v náboji ozubeného kola, které je z legované oceli (obr. 3.3).



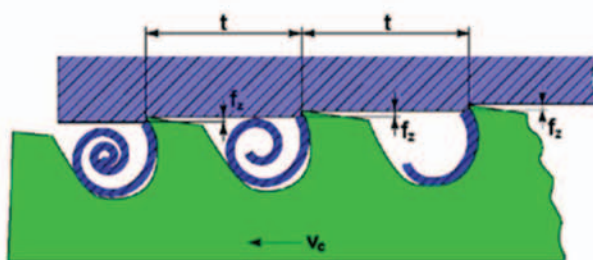
Obr. 3.1 Schéma protahování drážky.

Jsou definovány následující řezné podmínky:

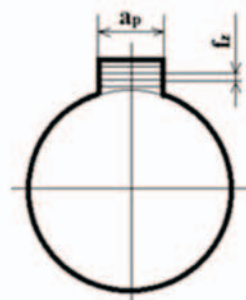
- šířka záběru $a_p = 8 \text{ mm}$ (odpovídá šířce drážky)
- posuv na zub $f_z = 0,04 \text{ mm}$ (odpovídá úběru na zub)
- protahovaná délka $L = 26 \text{ mm}$
- rozteč zubů $t_d = 7,81 \text{ mm}$

Řezné podmínky doplňují empirické parametry:

- materiálové konstanty: $C_{Fc} = 2840 [-]$
- exponent vlivu na a_p : $x_{Fc} = 1 [-]$
- exponent vlivu na f : $y_{Fc} = 0,85 [-]$
- součinitel bezpečnosti: $K_{Fc} = 1 [-]$



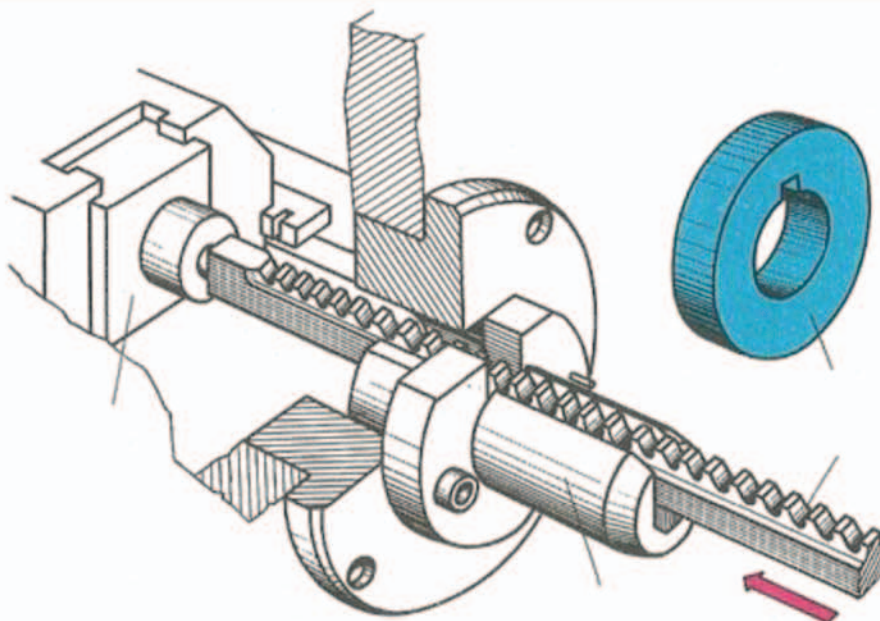
Obr. 3.2 Posuv na zub a rozteč zubů.



Obr. 3.3 Orientace drážky v náboji (šířka záběru a_p a rozteč zubů).

3.1 Příklad 3 – Vypracování

3.1.1 Příklad 3 – Teorie

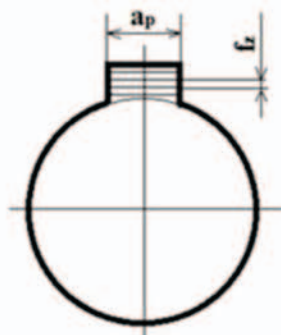


Obr. 3.4 Schéma protahování.

Řezná síla F_c pro protahování drážky se počítá dle empirického vztahu:

$$F_c = C_{FC} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \cdot z \cdot K_{Fc} \text{ [N]}$$

Důležité je správné dosazení řezných podmínek – v tomto případě odpovídá a_p šířce drážky a f_z odpovídá úběru na zub (obr. 3.5).



Obr. 3.5 Řezné podmínky při protahování.

Výpočet počtu zubů v záběru:

$$z = (L/t_d) + 1 \text{ [-]}$$

Součinitel bezpečnosti se počítá na základě třech dílčích hodnot:

$$K_{Fc} = K_\gamma \cdot K_\alpha \cdot K_{ah} \text{ [-]}$$

V tomto příkladu je hodnota K_{Fc} definována v zadání, v případě nutnosti ji lze stanovit z doporučených dílčích hodnot:

součinitel úhlu čela K_γ

- $K_\gamma = 1$ (pro $\gamma_o = 10^\circ - 12^\circ$)
- $K_\gamma = 1,13$ (pro $\gamma_o = 6^\circ - 8^\circ$)
- $K_\gamma = 1,35$ (pro $\gamma_o = 0^\circ - 2^\circ$)

součinitel úhlu hřbetu K_α

- $K_\alpha = 1$ (pro $\alpha_o = 2^\circ - 3^\circ$)
- $K_\alpha = 1,20$ (pro $\alpha_o \leq 1^\circ$, při obrábění oceli)
- $K_\alpha = 1,12$ (pro $\alpha_o \leq 1^\circ$, při obrábění litiny)

Součinitel opotřebení nástroje K_{ah}

- $K_{ah} = 1$ (pro nový nástroj)
- $K_{ah} = 1,15$ (pro otupený nástroj)

3.1.2 Příklad 3 – Řešení příkladu

Počet zubů v záběru:

$$z = (L/t_d) + 1$$

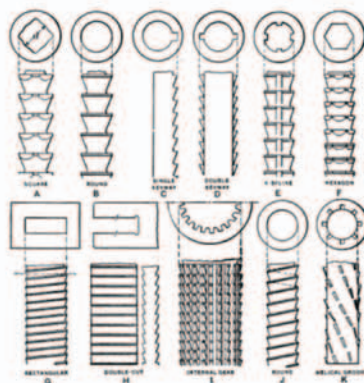
$$z = (26/7,81) + 1 = 4,329 \Rightarrow 4 \text{ zuby v záběru}$$

Řezná síla:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \cdot Z \cdot K_{Fc} \text{ [N]}$$

3.1.3 Příklad 3 – Závěr

Vzhledem k jednoduchosti výpočtu lze závěr doplnit o výklad/přehled výrobků, které lze protahováním vyrábět (obr. 3.6).



Obr. 3.6 Přehled tvarových děr, které lze vyrábět protahováním.

4.0 Příklad 4 – Zadání – Řezná síla při broušení

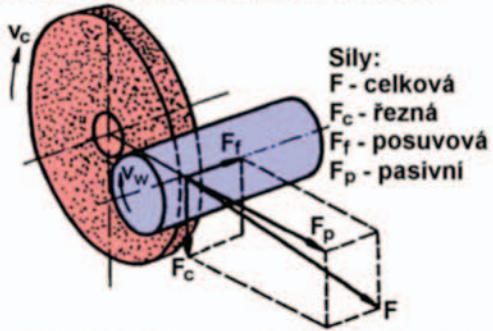
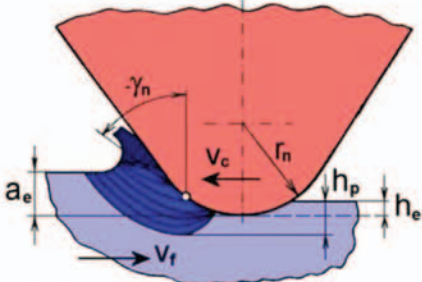
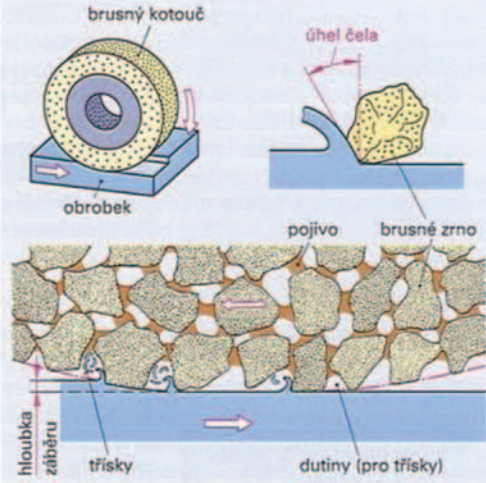
Vypočítejte řeznou sílu F_c , potřebný příkon P_c a měrnou řeznou sílu k_c při vnějším podélném broušení do kulata mezi hroty.

Jsou definovány následující řezné podmínky:

- obvodová rychlost brousícího kotouče $v_c = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- obvodová rychlost obrobku $v_w = 20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (tj. pro obrobek z oceli)
- pracovní (radiální) záběr $a_e = 0,03 \text{ mm}$
- šířka brousícího kotouče $b_s = 28 \text{ mm}$
- axiální posuv $f_a = 0,6 \cdot b_s [\text{mm}]$
- průměr brousícího kotouče $d_s = 350 \text{ mm}$ (dle pracovního prostoru stroje)
- průměr obrobku $d_w = 32 \text{ mm}$
- účinnost brousícího procesu $\mu = 0,65 [-]$

A následující empirické parametry:

$$C_{Fc} = 22 [-], x_{Fc} = 0,7[-], y_{Fc} = 0,7[-], z_{Fc} = 0,5[-]$$

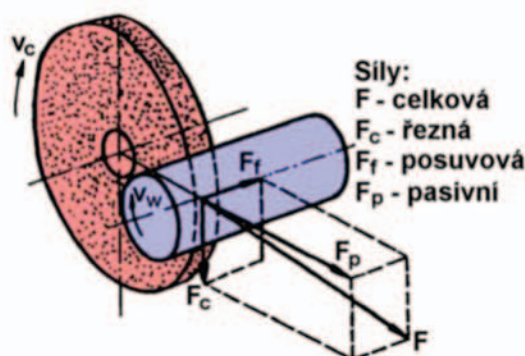
Obvodové axiální broušení do kulata  Sily: F - celková F_c - řezná F_f - posuvová F_p - pasivní Obr. 4.1 Síly při podélném broušení.	 γ_n - normální úhel čela r_n - poloměr zaoblení ostří h_p - vrstva ovlivněná plastickou deformací h_e - vrstva ovlivněná pružnou deformací Obr. 4.2 Řezné podmínky při broušení.
 Obr. 4.3 Brousící kotouč – nástroj s nedefinovanou geometrií.	$F_c = c_{Fc} \cdot V_W^{x_{Fc}} \cdot f_a^{y_{Fc}} \cdot a_e^{z_{Fc}} [\text{N}]$

4.1 Příklad 4 – Vypracování

4.1.1 Příklad 4 – Teorie

Podobně jako u soustružení je i u broušení (v tomto případě obvodové axiální broušení do kulata) celková řezná síla F složená ze tří složek:

- F_c – hlavní síla ležící ve směru řezné rychlosti
- F_p – pasivní síla kolmá k broušené ploše
- F_f – posuvová síla, působící ve směru podélného posuvu (kolmo na rovinu otáčení kotouče)



Obr. 4.4 Síly při obvodovém axiálním broušení do kulata.

Co je ale typické, je odlišný poměr sil oproti soustružení: $F_p > F_c > F_f$.

Orientačně lze F_c určit z empirického vztahu:

$$F_c = 25 \cdot v_w^{0,6} \cdot f_a^{0,6} \cdot a_e^{0,5} \text{ [N]}$$

Nicméně v tomto případě bude využit jiný přístup. Pro broušení, stejně jako ve všech jiných případech, platí vztah pro měrnou řeznou sílu:

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

Průřez třísky A_D je:

$$A_D = \frac{V}{L} \text{ [mm}^2\text{]}$$

Kde: $V \text{ [mm}^2 \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$ je objem pomyslného tělesa v podobě kváдру („rozvinutí“ všech třísek vznikajících za jednotku času), rozměry stran kváдру jsou a_e , f_a , L .

V realitě toto není pevné těleso, v brousicím procesu se plynule rozpadá na drobné třísky a případné další vznikající produkty (nečistoty z okolí apod.).

$$V = \pi \cdot d_w \cdot n_w \cdot a_e \cdot f_a \text{ [mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

Délka tohoto imaginárního tělesa se pak spočítá:

$$L = 1000 \cdot (60 \cdot v_c \pm v_w) \text{ [mm]}$$

V případě že $v_c \gg v_w$, potom:

$$L = 1000 \cdot (60 \cdot v_c) [\text{mm}]$$

Při dosazení do vztahu pro A_D :

$$A_D = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w \cdot a_e \cdot f_a}{1000 \cdot 60 \cdot v_c} = \frac{v_w \cdot a_e \cdot f_a}{60 \cdot v_c} [\text{mm}^2]$$

A vzhledem k tomu, že obvodová rychlost obrobku se spočítá:

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$$

Tak lze vztah zjednodušit na:

$$A_D = \frac{v_w \cdot a_e \cdot f_a}{60 \cdot v_c} [\text{mm}^2]$$

4.1.2 Příklad 4 – Řešení

1. Axiální posuv

$$f_a = 0,6 \cdot b_s$$

2. Řezná síla

$$F_c = c_{Fc} \cdot v_w^{x_{Fc}} \cdot f_a^{y_{Fc}} \cdot a_e^{z_{Fc}} [\text{N}]$$

3. Příkon pro brousicí vřeteník (pohánění brousicí kotouč)

$$P_{cs} = \frac{F_c \cdot V_c}{1000 \cdot \eta} \quad \text{kW}$$

4. Příkon pro hlavní vřeteník (pohánění obrobek)

$$P_{cw} = \frac{F_c \cdot v_w}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta} \quad \text{kW}$$

5. Průřez třísky

$$A_D = \frac{v_w \cdot a_e \cdot f_a}{60 \cdot v_c} \quad \text{mm}^2$$

6. Měrná řezná síla

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad \text{MPa}$$

4.1.3 Příklad 4 – Závěr

Vzhledem k výraznému hodnotovému rozdílu mezi složkami příkonu ($P_{cs} \gg P_{cw}$), je celkový příkon při broušení aproximován jako $P_c = P_{cs}$. Následně byly určeny řezná síla F_c a s měrná řezná síla k_c .

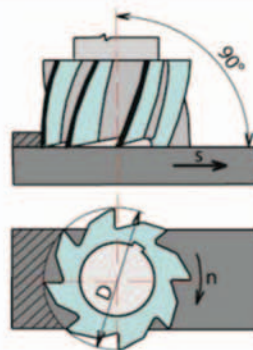
5.0 Příklad 5 – Zadání – Strojní čas při frézování

Porovnejte, jak se liší strojní čas hrubování a dokončování při symetrickém čelním frézování (obr. 5.3 a obr. 5.4). Řezné podmínky pro dokončování i hrubování jsou shodné.

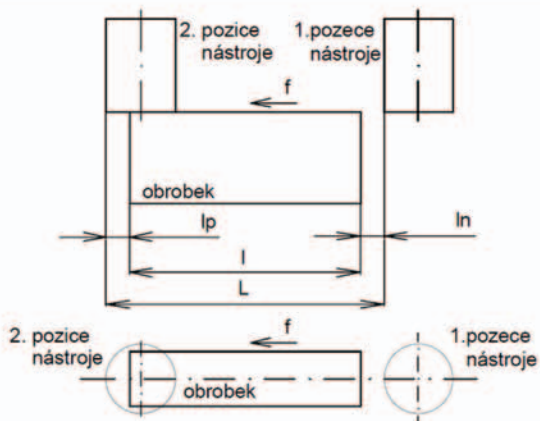
- počet průjezdů $i = 1$
- otáčky nástroje $n = 200 \text{ min}^{-1}$
- délka frézované plochy $l = 100 \text{ mm}$
- šířka frézované plochy $B = 50 \text{ mm}$
- průměr nástroje $D = 100 \text{ mm}$
- posuv na 1 otáčku nástroje $f = 0,6 \text{ mm}$
- délka náběhu a přeběhu $l_n = l_p = 3 \text{ mm}$



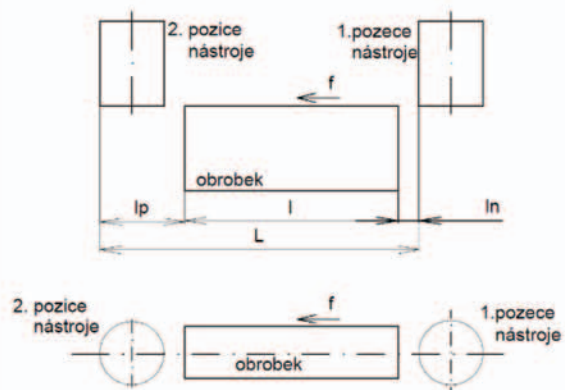
Obr. 5.1 Čelní frézování.



Obr. 5.2 Schéma čelního frézování při $\kappa_r = 90^\circ$.



Obr. 5.3 Trajektorie nástroje při hrubování.



Obr. 5.4 Trajektorie nástroje při dokončování.

5.1 Příklad 5 – Vypracování

5.1.1 Příklad 5 – Teorie

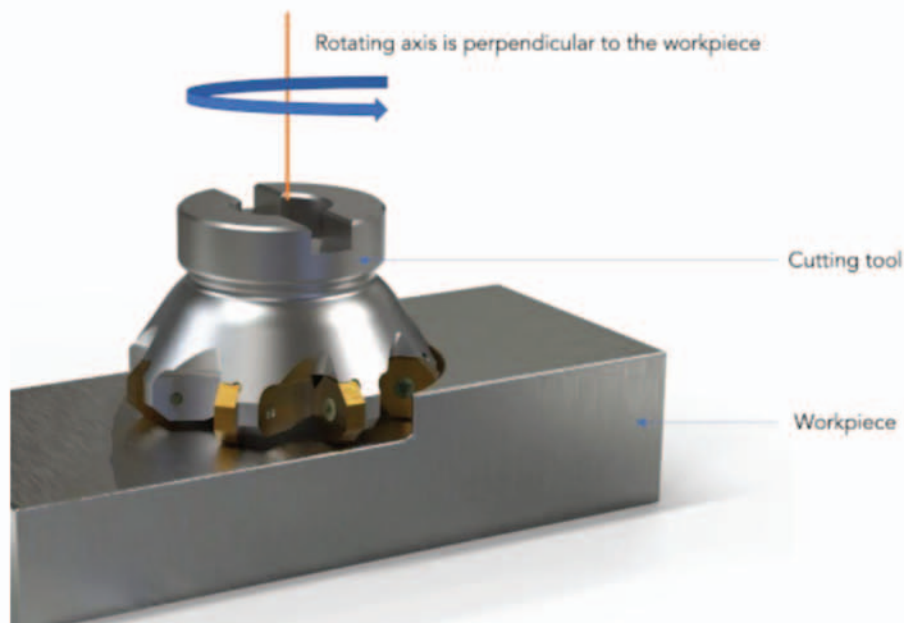
Obecná rovnice pro strojní čas

$$t_{AS} = \frac{L \cdot i}{v_f} = \frac{(l_n + l + l_p) \cdot i}{n \cdot f} [\text{min}]$$

5.1.2 Příklad 5 – Úvaha

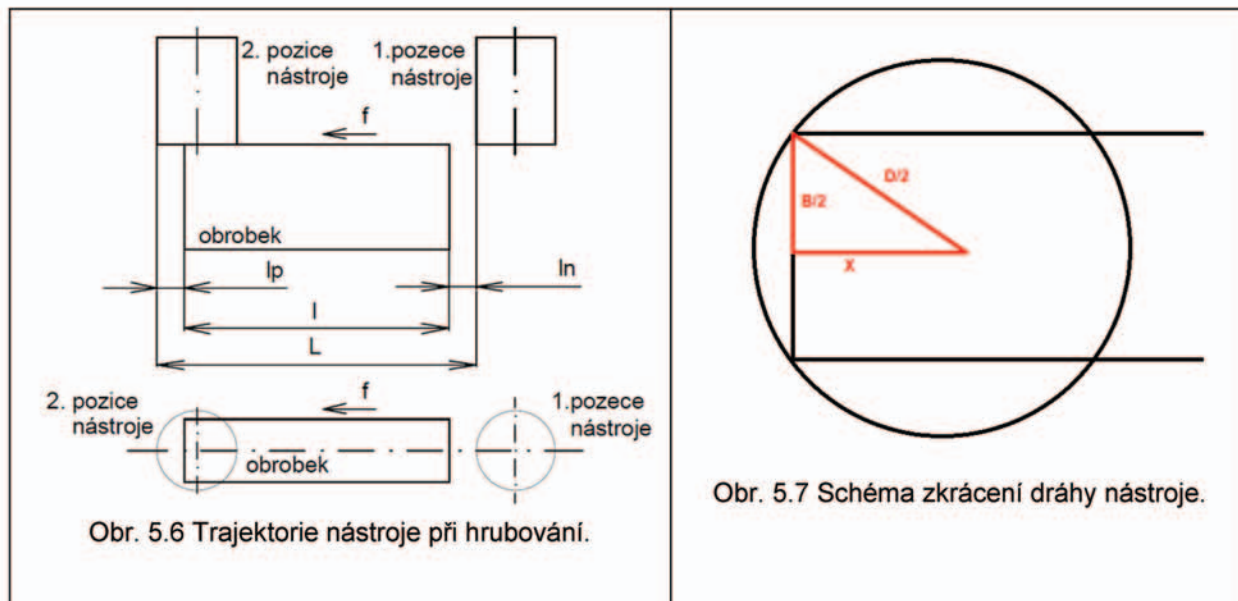
Při hrubování a dokončování jsou shodné řezné podmínky. Základní myšlenkou příkladu je uvědomit si, že hlavní jediný rozdíl mezi kinematikou při hrubování a dokončování je ten, že při hrubování nemusí nástroj vyjet celým svým průměrem mimo obrobek. Naproti tomu při dokončování musí, aby bylo zajištěno konstantní Ra po celé obrobené ploše.

Důsledkem toho bude při hrubování kratší obráběcí dráha, tím pádem i kratší strojní čas.



Obr. 5.5 Čelní frézování.

5.1.3 Příklad 5 – Řešení příkladu – Hrubování



Výpočet zkrácení dráhy (parametr x určuje, o kolik se zkrátí obráběcí dráha oproti plnému přejezdu):

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

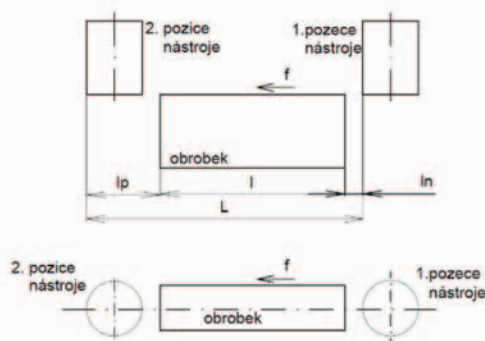
Celková dráha nástroje

$$L = l_n + \frac{D}{2} + (l - x) + l_p \text{ [mm]}$$

Strojní čas (přidán index A):

$$t_{ASA} = \frac{L \cdot i}{v_f} = \frac{L \cdot i}{n \cdot f}$$

5.1.4 Příklad 5 – Řešení příkladu – Dokončování



Obr. 5.8 Trajektorie nástroje při dokončování.

Celková dráha nástroje

$$L = l_n + \frac{D}{2} + l + \frac{D}{2} + l_p \text{ [mm]}$$

Strojní čas, včetně l_{pc} (přidán index B):

$$t_{ASB} = \frac{L \cdot i}{v_f} = \frac{L \cdot i}{n \cdot f}$$

5.1.5 Příklad 5 – Závěr

Z výsledků je patrné, že při dokončování bude strojní čas delší z důvodu delší obráběné délky.

Časový rozdíl lze vyjádřit buď jako časový údaj

$$\Delta t_{AS} = t_{ASB} - t_{ASA}$$

Nebo poměrově

$$U = 1 - \frac{t_{ASA}}{t_{ASB}}$$

Následující doplněk k závěru se týká především reálné výroby:

Doporučení k seřízení technologie v reálné situaci:

V sériové výrobě není vhodné, aby se nástroj pohyboval v ose obráběné plochy (periodicky se střídá sousledný a nesousledný způsob frézování, tím je soustava S-U-O-N náchylná k rozkmitání od pravidelně se měnící řezné síly).

Jak toto snížit či částečně odstranit (možnosti **a)** a **b)**):

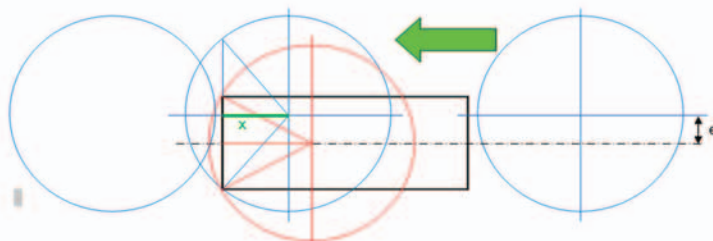
a) Doporučuje se excentrické umístění nástroje vůči obrobku (kóta „e“), tím jeden ze způsobů frézování převažuje nad druhým (cca 1 : 5), soustava je víceméně jednostranně zatížená, pravidelné kolísání řezné síly je minimální, obrábění probíhá klidněji.

Velikost excentricity „e“ je odvozena z rozměrové situace, v katalogu nástrojů je doporučena vhodná velikost (mm nebo % ØD).

Při dokončování je tím pozitivní vliv na veličinu Ra a délka dráhy L se v podstatě neovlivní.

Při hrubování vznikne mírné prodloužení dráhy L vůči původní symetrické osové situaci vlivem nutného delšího pojezdu po obrobku, kdy:

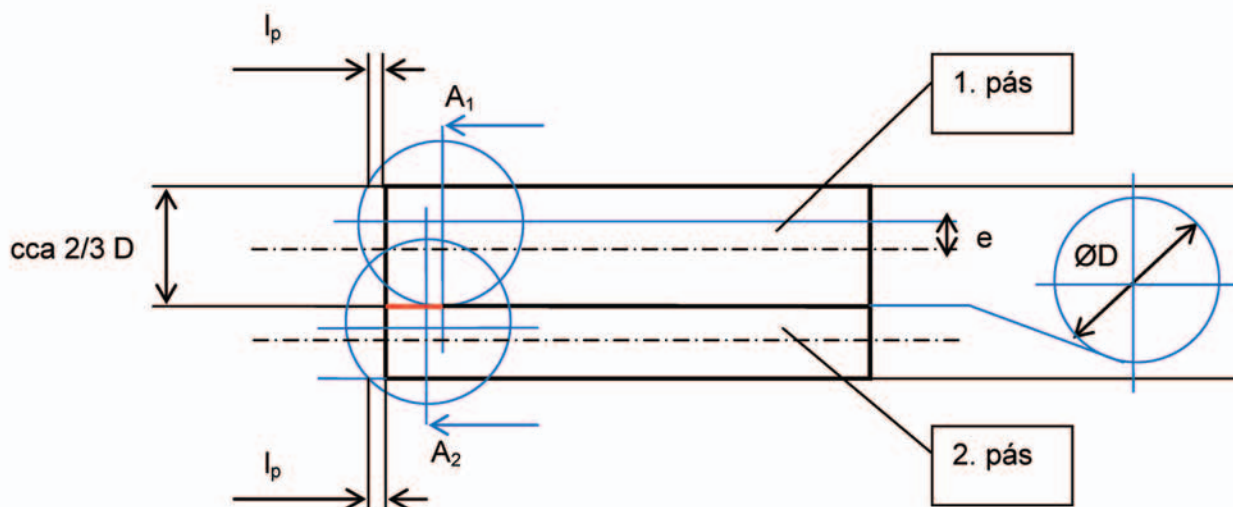
$$x = (... - ((B/2)+e)^2)^{0.5} \text{ je menší (obr. 5.9).}$$



Obr. 5.9 Grafické znázornění situace.

Poznámka:

Pokud nástroj ØD je menší než šířka obráběné plochy B , nevychází jen 1 průjezd nástroje přes plochu, přejíždí se vícekrát (typicky 2 až 3x podle konkrétní velikosti ØD) v pásch vedle sebe (obr. 5.10). Překrytí nástroje přes část obráběné plochy má být cca 2/3 jeho ØD, konkrétní hodnotu výrobci nástrojů doporučují v katalogu. Excentricita „e“ se nastavuje od osy projížděného pásu.



Obr. 5.10 Situace pro malý nástroj.

Při hrubování nemusí nástroj dojíždět svojí osou až na konec obráběné plochy (včetně přeběhu l_p), stačí jen do polohy A_1 (obr. 5.10, ušetří se část dráhy, výpočet obdobně jako na obr. 5.9), protože zbylý neobrobený oblouček se obrobí při následujícím průjezdu pásu v důsledku překrytí nástroje a dojetí do polohy A_2 , přičemž nastavení excentricity „e“ nemusí vyjít stejné jako u projíždění 1. pásu.

Při dokončování není zmiňované zkracování dráhy nástroje, nástroj musí vyjet vždy mimo obrobenou plochu (obr. 5.8).

b) Použít nástroj (frézu) s nepravidelnou úhlovou roztečí zubů. Pak může být excentricita „e“ nepatrná nebo žádná. Proces ale nemusí fungovat na 100 %.

6.0 Použité rovnice a výpočetní vztahy

Měrná řezná síla:

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

Síly při soustružení:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \text{ [N]}$$

$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \text{ [N]}$$

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \text{ [N]}$$

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

Výkony při soustružení:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3} \text{ [kW]}$$

$$P_f = \frac{F_f \cdot v_f}{60 \cdot 10^3} \text{ [kW]}$$

Síly při vrtání:

$$F_c = c_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \text{ [N]}$$

$$F_f = c_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \text{ [N]}$$

Výkon při vrtání:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_{c1/2}}{60 \cdot 10^3} \text{ [kW]}$$

Síla při protahování:

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f_z^{y_{Fc}} \cdot Z \cdot K_{Fc} \text{ [N]}$$

Síla při broušení:

$$F_c = c_{Fc} \cdot v_w^{x_{Fc}} \cdot f_a^{y_{Fc}} \cdot a_e^{z_{Fc}} \text{ [N]}$$