

DTB

Technologie obrábění

Cvičení č. 5

Silová a energetická náročnost při obrábění

Zadání elaborátu

- 1 .0 Úvod do tématu
- 2 .0 Příklad 1 – Řezná síla při soustružení
- 3 .0 Příklad 2 – Řezná síla při vrtání
- 4 .0 Příklad 3 – Řezná síla při protahování
- 5 .0 Příklad 4 – Řezná síla při broušení
- 6 .0 Příklad 5 – Strojní čas při frézování
- 7 .0 Použité rovnice a výpočetní vztahy a symboly

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

1.0 Úvod do tématu

1.1.1 Jak se využívají fyzikální zákony ve strojírenství

U výpočtů silového působení při obrábění se vychází z fyzikální podstaty, kdy síla je definována měrným tlakem, působícím na plochu. Teoretický vztah zpravidla přechází na upravený empirický tvar, aby byl využitelný s určitou (nutnou) nepřesností v reálných situacích. Reálné prostředí je doprovázeno řadou jevů, které ideální teorie nezahrnuje. Působení těch nežádoucích nebo obtížně zjistitelných nelze zpravidla dokonale vyloučit, většinou se jejich působení jen co nejvíce omezuje.

Po silovém výpočtu následuje stanovení příkonu/výkonu. Takže:

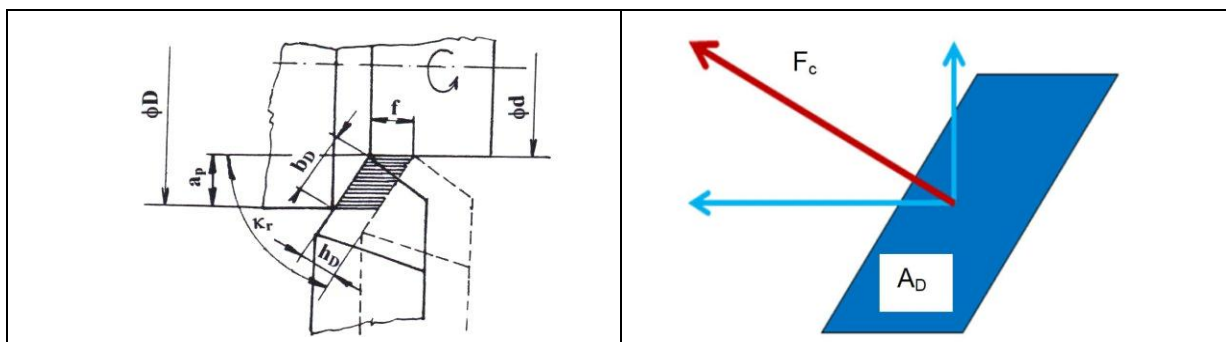
a) síla $F_c = k_c \cdot A_D$ [N] = Newton = $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

b) výkon $P_c = F_c \cdot v_c$ [W] = Watt = $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$

Plocha je v rovnicích dána průřezem třísky A_D , který je určen veličinami a_p (šířka záběru ostří) a f (posuv). Pokud není průřez třísky A_D pravoúhlý, ale kosý, převádí se při výpočtech na pravoúhlý tvar (typicky obdélník) s toutéž velikostí plochy, využívají se matematické a geometrické zákonitosti (obr. 1.1).

Poznámka:

Kosý průřez třísky A_D dává obecný směr řezné síly F_c , což je výhodné pro stroj při těžkém obrábění, řezná síla se rozkládá na menší složky do pravoúhlých os, ve kterých má stroj pohybové mechanismy, tím je zatížen rovnoměrněji a tak se šetří.



Obr. 1.1 Schéma průřezu třísky A_D (kosý průřez versus pravoúhlý průřez) a směr F_c .

1.1.2 Historie výpočtu řezných sil

Používají se 2 principy výpočtů, souvisejí s vývojem technologie obrábění:

- a) rovnice s koeficientem a exponenty (složitější rovnice)
tuto metodu empiricky rozpracoval Ing. Frederick Winslow Taylor (1856 - 1915)

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

- b) jednoduchá rovnice s měrnou řeznou silou k_c (k_c v sobě již zahrnuje vliv exponentů a vlastností materiálu, případně i další jevy dané novodobým výzkumem obrábění)

$$F_c = k_c \cdot a_p \cdot f = k_c \cdot A_D \text{ [N]}$$

Kde: k_c	[N · mm ⁻² = MPa]
a_p	[mm]
f	[mm]

Doplňující legenda:

- nepoužívat pro k_c nesprávný termín „měrný řezný odpor“
- výpočty řezných sil jsou víceméně orientační, přesnost není nijak vysoká, přesto pro běžné strojírenské situace stačí, ale pokud jsou požadavky na přesné stanovení, je nutno přejít na měření, použít vhodnou měřicí aparaturu
- varianta ohledně k_c → katalog Seco Machining Navigator uvádí měrnou řeznou sílu k_{c11} (což je k_c při podmínkách $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 1 \text{ mm}$)
- jednotka SI měrové soustavy pro tlak je $1 \text{ Pa} = \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$, pro strojírenství je to relativně velice malá hodnota, proto se používají násobky, standardně $\text{MPa} = \text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$, ojediněle kPa
- přepočty starších jednotek, které jsou dle SI měrové soustavy zakázány používat (vyskytují se dosud na starých zařízeních):
tlak → $1 \text{ atm} = 1 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2} = 0,1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$
výkon → 1 HP (koňská síla) = 735 (popř. 736) W .

1.1.3 Měření řezných sil

Když je potřeba znát přesné hodnoty, nahrazují se (nepřesné) výpočty měřením. Měřit lze přímo (měří se síla) i nepřímo (měří se jiné veličiny, související se silovým působením → krouticí moment, příkon, napětí, proud, teplota). Používané měřicí aparatury se liší složitostí (konstrukcí) a cenou. V konkrétní situaci je pak nutno posoudit vhodnost jejich nasazení (tj. zakoupení, zapůjčení, pronájem) včetně oprávněnosti k obsluze (školení, kvalifikační kurzy).

Rozdělení měření:

- přímé měření → dynamometr
- nepřímé měření → měřicí aparatura (zpravidla elektronická), využívá 3 druhy čidel:
 - a) drátové tenzometry
Jsou relativně jednoduché. Pro dosažení co nejvyšší přesnosti a eliminaci nežádoucích jevů se zapojuje více čidel současně (zpravidla ve dvou směrech na sebe kolmých).
 - b) kapacitní snímače
 - c) piezoelektrické snímače
Představují moderní elektronické prvky na snímání tlaku s výstupem elektrické veličiny. Vyrábějí se v širokém rozsahu, jak po stránce konstrukční, tak co se týče šířky měřicího intervalu.

Poznámka:

Mimo používání čidel existují i další speciální metody, např. snímání teplotního pole termokamerou nebo pyrometrem.

1.1.4 Měření příkonu/výkonu

Měřit lze přímo. Používá se wattmetr.

Příkon je dodávaný, výkon je odebíraný. Hodnoty se liší účínkem, bývá např. cca $0,7$ [–].

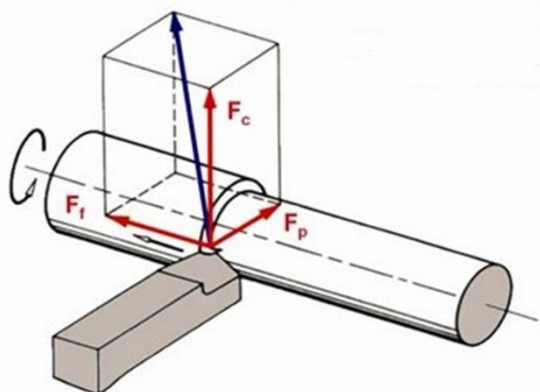
2.0 Příklad 1 – Řezná síla a výkon při soustružení

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 $a_p = 0,5 \text{ mm}$
- posuv $f = 0,2 \text{ mm}$
- otáčky $n = 2000 \text{ min}^{-1}$
- průměr obrobku $D = 24 \text{ mm}$

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. 2.1 Složky sil při soustružení $\rightarrow F_c$ F_p F_f .



Obr. 2.2 Soustružení.



Obr. 2.3 Tvorba třísky při soustružení.

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

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

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

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

3.0 Příklad 2 – Řezná síla při vrtání

Vypočítejte řeznou sílu F_c , posuvovou sílu F_f , krouticí moment M_k a výkon P_c na vřetenu vrtačky. 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
- vrták má 2 břity

Pro výpočet využijte empirické konstanty:

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



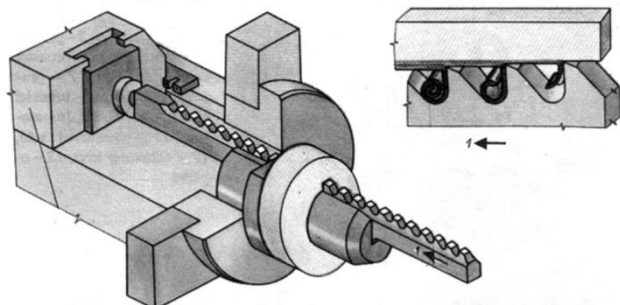
Obr. 3.1 Vrtání. Vrták je vícebřitý nástroj, typicky dvoubřitý. Zpravidla se využívá procesní kapalina.

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

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

4.0 Příklad 3 – 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. 4.2 a obr. 4.4).



Obr. 4.1 Schéma protahování drážky.



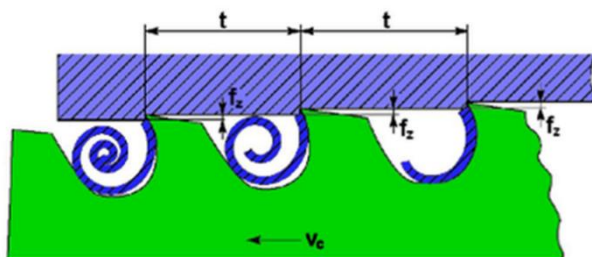
Obr. 4.2 Drážka v náboji ozubeného kola.

Jsou definovány následující řezné podmínky:

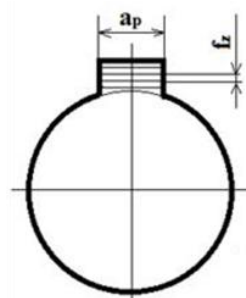
- šířka záběru ostří $a_p = 8$ mm (odpovídá šířce drážky → konstrukční kóta 8P9)
- posuv na zub $f_z = 0,04$ mm (odpovídá úběru na zub, typicky je v setinách mm)
- protahovaná délka $L = 26$ mm
- rozteč zubů $t_d = 7,81$ mm.

Řezné podmínky doplňují empirické parametry:

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



Obr. 4.3 Posuv na zub f_z a rozteč zubů t_d .



Obr. 4.4 Orientace drážky v náboji (šířka záběru ostří a_p a rozteč zubů dávající f_z).

5.0 Příklad 4 – Řezná síla při broušení

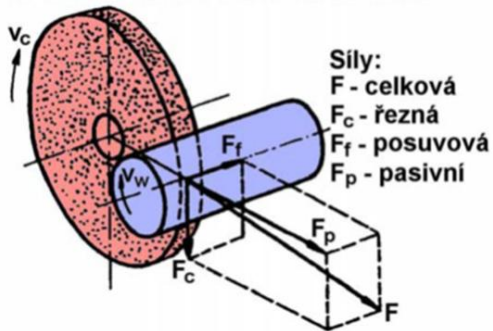
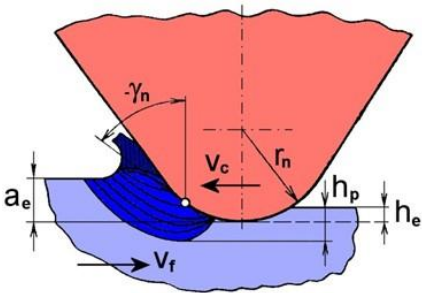
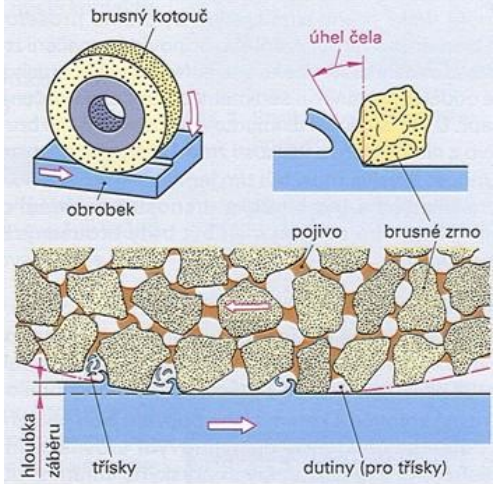
Vypočítejte řeznou sílu F_c , potřebný příkon P_c a měrnou řeznou sílu k_c při vnějším podélném broušení do kulata mezi hroty.

Jsou definovány řezné podmínky:

- obvodová rychlost broušícího 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 broušícího kotouče $b_s = 28 \text{ mm}$
- axiální posuv $f_a = 0,6 \cdot b_s [\text{mm}]$
- průměr broušícího kotouče $d_s = 350 \text{ mm}$ (dle pracovního prostoru stroje)
- průměr obrobku $d_w = 32 \text{ mm}$
- účinnost broušícího procesu $\eta = 0,65 [-]$.

A empirické parametry:

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

Obvodové axiální broušení do kulata  Síly: F - celková F_c - řezná F_f - posuvová F_p - pasivní Obr. 5.1 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. 5.2 Řezné podmínky při broušení.
 Obr. 5.3 Broušící kotouč – nástroj s nedefinovanou geometrií.	$F_c = C_{Fc} \cdot v_w^{x_{Fc}} \cdot f_a^{y_{Fc}} \cdot a_e^{z_{Fc}} [\text{N}]$

6.0 Příklad 5 – Strojní čas při frézování

Porovnejte, jak se liší strojní čas hrubování a dokončování při symetrickém čelním frézování (obr. 6.3 a obr. 6.4). Řezné podmínky pro dokončování i hrubování jsou shodné (neřeší se zde a_p , když $i = 1$):

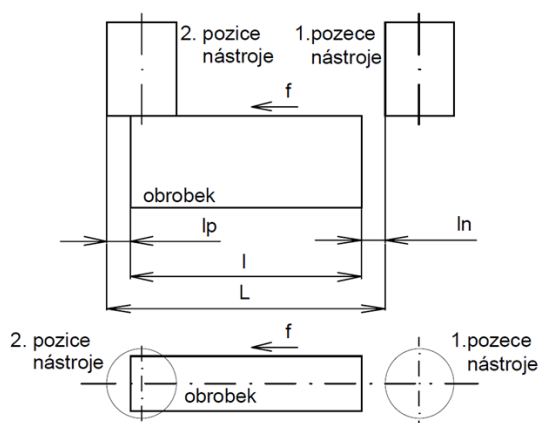
- počet průjezdů $i = 1$
- otáčky nástroje $n = 200 \text{ min}^{-1}$
- délka frézované plochy $l = 100 \text{ mm}$
- šířka frézované plochy $B = 50 \text{ mm}$
- průměr nástroje $D = 100 \text{ mm}$
- posuv na 1 otáčku nástroje $f = 0,6 \text{ mm}$
- délka náběhu a přeběhu $l_n = l_p = 3 \text{ mm}$.



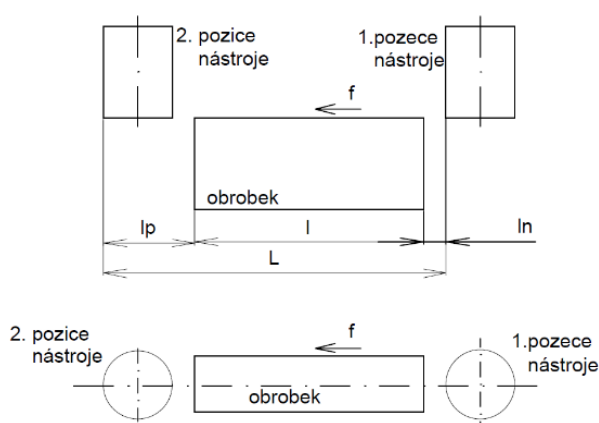
Obr. 6.1 Čelní frézování.



Obr. 6.2 Schéma čelního frézování při $\kappa_r = 90^\circ$.



Obr. 6.3 Trajektorie nástroje při hrubování.



Obr. 6.4 Trajektorie nástroje při dokončování.

7.0 Použité rovnice a výpočetní vztahy a symboly

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 ($v_{c1/2}$ – poloviční hodnota řezné rychlosti):

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

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:

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

symbol	jednotka/rozměr	název/komentář
a_p	mm	šířka záběru ostří
a_e	mm	radiální přísuv při broušení
α_o	°	úhel hřbetu nástroje v ortogonální rovině
A_D	mm ²	průřez třísky
b_s	mm	šířka brousícího kotouče
b_D	mm	šířka třísky
B	mm	šířka obráběné plochy
$C_{Fc} \ C_{Fp} \ C_{Ff}$	-	konstanty, součinitelé
D	mm	průměr nástroje
d_s	mm	průměr brousícího kotouče
d_w	mm	průměr broušeného obrobku
e	mm	excentricita pro polohu nástroje na obráběné ploše
$f \ f_z \ f_a$	mm	posuv, posuv na zub, posuv při broušení
$F \ F_c \ F_p \ F_f$	N	celková síla, řezná síla, pasivní síla, posuvová síla
γ_o	°	úhel čela nástroje v ortogonální rovině
h_D	mm	výška třísky
h_e	mm	vrstva ovlivněná pružnou deformací při broušení
h_p	mm	vrstva ovlivněná plastickou deformací při broušení
i	-	počet třísek, počet průjezdů nástroje
$k_c \ k_{c11}$	MPa = N · mm ²	měrná řezná síla, m. ř. s. pro $a_p = 1$ mm a $f = 1$ mm
$K_{Fc} \ K_\gamma \ K_\alpha \ K_{ah}$	-	konstanty, součinitelé (u protahování)
κ_r	°	úhel nastavení ostří
$l \ L$	mm	obráběná délka (trajektorie nástroje)
l_n	mm	délka náběhu nástroje
l_p	mm	délka přeběhu (výběhu) nástroje
M_k	N · mm (N · m)	kroucí moment
mc	-	konstanta (exponent u k_c při frézování)
n	min ⁻¹	otáčky
n_w	min ⁻¹	otáčky obrobku při broušení
$P_c \ P_f$	kW	příkon/výkon řezný, příkon/výkon posuvový
P_{cs}	kW	příkon pro brousící vřeteník, který pohání nástroj
P_{cw}	kW	příkon pro hlavní vřeteník, který pohání obrobek
r_n	mm	poloměr zaoblení ostří
R_m	MPa = N · mm ²	střední pevnost materiálu
t_{AS}	min	strojní čas
Δt_{AS}	min	rozdíl (odchylka) strojního času
t_d	mm	rozteč zubů u protahovacího nástroje
U	-	poměrové vyjádření veličin
v_c	m · min ⁻¹ (m · s ⁻¹)	řezná rychlost (u broušení → m · s ⁻¹)
v_f	mm · min ⁻¹	posuvová rychlost
v_w	m · min ⁻¹	obvodová rychlost obrobku
V	mm ³	objem
X	mm	zkrácení trajektorie nástroje u frézování
$x_{Fc} \ x_{Fp} \ x_{Ff}$	-	konstanty (exponenty)
$y_{Fc} \ y_{Fp} \ y_{Ff}$	-	konstanty (exponenty)
Z	-	počet zubů (břitů)
z_{Fc}	-	konstanta (exponent)
η	-	účinnost brousícího procesu