Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav dřevařských technologií

Pilové kotouče
konstrukce a parametry obrábění

doc. Ing. Zdeněk Kopecký, CSc.

Obsah přednášky

Úvod

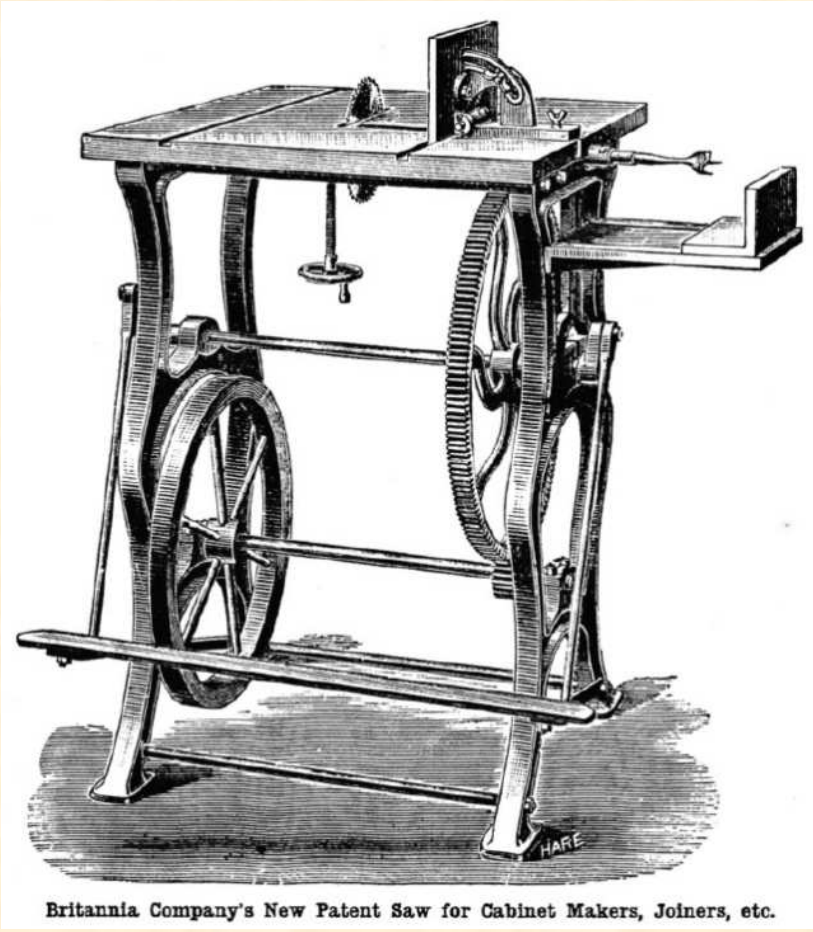
1. **Konstrukce a výroba**
2. **Kinematika obrábění**
3. **Vibrace pilových kotoučů**
4. **Kvalita a přesnost obrábění**

Úvod

- ✓ Řezání pilovými kotouči je ***nečastěji používaná technologie*** k dělení materiálů na bázi dřeva.

- ✓ První kotoučová pila byla vynalezena v Anglii v roce 1870. Kotoučové pily byly umístěny ve vodních nebo větrných mlýnech a pilové kotouče měly menší zuby, protože většinou byly používány pro zkracování řeziva po pořezu na rámových pilách.

Table Saw 1889



Britannia Company's New Patent Saw for Cabinet Makers, Joiners, etc.

Hospodářská víceúčelová pila

HOSPODÁŘSKÁ VÍCEÚČELOVÁ PILA
HVP 60 A - tzv.cirkulárka

Je určena pro potřeby stavebních podniků, skladů palivového dříví, pro běžné použití při zpracování dřeva v domácnostech a na chatách.

Max. průměr kotouče 600 mm
Max. výška řezu na stole 180 mm
Max.průměr řezaného dřeva na kolébce 220 mm
Otáčky vřetene 1700 min^{-1}
Příkon motoru 5,5 kW

http://www.pilanamarket.cz/stroje-elektronaradi/hospodarska-viceucelova-pila-hvp-60a-cirkularka-5-5-kw/

Horizontální kmenová pila

Horizontální dvoukotoučová pila KP58

Podélné řezání kmenů dvojicí horizontálních pilových kotoučů (průměru 450, 500, 550, nebo 700 mm) pro výrobu přesného hraněného řeziva (hranoly, hraněná prkna) z kulatiny do průměru 600 mm.
Nejčastější využití je na výrobu stavebního řeziva.

http://www.strojcad.cz/

Rozmítací pila

http://www.tossvitavy.com/index.php/drevostroje/rozmitaci-pily

Rozmítací kotoučové pily jsou určeny pro podélné řezání dřevěných lišt, hranolků, latí, palubek, atd. Jedná se o stroje kompaktní konstrukce pro středně těžké provozy.

Jednhřídelová pila PWR 421

P = 75 kW

D_k = 250 až 450 mm

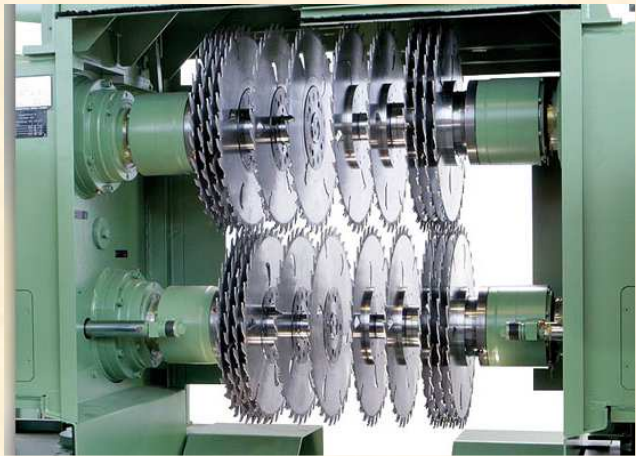
n = 3300 až 5500 min^{-1}

v_f = 4 až 40 $m.min^{-1}$

Výška řezu min/max 12/160 mm

Šířka vkládaného dílu

870 mm



Zkracovací pila

Pila PWK 40 (TOS Svitavy)
Průměr kotouče 400 mm
Max. průřez 120x120 mm
Výkon hlavního elektromotoru 5,5 kW
Minimální krácená délka dílce na narážku 150mm

- Zkracovací kotoučové pily jsou určeny pro sériovou výrobu – zkracování trámů, fošen a prken, uplatní se při výrobě palet, podlážek, oken, hraček apod.
- Posun materiálu je řešen válečkovými dopravníky, odměřování materiálu je pomocí laseru.
- Řez je čistý, kolmý a řezané polotovary jsou délkově přesné.
- Možnost zařezávat materiál na více délkových rozměrů pomocí stavitelných sklopných dorazů.

http://www.tossvitavy.com/index.php/drevostroje/zkracovaci-pily

Formátovací pila

Formátovací pila SCM SI 550 EP CLASS:

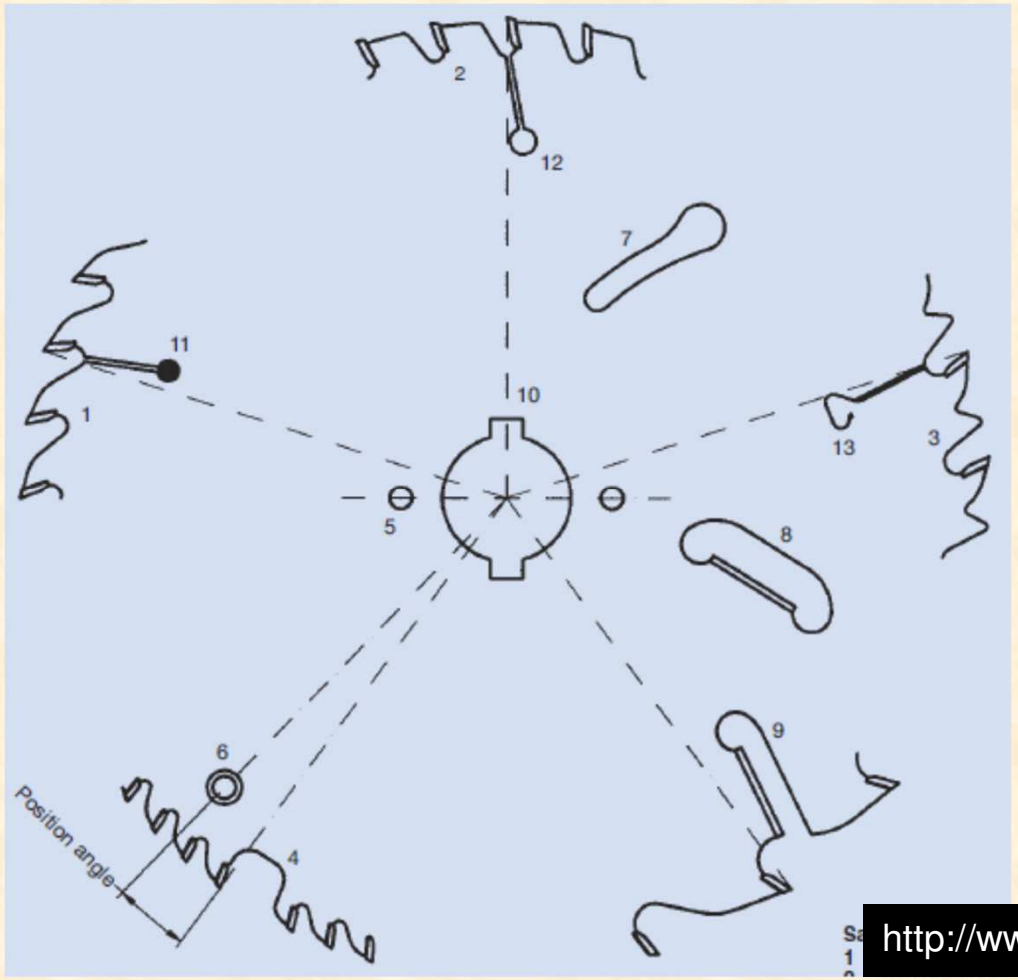
- přesné dělení velkoplošných a laminovaných materiálů
- umožňuje řezání pod úhly 0-60 stupňů,
- podélné dělení dle podélného pravítka s mikroposuvem,
- omítání řeziva a úhlové řezání s naklopenými kotouči 0-45 stupňů.
- silnostěnný profil formátovacího stolu z lehkých slitin vyniká vysokou tuhostí a uložení na ložiskovém valivém vedení a kalených broušených tyčích zaručuje lehký pojezd a přesnost ± 0,04 mm

http://www.panas.cz/katalog/formatovaci-pily/produkt/si-550-ep-class

Charakteristika pilového kotouče

- ✓ Pilové kotouče (PK) jsou tenkostěnné rotační nástroje se zuby na obvodě.
- ✓ PK se používají na příčné a podélné dělení masivního dřeva, materiálů na bázi dřeva, plastů, lehkých kovů apod.
- ✓ Vzájemně se odlišují materiálem disku, průměrem, tvarem, konstrukčními úpravami v řezné části a na ploše disku. Obvykle jsou vypalovány z ocelového plechu na laserových centrech a osazovány zuby ze slinutých karbidů.

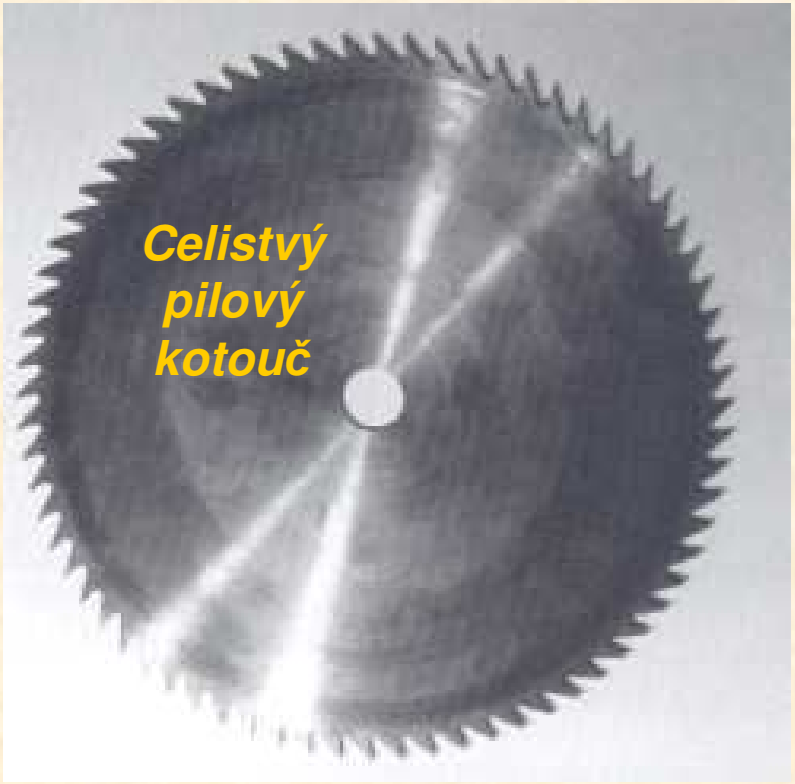
Popis částí pilového kotouče



1 - vlčí ozubení se zaobleným hřbetem,
2 - vlčí ozubení se zalomeným hřbetem,
3 – zuby s omezovačem třísky,
4 – skupinové ozubení – např. PK typu HANIBAL pro podélné řezání nativního dřeva větších dimenzí,
5,6 – vyvažovací a stabilizační otvory,
7 – otvor pro chlazení,
8 – čistící a stabilizační otvor s plátkem ze SK (slinutých karbidů),
9 – čistící a stabilizační drážka s plátkem ze SK,
10 – upínací otvor s drážkami na pera,
11 – dilatační drážka s měděným nýtem,
12 – dilatační drážka s otvorem,
13 – dilatační drážka s protihlukovou úpravou

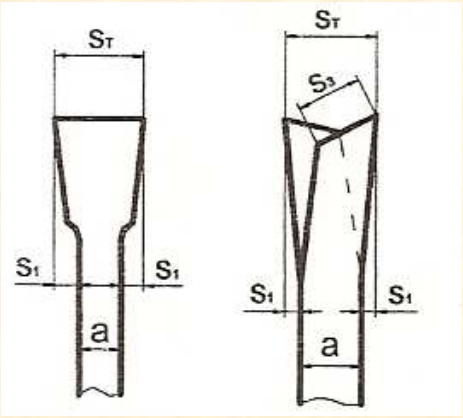
http://www.leitz.org/?cat_id=447

Celistvé pilové kotouče



- Jsou charakterizovány plným diskem a zuby jsou vypáleny přímo v materiálu kotouče.
- Používají se při zpracování zásadně rostlého dřeva.
- Břit zubu obvykle podléhá rychlejšímu opotřebení.
- Ve výrobě hrají již jen podřadnou roli.

pěchování rozvod

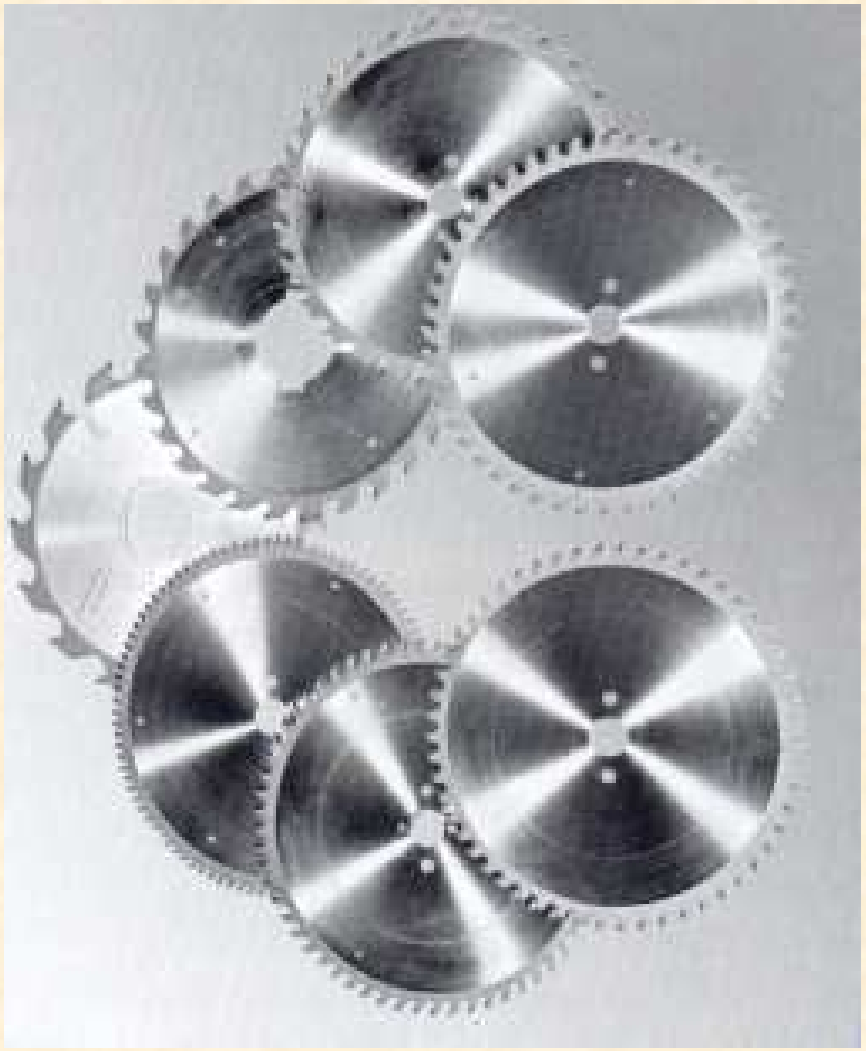


Tělo kotouče i zuby mají stejnou tloušťku, proto musí být zuby rozvedeny nebo rozpěchovány.

Materiál kotoučů:

Uhlíková nástrojová ocel 19 419 (tvrdost 42 až 48 HRC, C - 0,95%)
nebo
Legovaná chrom-vanadová ocel 16 270 (Ni-Cr do 2%, C – 0,7%)

Pilové kotouče s pájenými zuby

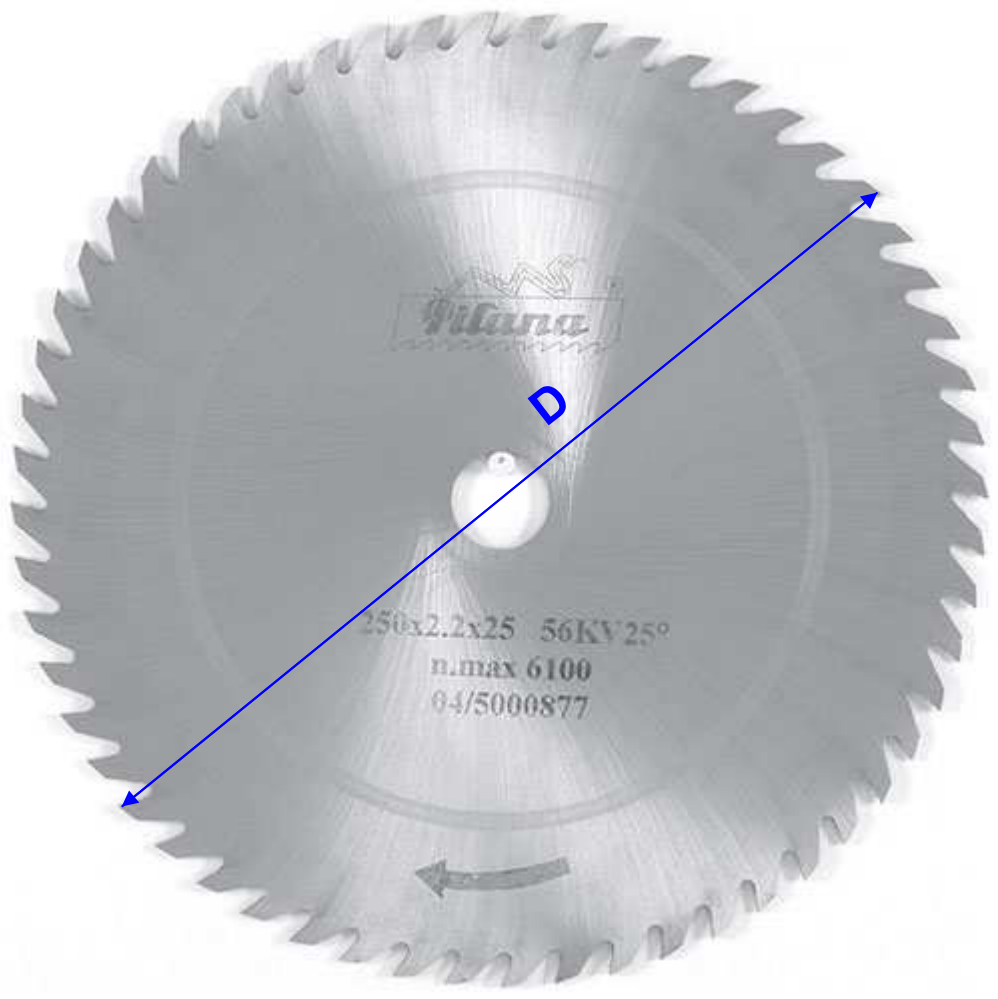


- Zuby jsou vytvořeny připájenými destičkami ze slinutých karbidů, nebo stellitů.
- Šířka zubu je vždy větší než disk kotouče a proto nemusí být zuby rozváděny.
- Trvanlivost ostří a životnost kotouče je několikanásobně vyšší než u celistvých pilových kotoučů.

Materiál těla PK
Ocel k zušlechťování 12 061
Legovaná chromová ocel 14 160
fa Pilana Hulín používá k výrobě:
chromovou ocel 75Cr1 podle DIN (Cr - 0,45%, C – 0,8%)

1. Konstrukce a výroba

Průměr pilového kotouče



Průměr D by měl být co nejmenší z důvodu:

- kotouče s menším průměrem jsou stabilnější,
- zmenší se úhel přeřezávání vláken φ_2, břit odebírá menší třísku více ve směru rovnoběžném s dřevními vlákny (při podélném řezání) $\Rightarrow$ výkon potřebný k řezání se sníží,
- je lepší jakost řezné spáry,
- u kotouče požadujeme, aby byl co nejtenčí $\Rightarrow$ větší výtěžnost materiálu a snížení výkonu,
- kotouče menšího průměru se snadněji ostří.

$$D_{min} = 2(h + a + p)$$

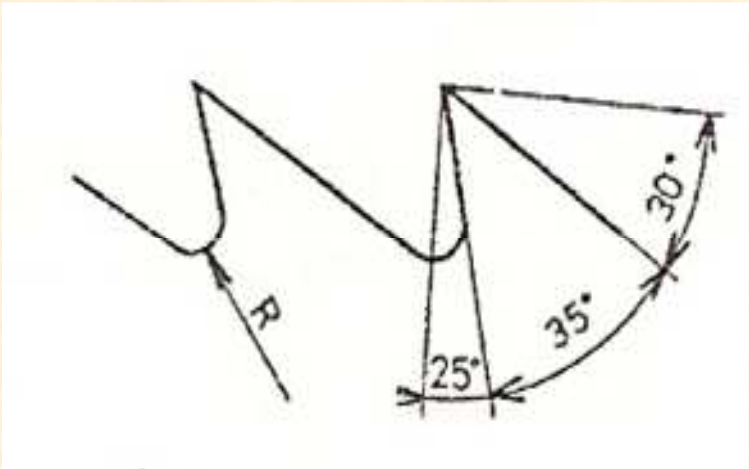
kde:

h - je řezná výška [mm]
a - je vzdálenost stolu od osy hřídele [mm]
p - je minimální přesah kotouče nad obrobkem [mm]

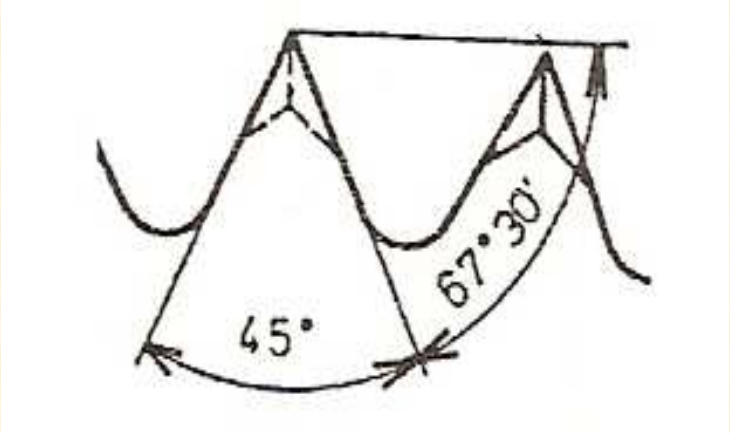
Tvary zubů celistvých pilových kotoučů

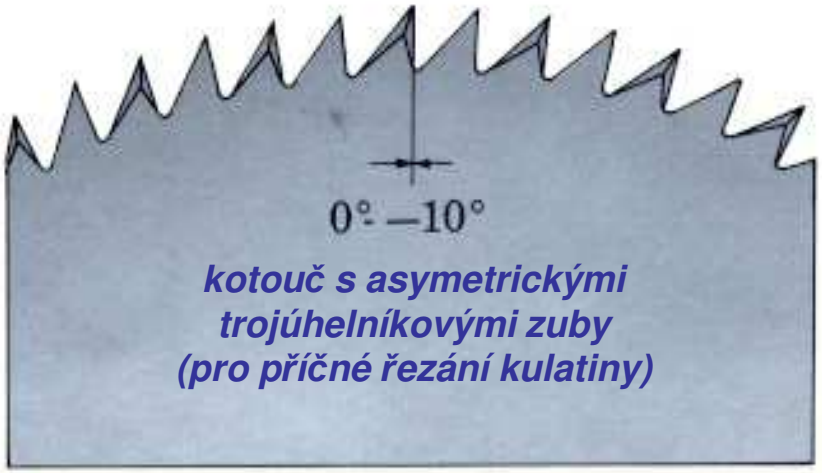
kotouč s vlčími zuby
s lomeným hřbetem
(pro řezání kulatiny a omítání)

kotouč s asymetrickými trojúhelníkovými zuby
(pro podélné řezání)



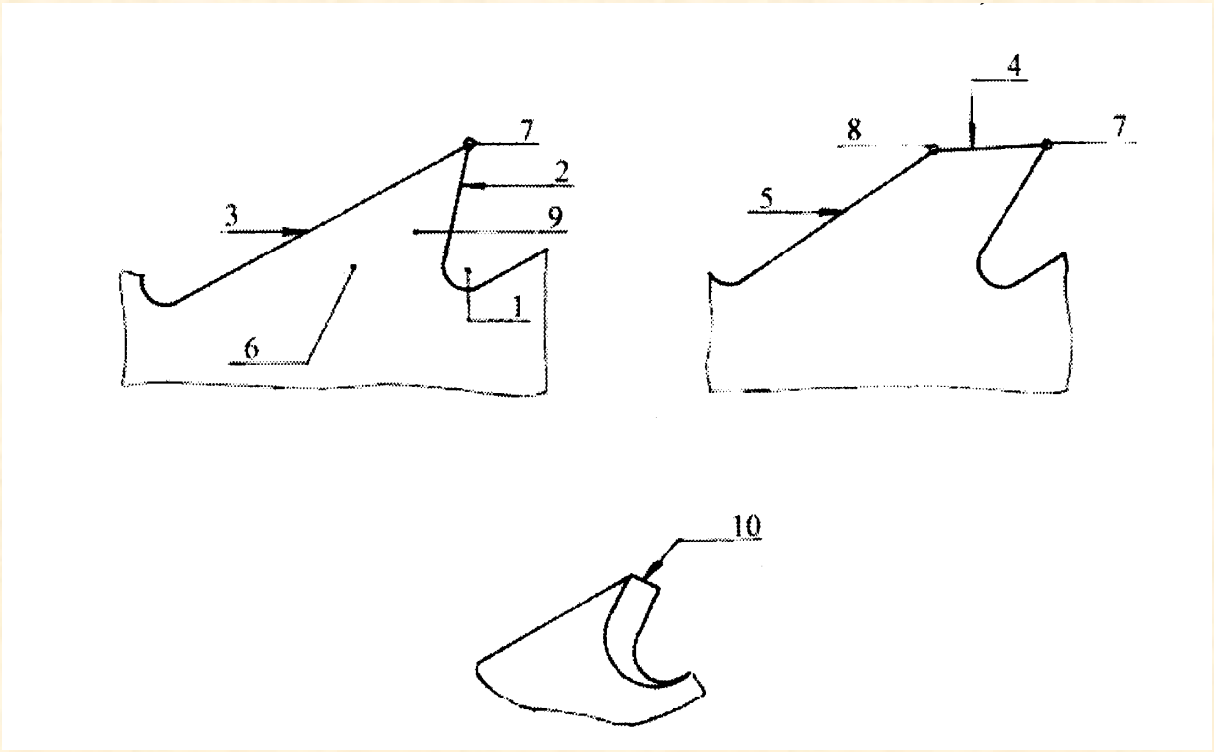
kotouč se symetrickými trojúhelníkovými zuby
(pro příčné řezání)





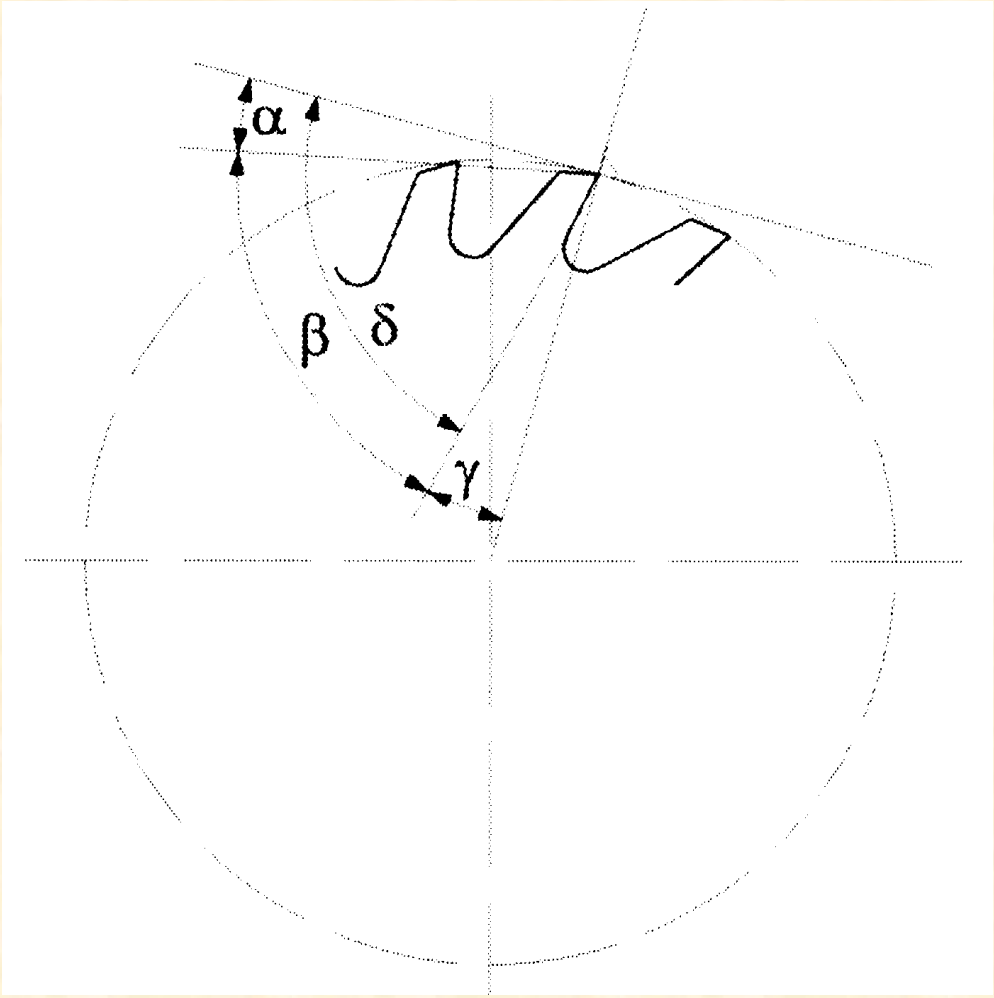
kotouč s asymetrickými
trojúhelníkovými zuby
(pro příčné řezání kulatiny)

Zub PK - hlavní pojmy podle ČSN 22 5301



1 – dno zubové mezery, 2 – čelo, 3 – hřbet, 4 – horní hřbet, 5 – dolní hřbet, 6 – pata zubu, 7 – hrot, 8 – hrana na hřbetě zubu, 9 – zub, 10 – hlavní řezná hrana (břit)

Úhlová geometrie zubů pilového kotouče



Úhel hřbetu α - ovlivňuje tření hřbetu o obráběnou plochu (při zmenšování tohoto úhlu – vyšší otupení břitu, roste řezný odpor, v některých případech nastává pálení obrobku v důsledku vysokého tření hřbetu v řezné spáře), standardní velikost -10° až 30°, optimální 15° pro měkkou i tvrdou dřevinu.

Úhel břitu β - čím je tento úhel větší tím roste odpor proti vnikání nástroje, při malém úhlu ovšem roste riziko ulomení břitu a rychleji se břit také otupuje, u slinutých karbidů je obvykle tento úhel větší.

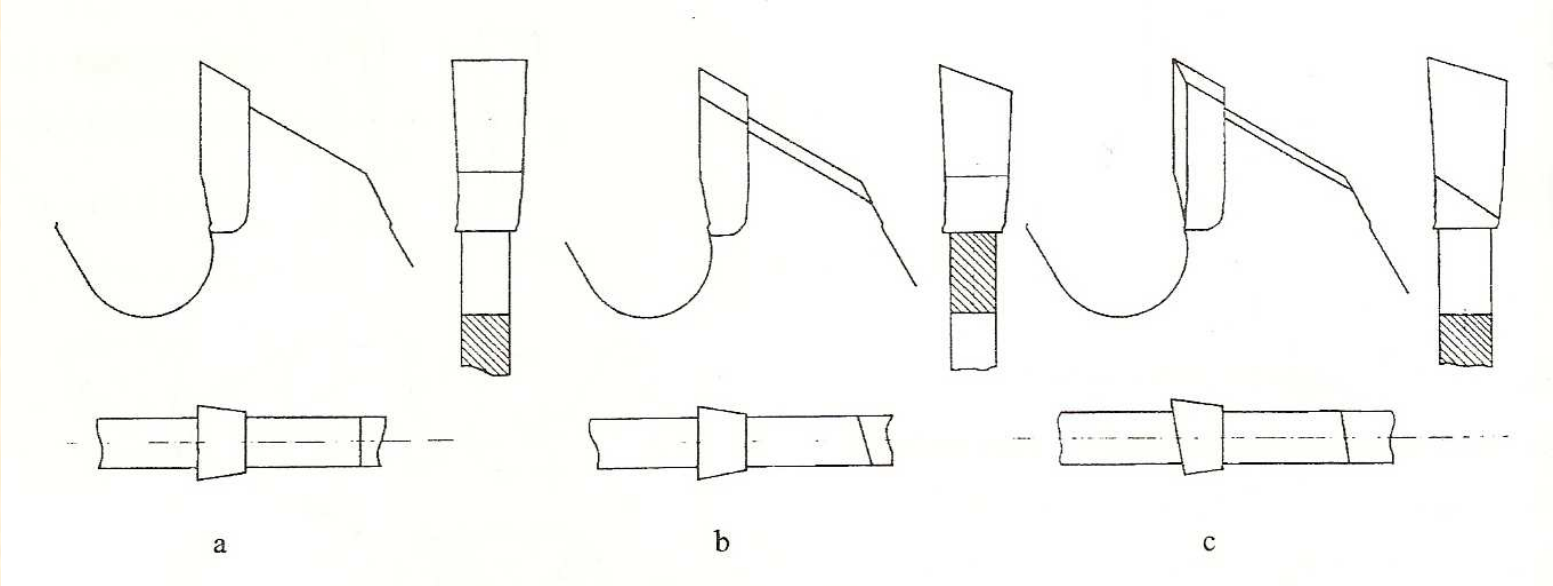
Úhel čela γ - přímo ovlivňuje tvorbu třísky, při větším úhlu klesá řezný odpor, jeho optimální hodnota závisí na obráběném materiálu, směru dřevních vláken a velikosti posuvu na zub, bývá 30 až 40° pro měkkou a 30° pro tvrdou dřevinu.

Pilové kotouče s destičkami ze SK

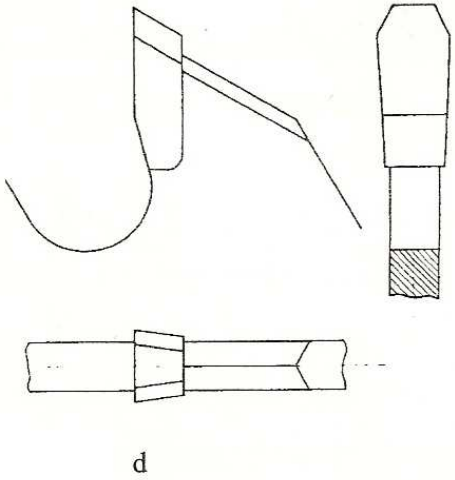
a – ploché zuby (řezání tvrdého dřeva, někdy s omezovačem třísky)

b – střídavě šikmé zuby (hladké řezy u podélného řezání rostlého dřeva)

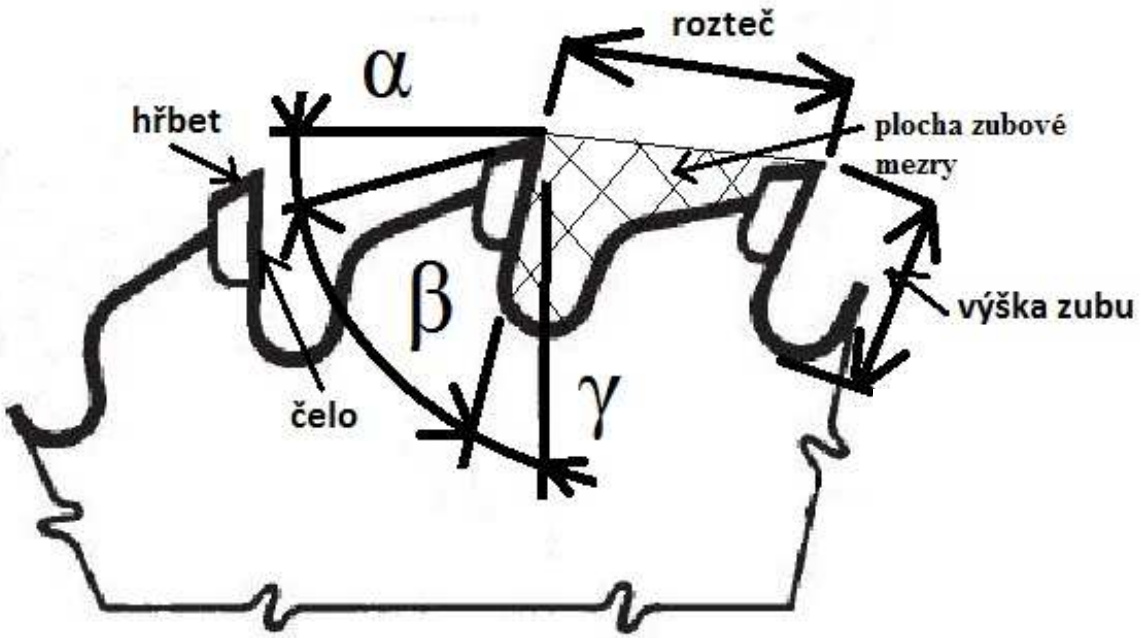
c – střídavé zuby se střídavým zkosením plochy čela (hladké řezy zejména u dýhovaných materiálů)



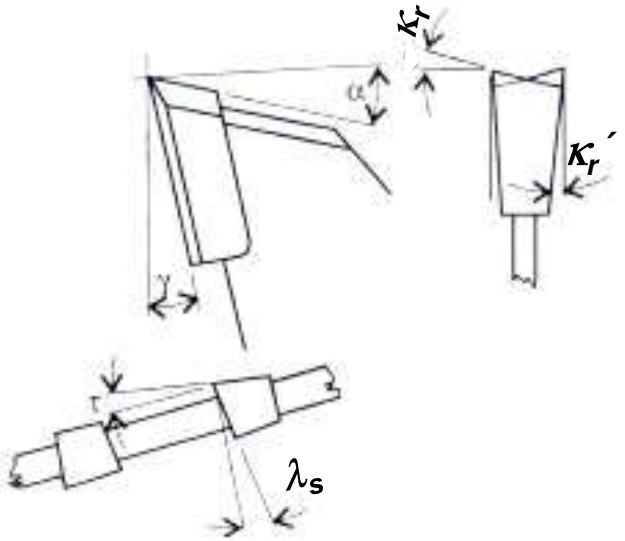
d - lichoběžníkové (trapézové) zuby (ve spojení s plochými zuby → velmi kvalitní řezy laminovaných aglomerovaných desek)



Geometrie zubů

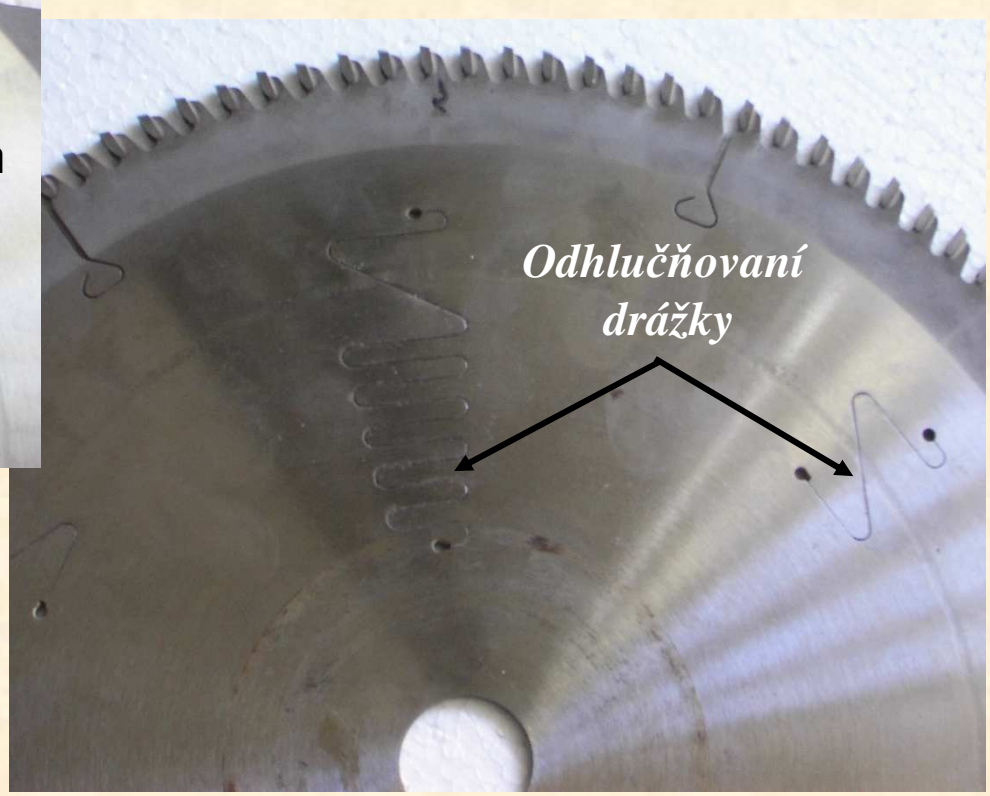


α- úhel hřbetu
β- úhel břitu
γ- úhel čela
δ- úhel řezu



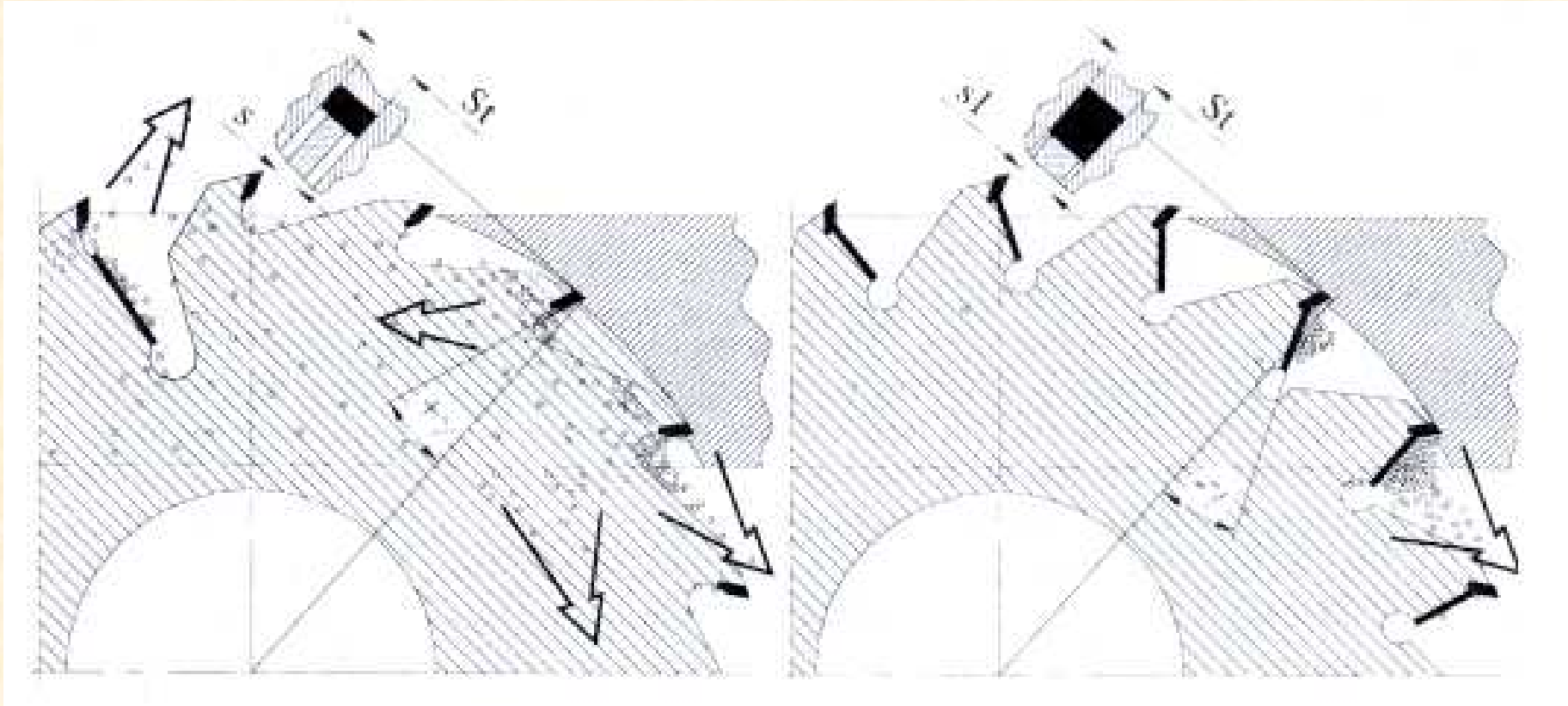
κ_r - úhel sklonu hlavní řezné hrany (řezání rostlého dřeva – kvalitnější řez)
κ_r' - úhel sklonu vedlejší řezné hrany (snížení tření zubů v řezné spáře)
λ_s - úhel zkosení plochy čela (hladké řezy např. dýhovaných materiálů)

Konstrukce pilových kotoučů se zuby ze SK



Rozmítací kotouče se speciálním ostřím

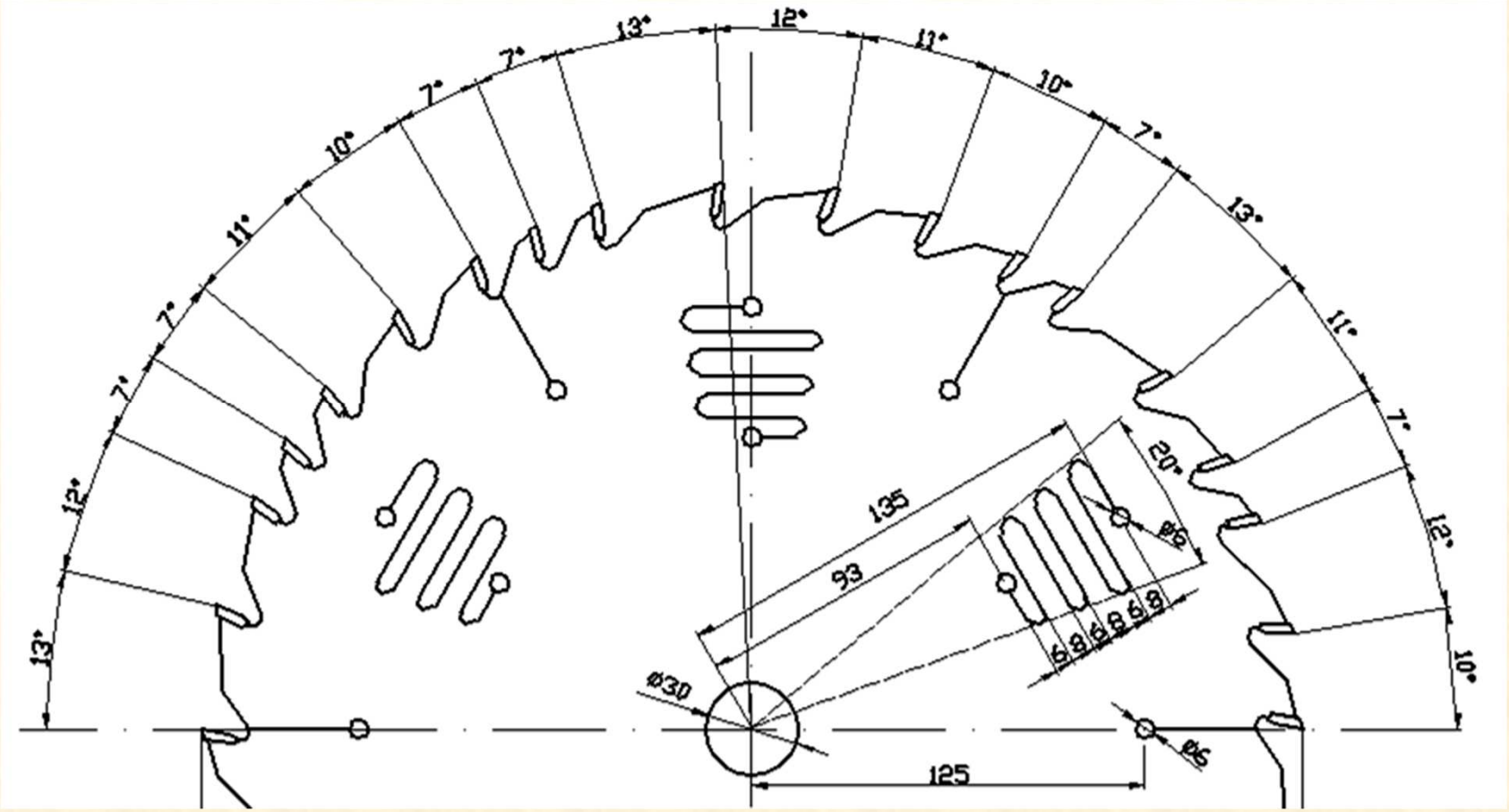
Uzavřené ostří s vynášecími destičkami, snižuje průnik pilin a třísek mezi tělo kotouče a řeznou spáru ⇒ snížení teplotního namáhání kotouče a lepší kvalita řezu.



Patent Application (Wasilewski, Orlowski 2007) Polsko

video 1 - výroba

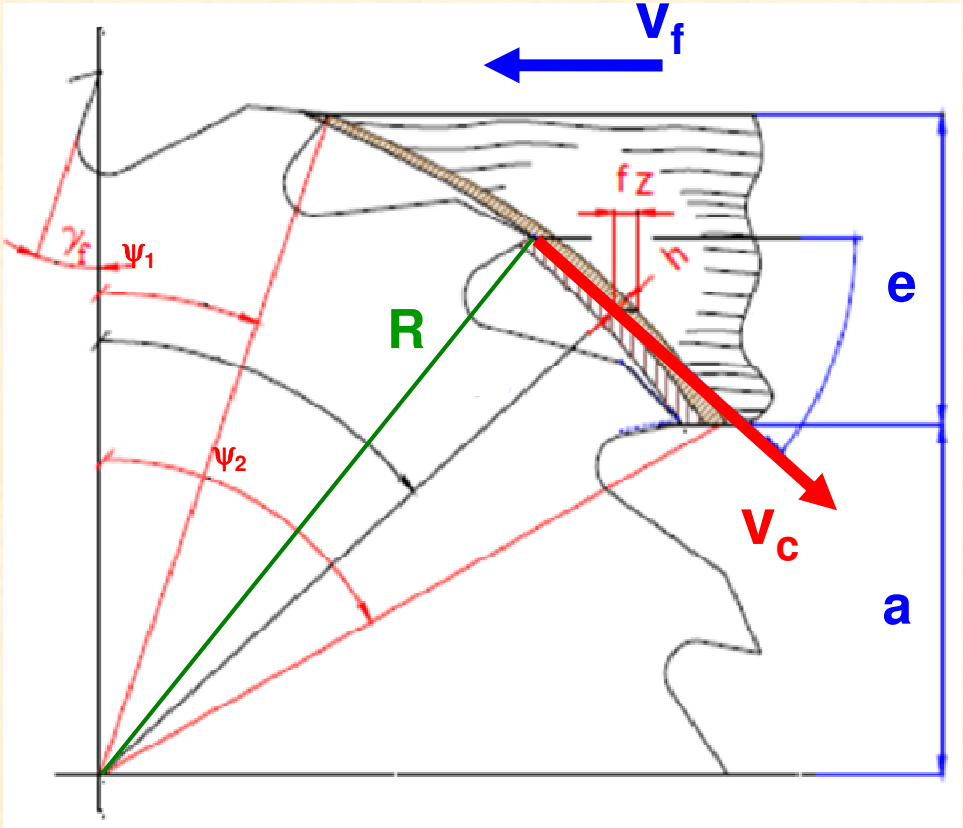
Kotouče s nepravidelnou roztečí zubové mezery



Pozitivní vliv na snížení hlučnosti, zlepšení kvality řezné spáry a nižší prašnost.

2. Kinematika obrábění

Řezná a podávací rychlost



Řezná rychlost:

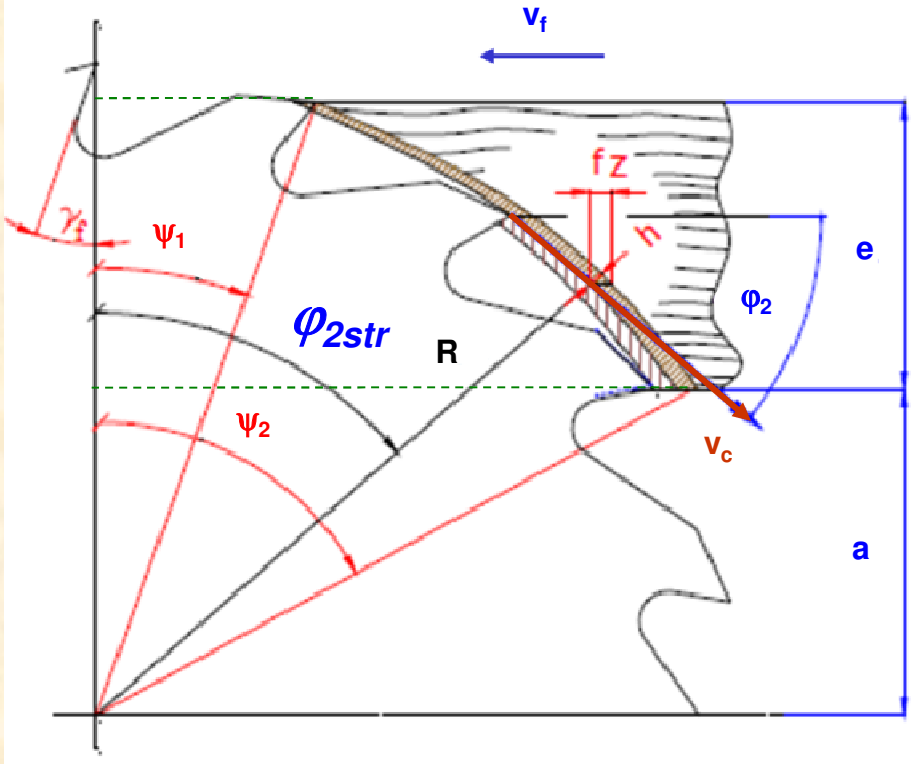
$$v_c = \omega \cdot R = \pi \cdot D \cdot n \qquad [m \cdot s^{-1}]$$

Podávací rychlost obrobku:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \qquad [m \cdot min^{-1}]$$

ψ_1 - vstupní úhel pilového kotouče (°), ψ_2 - výstupní úhel pilového kotouče (°),
e - řezná výška (tloušťka obrobku) (m), a – vzdálenost obrobku od osy rotace kotouče (m),
h – tloušťka třísky (m), f_z – posuv na zub (m),
z – počet zubů pilového kotouče, n – otáčky pilového kotouče (min^{-1}).

Střední úhel přeřezávání vláken

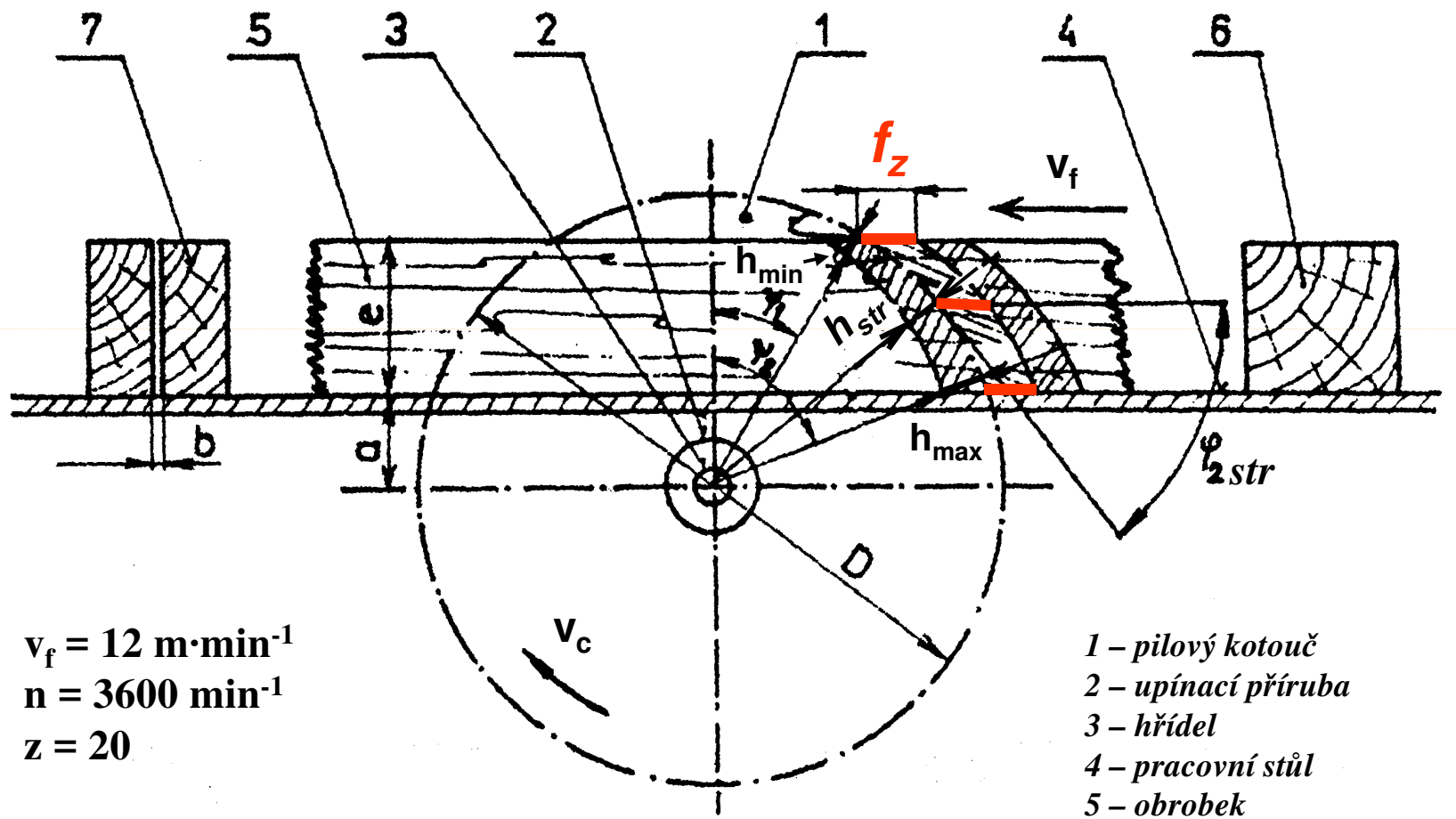


$$\psi_1 = \arccos\left(\frac{a+e}{R}\right)$$

$$\psi_2 = \arccos\left(\frac{a}{R}\right)$$

$$\varphi_{2str} = \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}$$

Posuv na zub

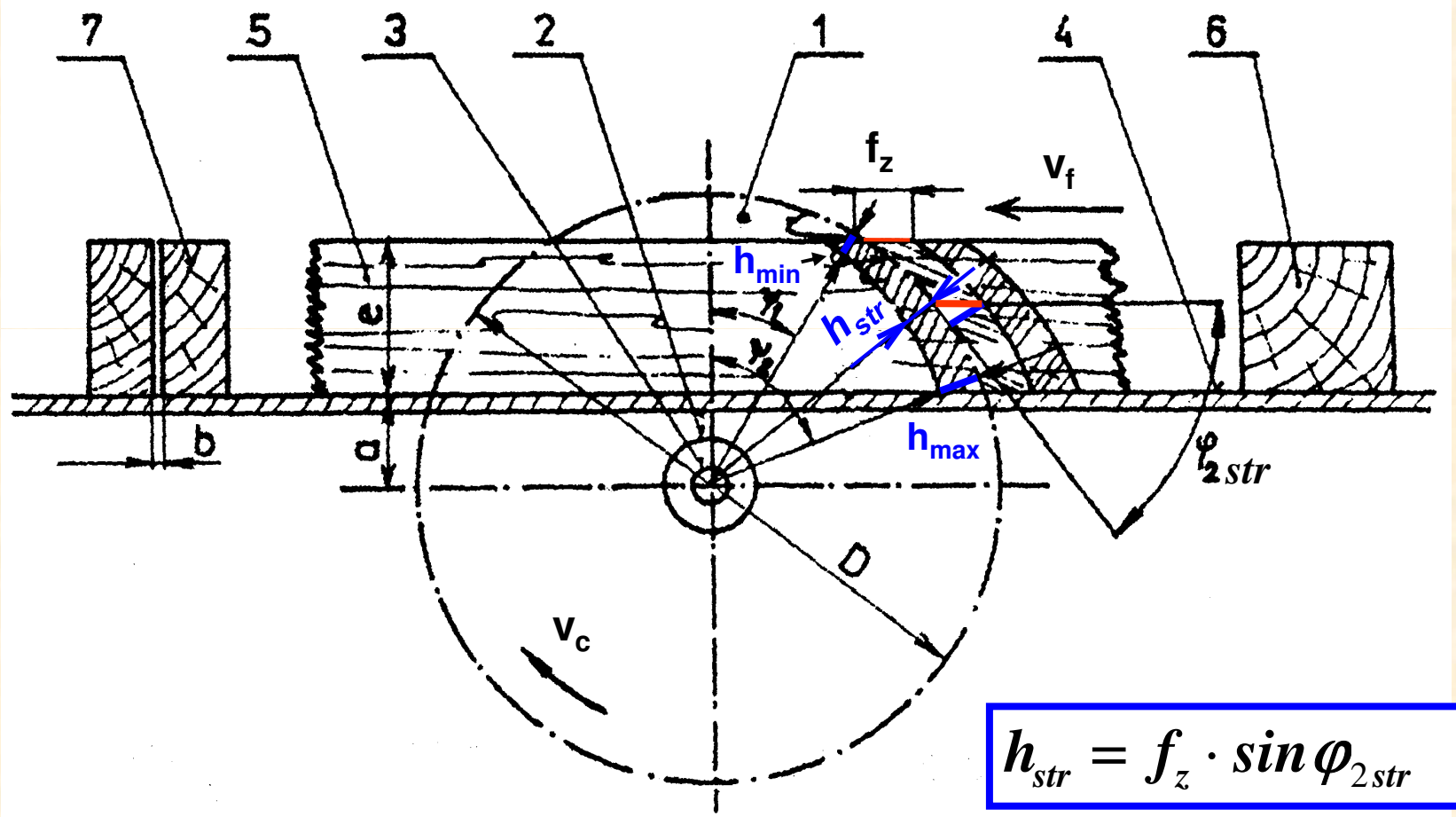


$v_f = 12\ m \cdot min^{-1}$
$n = 3600\ min^{-1}$
$z = 20$

1 – pilový kotouč
2 – upínací příruba
3 – hřídel
4 – pracovní stůl
5 – obrobek
6 – obrobek před řezem
7 – obrobek po řezu
h_{str} – střední tloušťka třísky

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} = \frac{12000}{3600 \cdot 20} = 0{,}17\ mm$$

Střední tloušťka třísky



$$h_{str} = f_z \cdot \sin \varphi_{2str}$$

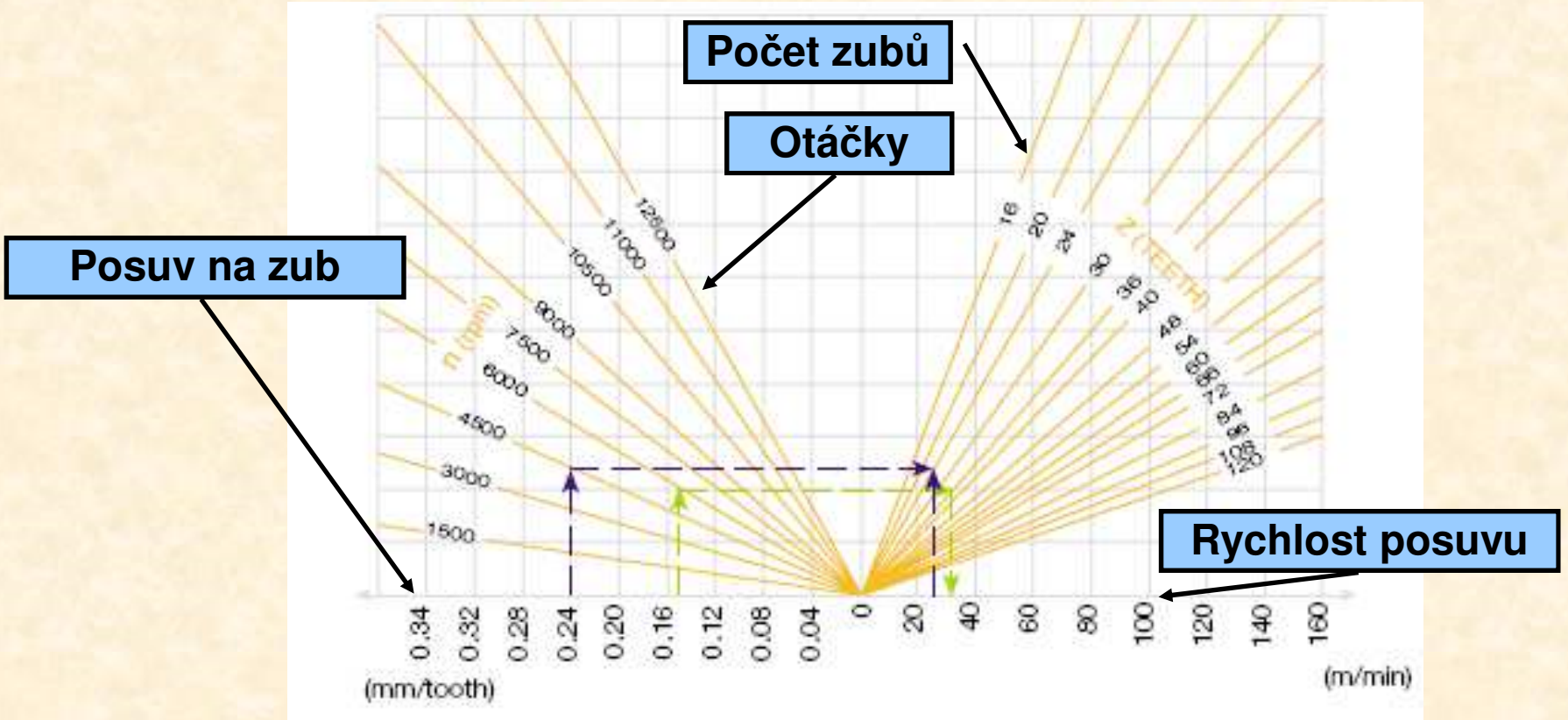
Řezání pilovým kotoučem je řezání ve spáře.
Vznikající tříska má nerovnoměrnou tloušťku
⇨ jedná se tedy o složité řezání.

Střední úhel přeřezávání vláken

$$\varphi_{2str} = (\psi_1 + \psi_2)/2$$

Doporoučené řezné podmínky

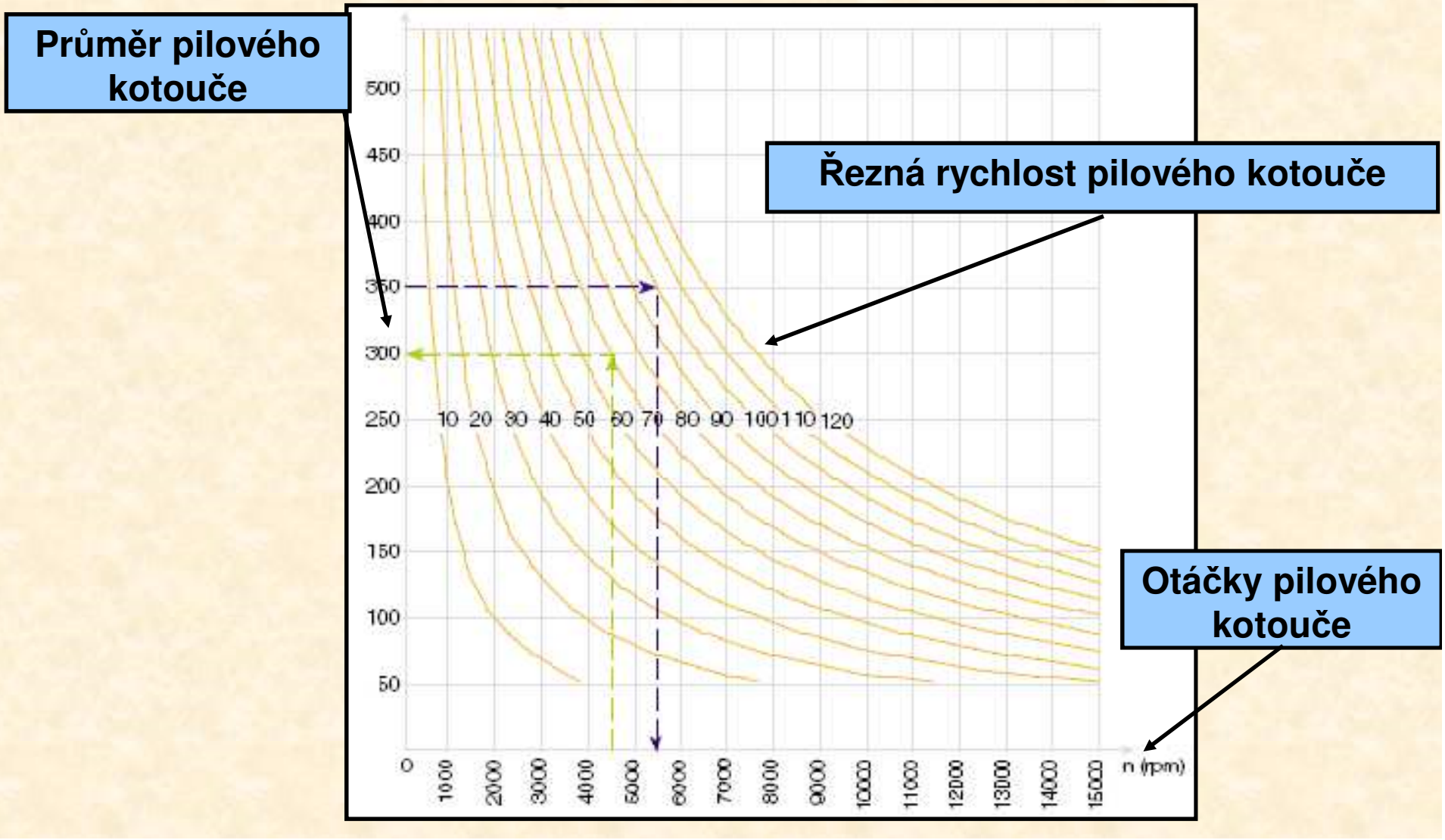
Správné používaní pilových kotoučů znamená dodržovat **doporučení výrobce PK** pro volbu otáček ***n*** (t.j. řezné rychlosti v_c), posuvu na zub f_z (t.j. posuvné rychlosti v_f), **doporučení výrobce stroje** pro průměr a tvar upínací příruby.



Doporučené posuvy na zub

Doporučené hodnoty posuvu na zub (Pilana)		
Materiál		Posuv na zub (mm/zub)
Měkké dřevo	**podélné**	**0,2 – 0,3**
	příčné	**0,1 – 0,2**
Tvrdé dřevo		**0,06 – 0,15**
Dřevotříska		**0,1 – 0,25**
Překližka		**0,05 – 0,12**
MDF		**0,05 – 0,1**
Laminované DTD		**0,05 – 0,1**
Dýhované DTD		**0,02 – 0,05**
Neželezné kovy a pasty		**0,02 – 0,05**

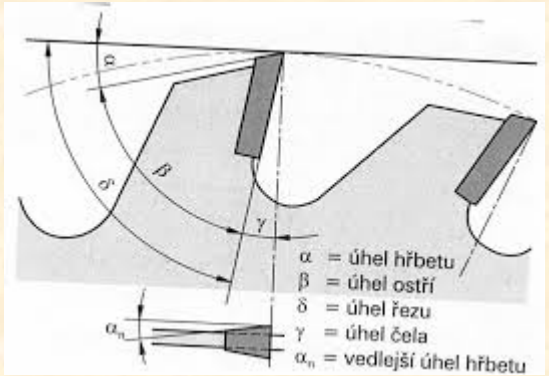
Nomogram pro stanovení řezné rychlosti



3. Dynamika obrábění

Analytická teorie pro řezání ve spáře

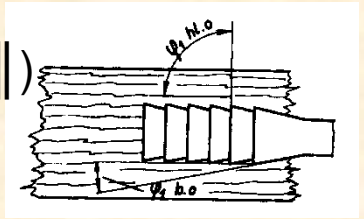
Řezání ve spáře je charakterizováno a nejčastěji realizováno třemi řeznými hranami a dvěma modely řezání a je typické pro pilařské technologie:



Hlavní ostří: *Řezání podélně - čelní* (∥ - ⊥)

$\varphi_0 = 0°$ $\varphi_1 = 90°$ $\varphi_2 = arctg(t/fz)\ (°)$ $\varphi_3 = 90°$

Boční ostří: Řezání tangenciálně-příčně-podélné (⫫ - ⊥- ∥)



$\varphi_0 \neq 0°$ $\varphi_1 = 6°50´$ $\varphi_3 = arctg(t/fz)\ (°)$

pěchované zuby

Poznámka: Bočním ostřím je obvykle formován povrch řezné spáry a při jeho utváření zákonitě dochází ke zvyšování řezné síly. Podobně jako u technologicko-statistické metody je nárůst měrného řezného odporu také způsoben zvýšeným třením boku nástroje v řezné spáře.

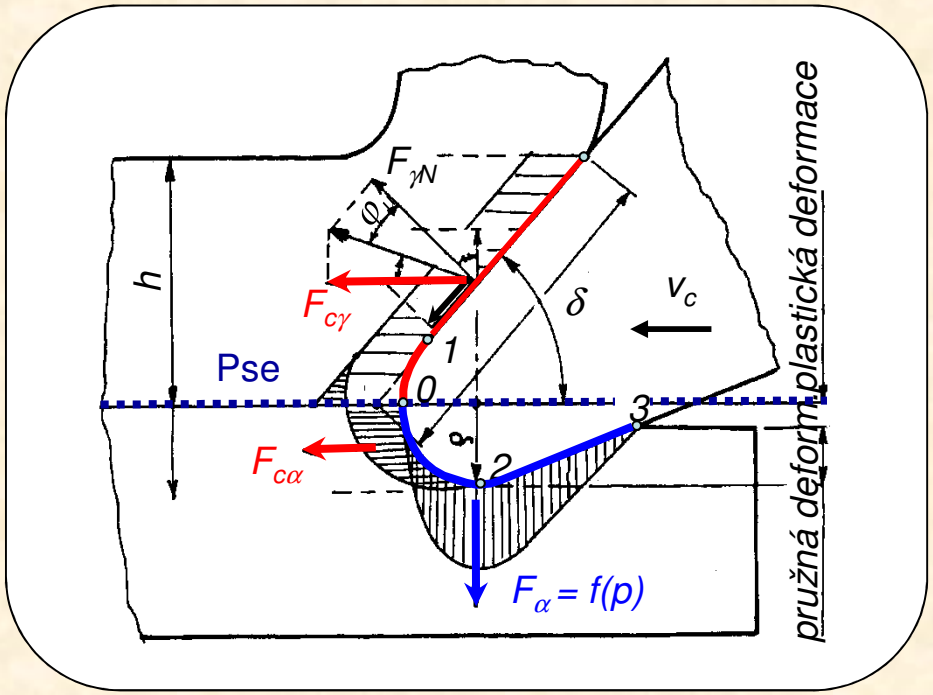
Analytická metoda výpočtu řezné síly

Analytická metoda výpočtu řezné síly vychází z teorie prof. Beršadského a z modifikací této teorie dalšími autory, v ČR Ing. Prokešem.

Princip analytické metody je založen na současném působení sil na čelo i hřbet nástroje – proto se také někdy tato metoda nazývá „Všeobecný zákon řezání“.

$$F_c = F_{c\alpha} + F_{c\gamma}$$

Výhoda - rozlišení postupu výpočtu měrného řezného odporu pro tloušťku třísky do 0,1 mm a nad 0,1 mm.



Zahrnuje vliv otupení nástroje → vychází z *celkové skutečné dráhy*, kterou nástroj urazí a dále zohledňuje i *vliv materiálu nástroje*.

Měrný řezný odpor k_c

Pro „mikrotřísku“ (h <0,1mm):

$$k_c = k^1_{<0,1} + k^{\rho}_{<0,1} = \left(A_{\varphi_2} \cdot \delta + B_{\varphi_2} \cdot v_c + C_{<0,1}\right) + \frac{\left(a_\rho - 0{,}8\right) \cdot p}{h_{str}}$$

Pro „makrotřísku“ (h >0,1mm):

$$k_c = k^1_{>0,1} + k^{\rho}_{>0,1} = \left(A_{\varphi_2} \cdot \delta + B_{\varphi_2} \cdot v_c - C_{>0,1}\right) + \frac{a_\rho \cdot p}{h_{str}}$$

k^1 … základní měrný řezný odpor,
k^ρ … přírůstek měrného řezného odporu vlivem otupení nástroje,
h_{str} … střední tloušťka třísky,
A … parametr vyjadřující vliv úhlu řezu a modelu řezání,
B … parametr vyjadřující vliv řezné rychlosti,
C … parametr vyjadřující vliv tloušťky třísky,
p … parametr vyjadřující měrnou řeznou sílu tření a plastických deformací na hřbetu nástroje,
a_ρ … koeficient otupení ostří.

$$\longrightarrow \quad a_\rho = 1 + \frac{0{,}2\,\Delta\rho}{\rho_0}$$

Poznámka: Parametry *A*, *B*, *C*, *p* byly původně stanoveny pro obrábění borovice a dubu - pro jiné dřeviny je nutno násobit výsledné odpory koeficientem dřeviny.

Poznámka: Optimum řezné rychlosti bylo při experimentu stanoveno $v_c = 30 \div 40\ ms^{-1}$ pro řezání, pro frézování $v_c = 40\ ms^{-1}$. Při rychlostech nad $50\ ms^{-1}$ (měřeno vysokorychlostní kamerou) je rychlost odřezávané třísky (i nárůst řezné síly) v důsledku jejího prvotního stlačení a následného vypružení o 50÷60% vyšší. Při nižších rychlostech řezání je proto nutné ve vzorcích použít opravnou konstantu ($90\text{-}v_c$).

Analytické vztahy ze základního experimentu pro určení k^1

Hodnoty základního měrného řezného odporu $k^1_{>0,1}$ (pro $h > 0,1mm$) v závislosti na (δ, v_c, φ_2) byly sestavny na základě rozsáhlého statistického vyhodnocení experimentálních dat:

Základní experiment:
Řezání borovice, dub
Úhel řezu $\delta = 45°$
Úhel přeřezávání vláken $\varphi_2 = 45°$

Pro borovici platí:

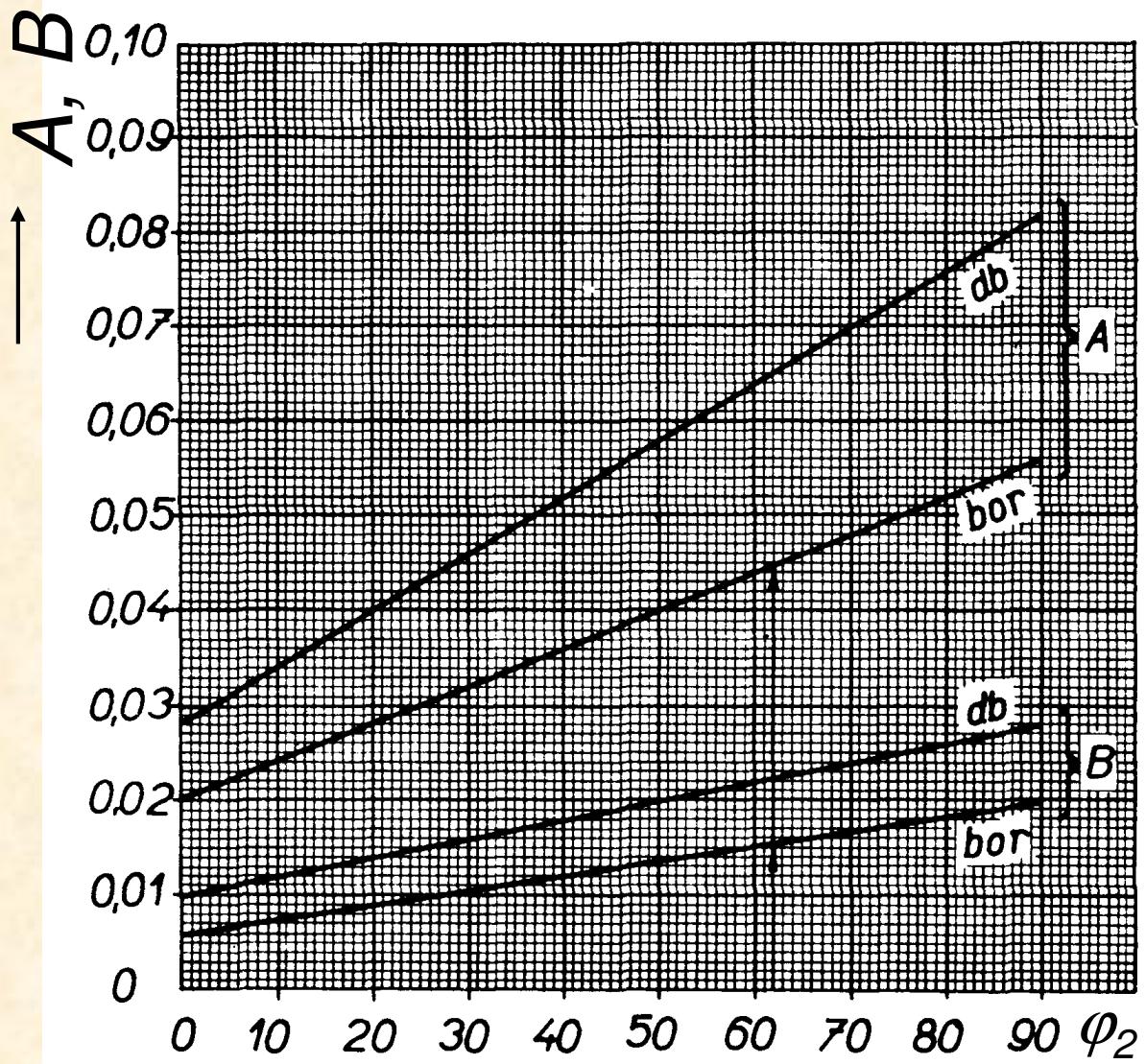
$$k^1_{>0,1} = A_{\varphi_2} \cdot \delta + B_{\varphi_2} \cdot v_c - C_{\varphi_2} = (0,02 + 0,0004\varphi_2) \cdot \delta + (0,007 + 0,00015\varphi_2) \cdot v_c - (0,7 + 0,018\varphi_2)$$

Pro dub platí:

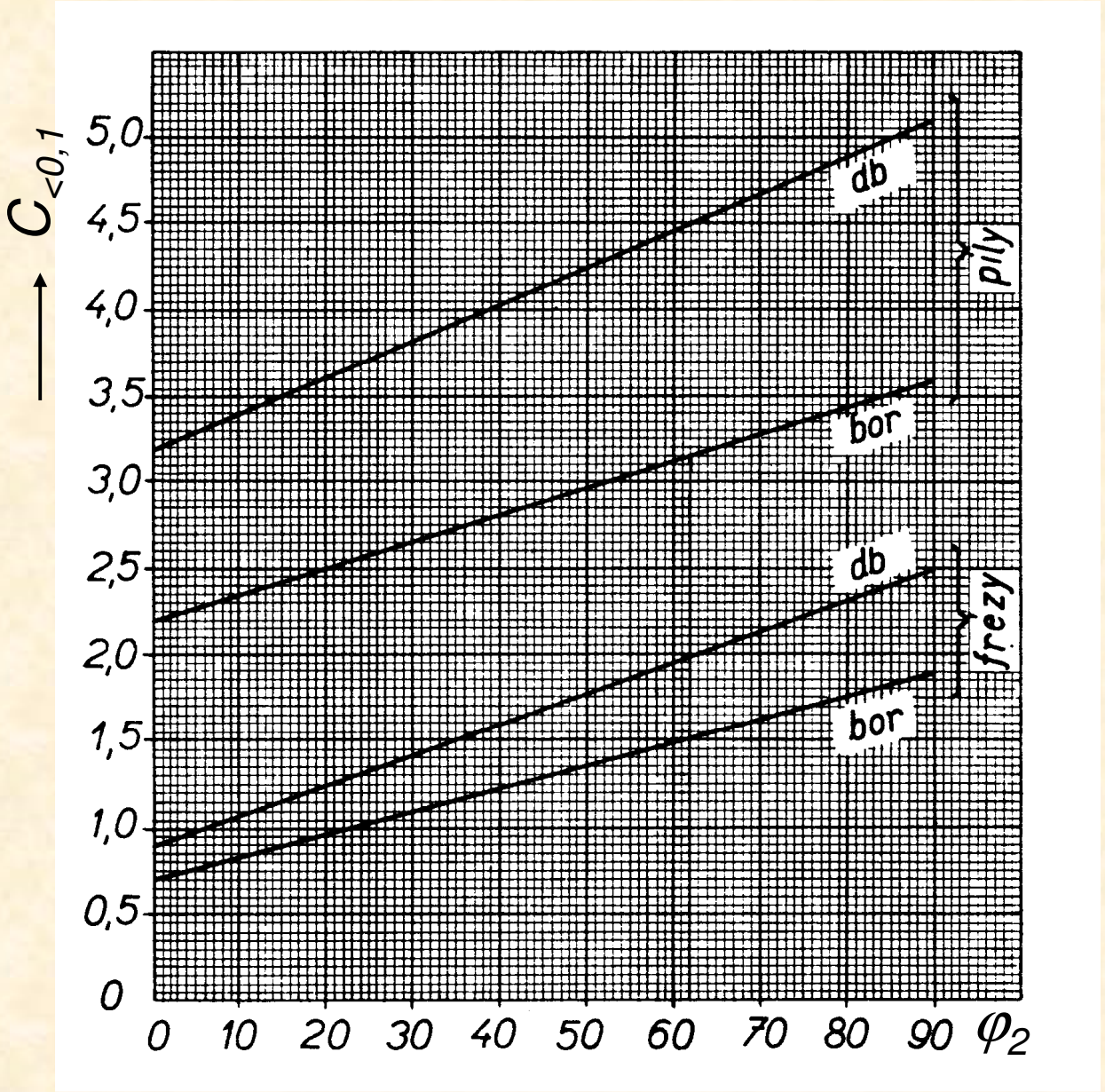
$$k^1_{>0,1} = A_{\varphi_2} \cdot \delta + B_{\varphi_2} \cdot v_c - C_{\varphi_2} = (0,028 + 0,0006\varphi_2) \cdot \delta + (0,009 + 0,0002\varphi_2) \cdot v_c - (0,76 + 0,02\varphi_2)$$

Poznámka: Pro praktické potřeby výpočtu základního měrného řezného odporu byly sestrojeny nomogramy parametrů *A*, *B*, *C*, *p* jako funkce úhlu přeřezávání vláken φ_2.

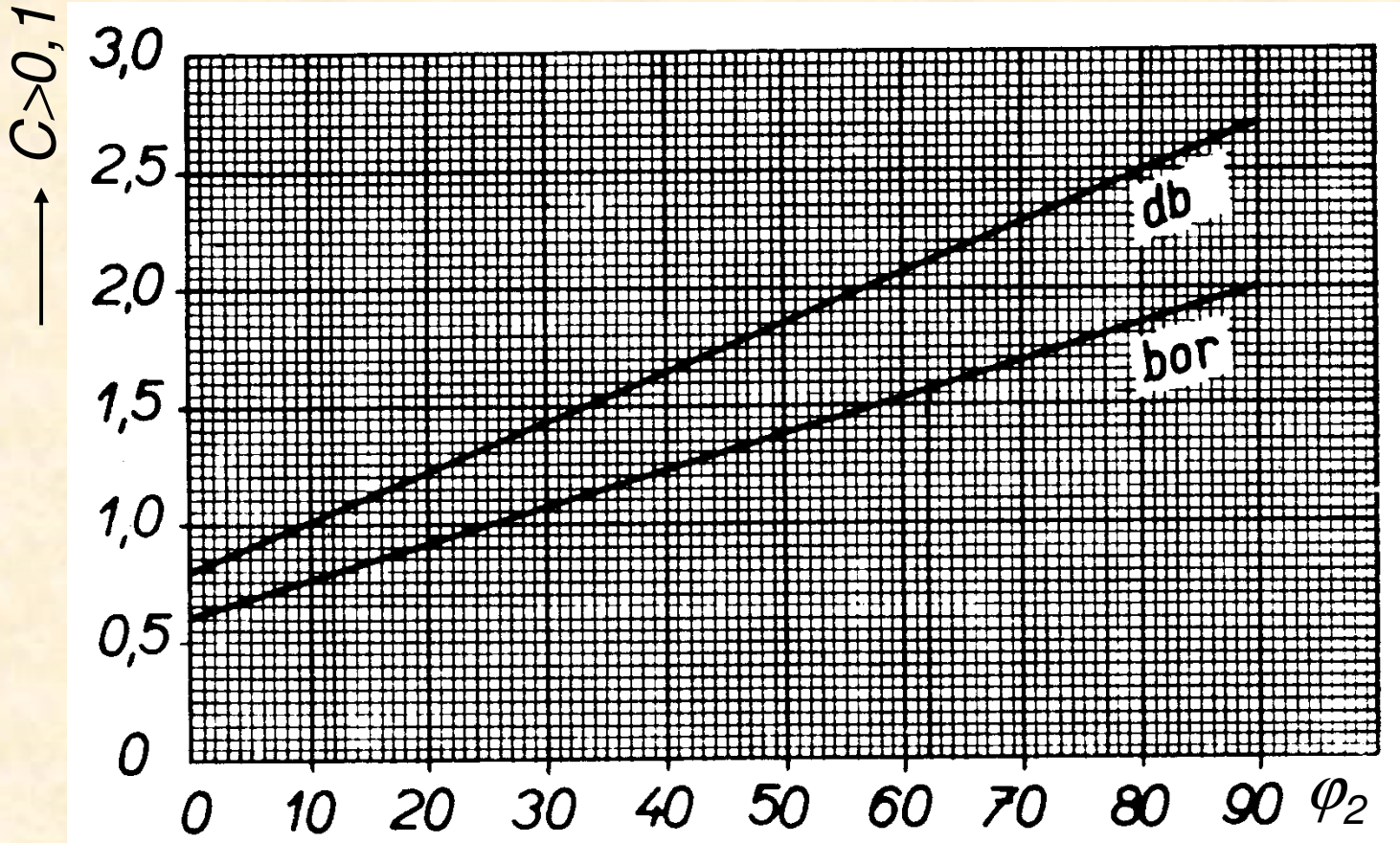
Parametry A, B (Prokeš)



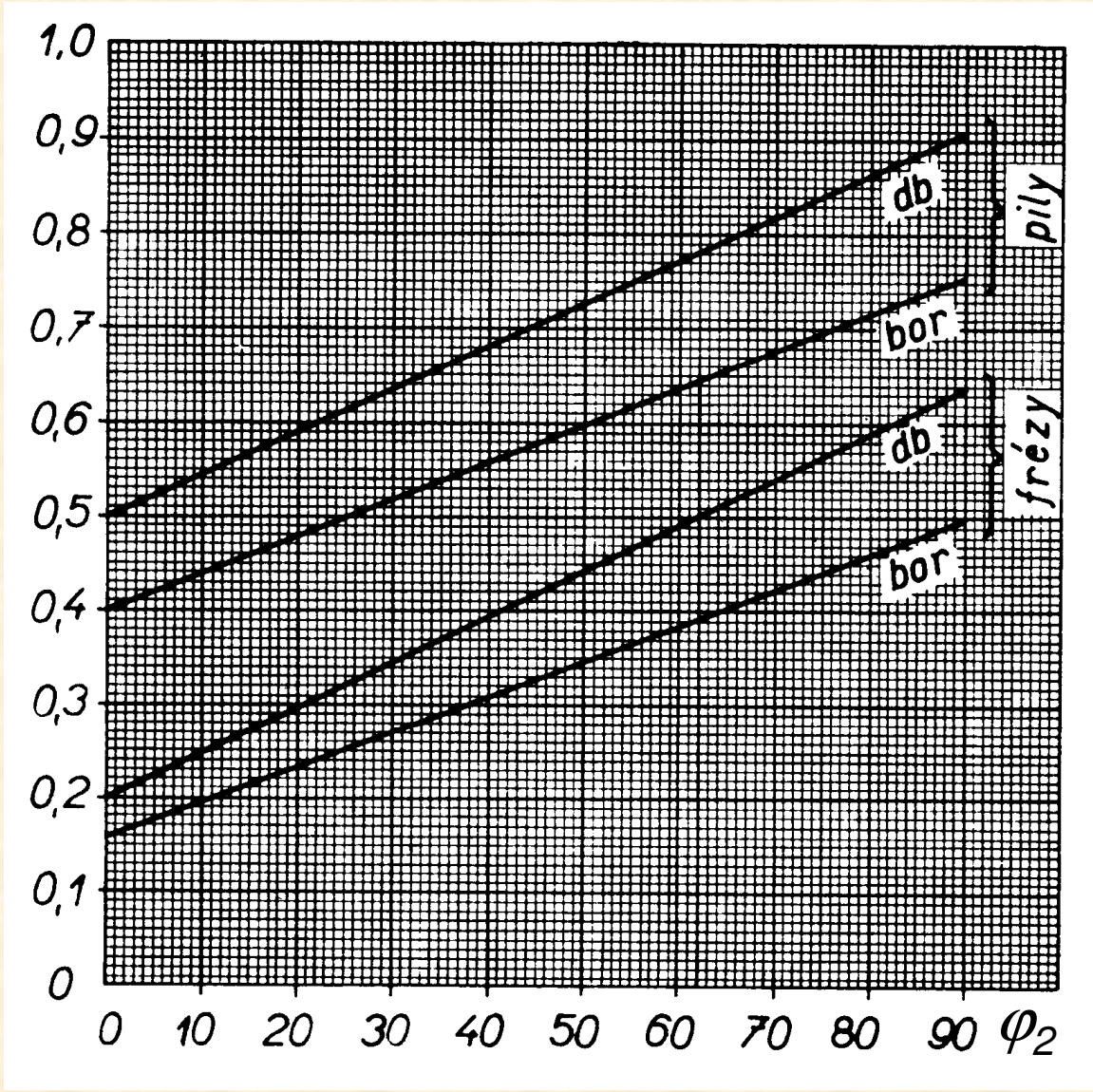
Parametr C pro mikrotřísku



Parametr C pro makrotřísku

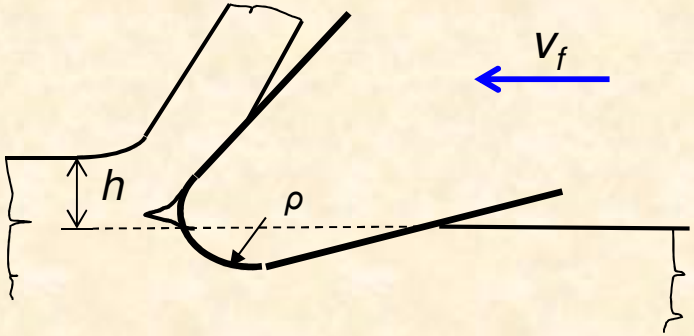


p - parametr zohledňující silové poměry na hřbetu nástroje

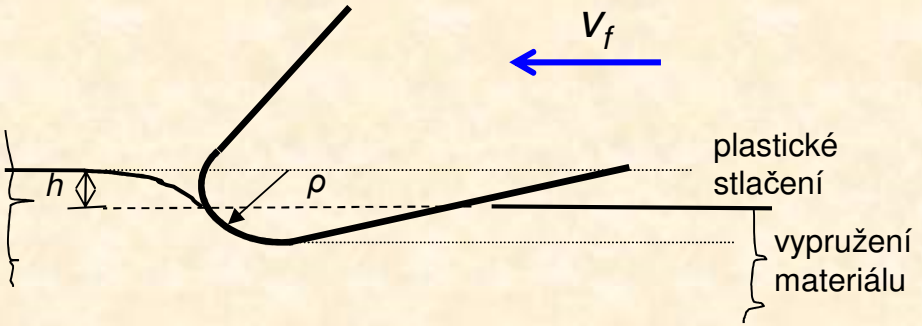


Vliv otupení zubu na vznik třísky

Tříska vznikne jen tehdy, když poloměr zaoblení břitu nástroje bude < než tloušťka vznikající třísky



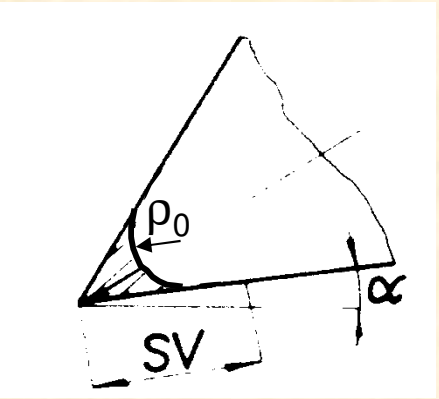
Tříska nevznikne, když poloměr otupení břitu nástroje bude > než tloušťka předpokládané třísky



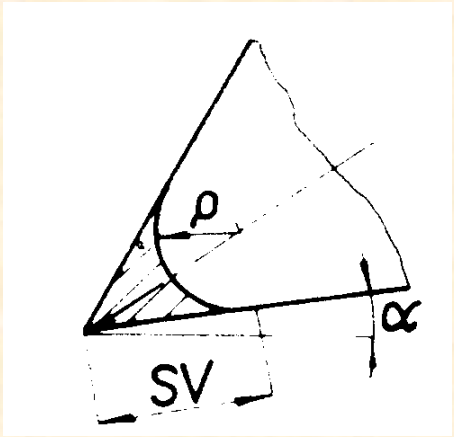
Přírůstek otupení zubu PK

Dobře nabroušené frézovací nože (zuby) obvykle mají počáteční poloměr ostří $\rho_0 = 4$ až $10\ \mu m$.

$$a_\rho = 1 + \frac{0{,}2\Delta\rho}{\rho_0}$$



Zvětšení zaoblení ostří $\Delta\rho$ v závislosti na efektivní délce (frézování) řezání L lze vypočítat podle vztahu



$$\Delta\rho = \varepsilon \cdot L$$

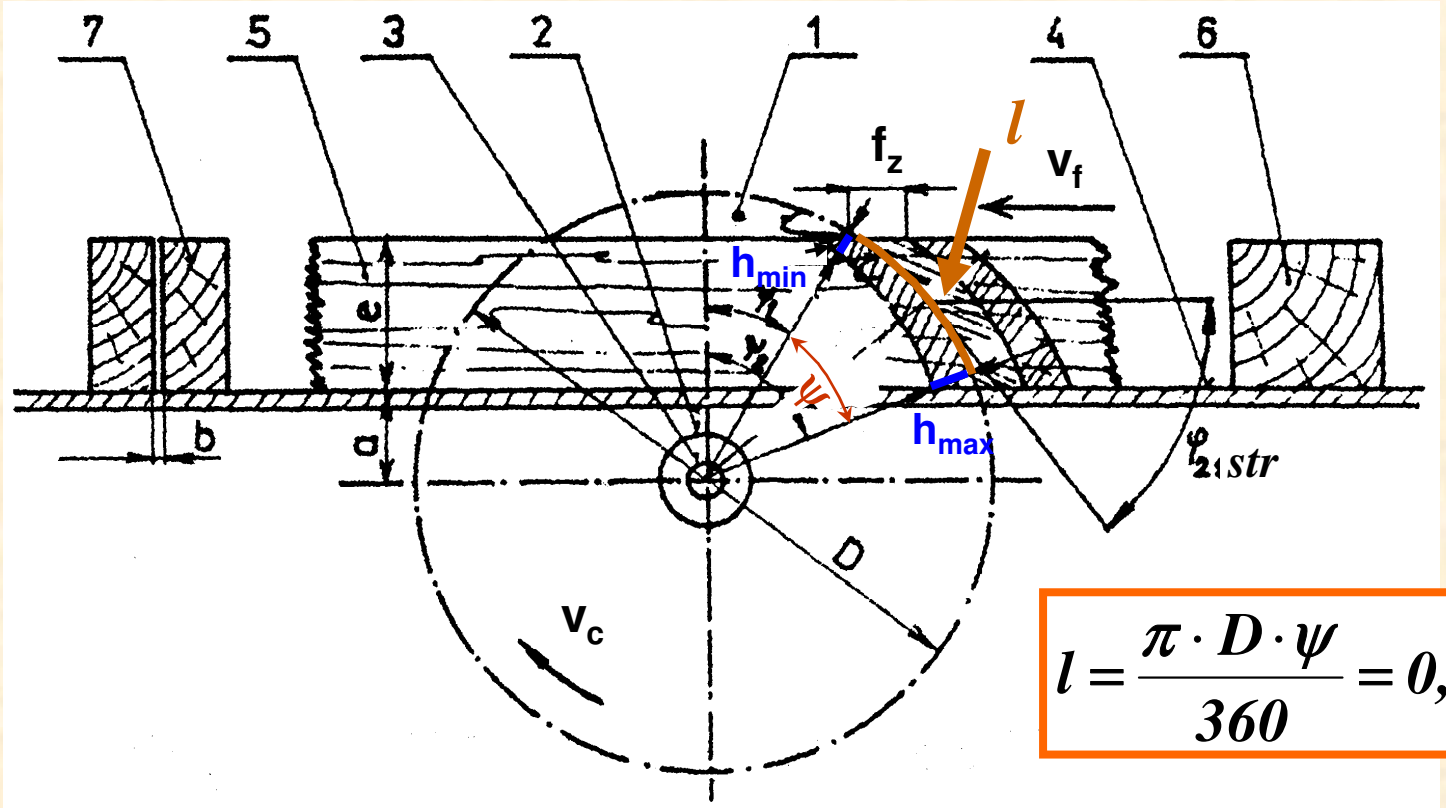
ε … *opotřebení břitu na 1 m délky řezu (podle Prokeš, 1978:*

- pro měkké jehličnaté dřevo ε = 0,0016 μm/bm,
- pro tvrdé listnaté dřevo ε = 0,002 μm/bm,

Poznámka: Platí pro nástroje z ocelí 19 423 a 19 712.

- pro rychlořeznou ocel je nutné násobit 0,5
- pro slinuté karbidy je nutné násobit 0,3 až 0,5.

Délka záběru zubu (délka třísky)



Dráha zubu v obrobku je cykloidní, ovšem při $v_c >> v_f$ můžeme s velmi malou chybou uvažovat dráhu kruhovou.

$$l = \frac{\pi \cdot D \cdot \psi}{360} = 0{,}0175 \cdot R \cdot \psi$$

Celková řezná délka zubu pro určitou délku obrobku l_o:

$$L = \frac{l_o}{f_z \cdot z} \cdot l = \frac{l_o}{f_n} \cdot l$$

***l* – délka záběru jednoho zubu (při výpočtu uvažujeme kruhový oblouk)**
ψ – úhel záběru ($\psi = \psi_2 - \psi_1$)
***lo* – délka obrobku (dílce) (mm)**
***fn* – posuv na jednu otáčku kotouče (minutový posuv) (mm)**

Měrný řezný odpor pro podélné řezání s makrotřískou h > 0,1 mm

a) pěchované zuby

$$k_c = k^1_{>0,1} + \frac{a_\rho \cdot p}{h} + \frac{\xi \cdot e}{b} \qquad (daN.mm^{-2})$$

b) rozvedené zuby:

$$k_c = k^1_{>0,1} + \frac{a_\rho \cdot p}{h \cdot \frac{b}{s_1}} + \frac{\xi \cdot e}{b} \qquad (daN.mm^{-2})$$

$k^1_{>0,1}$ … základní měrný řezný odpor pro „makrotřísku“ h>0,1mm
h … tloušťka třísky
s_1 … tloušťka těla pilového listu, kotouče, pásu
ξ … jednotkový měrný řezný odpor potřebný k překonání tření bočního ostří (nástroje) v řezné spáře, současně je zde zahrnut způsob úpravy řezné části nástroje (např. zuby rozvedené ξ = 0,02 daN/mm^2, zuby pěchované, stelitované nebo ze slinutých karbidů ξ = 0,015 daN/mm^2

Měrný řezný odpor pro podélné řezání s mikrotřískou h < 0,1 mm

a) pěchované zuby:

$$k_c = k^1_{<0,1} + k^{\rho}_{<0,1} + k^{\xi}_{<0,1} = k^1_{<0,1} + \frac{(a_\rho - 0{,}8)\cdot p}{h} + \frac{\xi \cdot e}{b} \qquad (daN.mm^{-2})$$

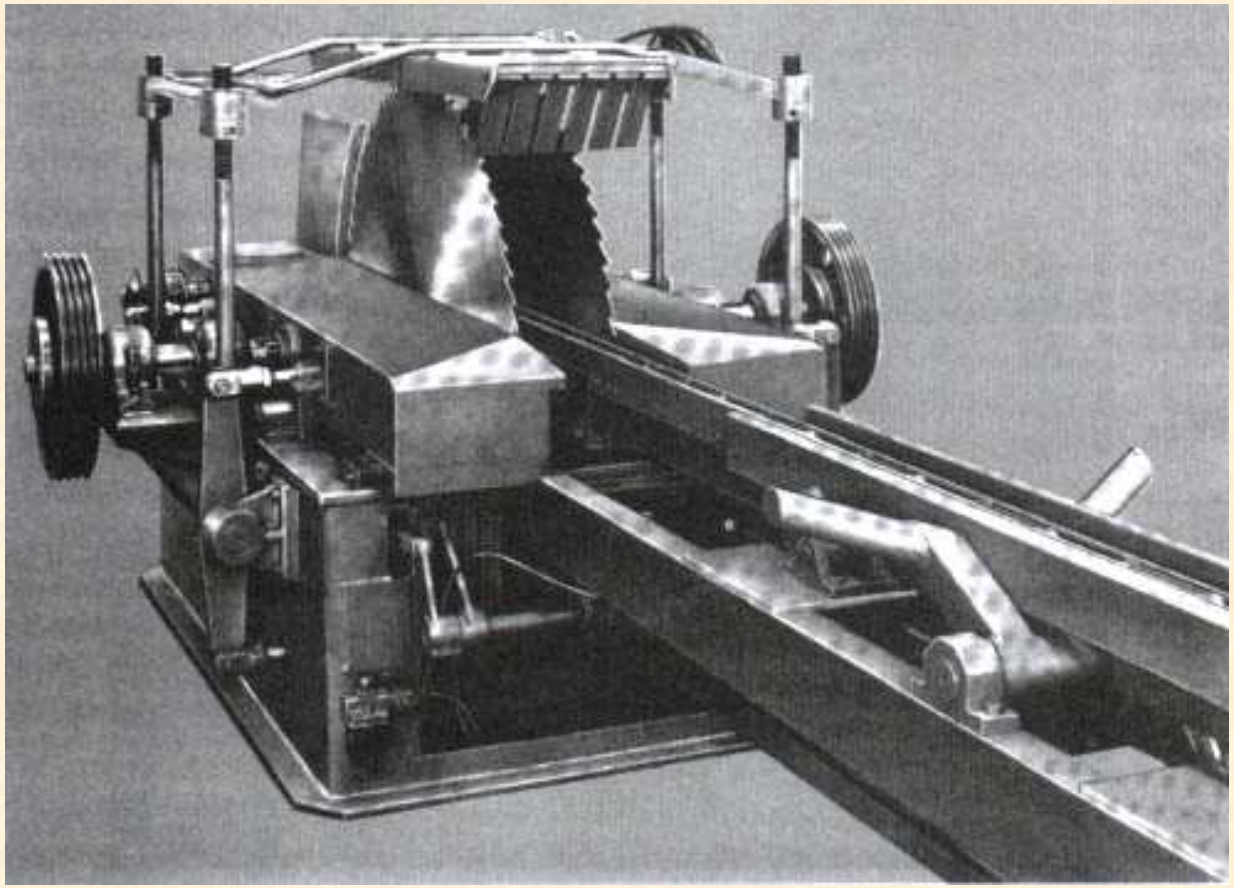
b) rozvedené zuby:

$$k_c = k^1_{<0,1} + \frac{(a_\rho - 0{,}8)\cdot p}{h_{str} \cdot \frac{b}{s_1}} + \frac{\xi \cdot e}{b} \qquad (daN.mm^{-2})$$

$k^1_{<0,1}$ … základní měrný řezný odpor pro „mikrotřísku“ h<0,1mm
a_ρ … koeficient otupení ostří
h … tloušťka třísky
s_1 … tloušťka těla pilového listu (kotouče, pásu)
ξ … jednotkový měrný řezný odpor potřebný k překonání tření bočního ostří (nástroje) v řezné spáře, současně je zde zahrnut způsob úpravy řezné části nástroje (např. zuby rozvedené ξ = 0,02 daN/mm^2, zuby pěchované, stelitované nebo ze slinutých karbidů ξ = 0,015 daN/mm^2

Dynamické prvky u kotoučové pily

Kmenová dvoukotoučová pila



Parní válec a kmenová pila
http://www.youtube.com/watch?v=Lq5wpVzaD6s&feature=related
http://www.stream.cz/uservideo/95160-porez-kulatiny

Technicko-technologické parametry jsou limitovány konstrukcí stroje:

průměr pilového kotouče –
600 až 1300 mm

střední řezná rychlost
v_c *do 40* $m \cdot s^{-1}$

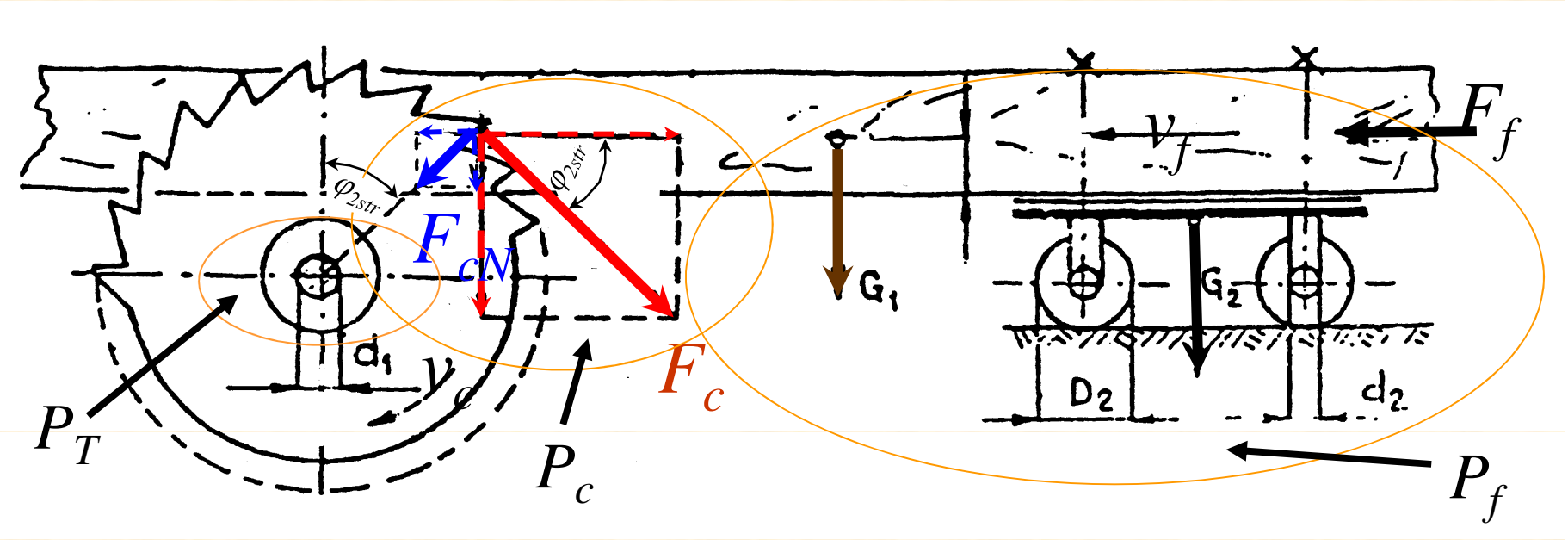
podávací rychlost
v_f *do 100* $m \cdot min^{-1}$

průměr výřezů
12 až 60 cm

délka výřezů
$L = 1$ *až 9 m*

šířka řezné spáry
$b = 4{,}5 \div 6{,}5$ *mm*

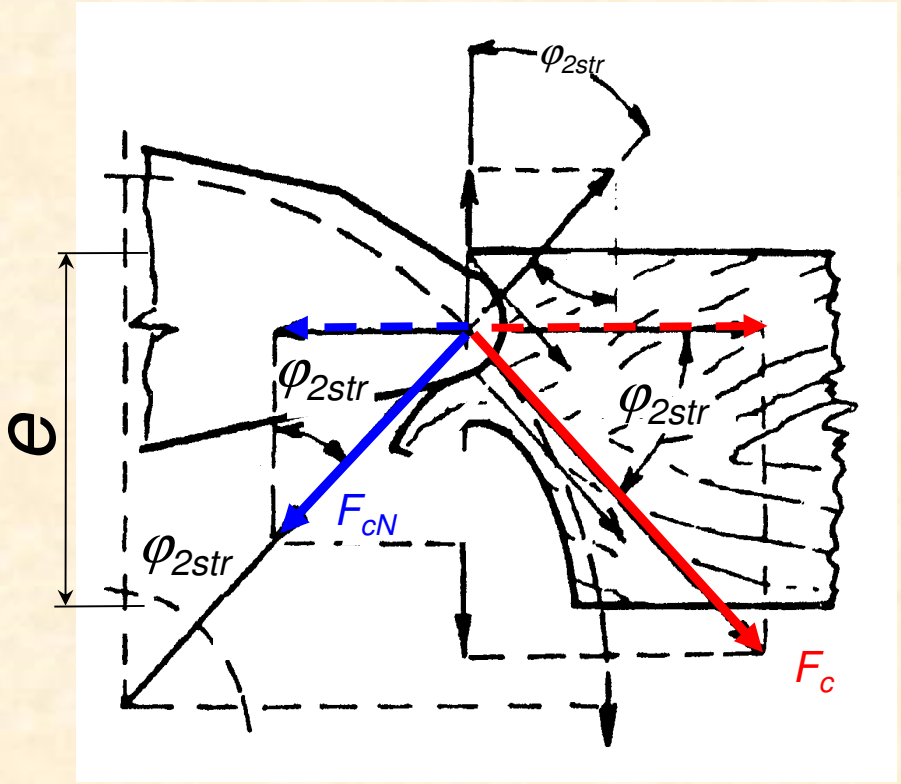
Instalovaný příkon pohonu



$$P = \frac{\sum P_i}{\eta} = \frac{P_T + P_c + P_f}{\eta} \quad [W]$$

kde η … účinnost převodů mezi motorem a mechanismy pily

Řezná síla a výkon



$$F_c = k_c \cdot b \cdot h$$

Řezání pilovým kotoučem je řezání ve spáře, jedná se o složité řezání,

$$F_c = k_c \cdot b \cdot e \cdot \frac{v_f}{v_c}$$

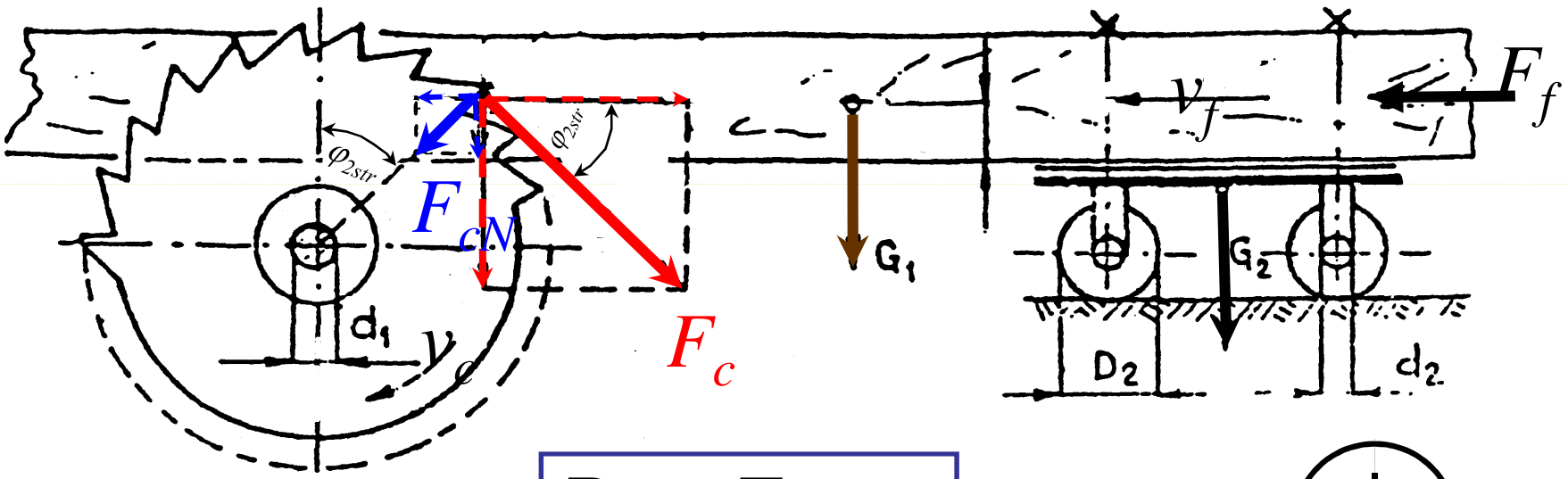
zniká s nerovnoměrnou

a pro řezný výkon v

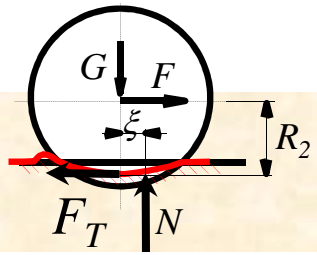
$$P_c = F_c \cdot v_c = k_c \cdot b \cdot e \cdot v_f$$

a proto je vhodnější

Výkon potřebný na podávání obrobku do řezu



$$P_f = F_f \cdot v_f \quad [W]$$



Podávací síla F_f:

$$\Sigma F_x = 0$$

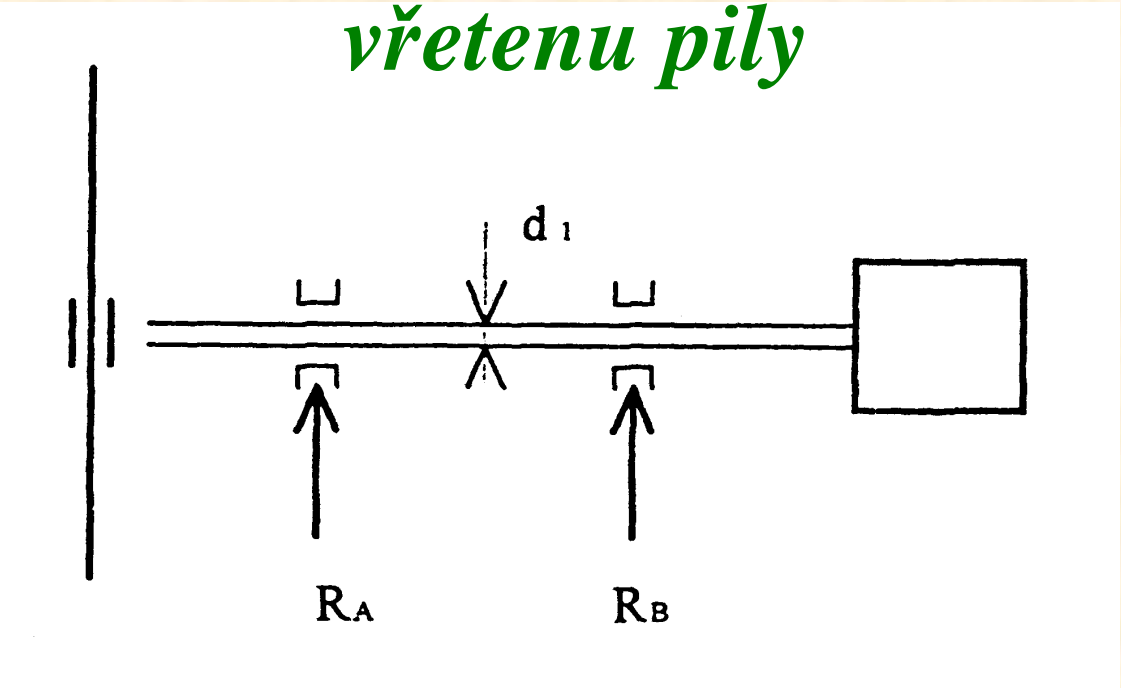
$$F_f = F_c \cdot \cos\varphi_{2str} - F_{cN} \cdot \sin\varphi_{2str} + \left(F_c \cdot \sin\varphi_{2str} + F_{cN} \cdot \cos\varphi_{2str} + G_1 + G_2\right) \cdot \left(f_č + \mu_v\right)$$

kde $f_č$ … součinitel čepového tření v nábojích kol (0,15 až 0,20)

μ_v … součinitel valivého tření - $\mu_v = \xi/R_2$ (ξ poloměr ramene valivého odporu 0,01 až 0,05 mm)

F_{cN} … normálová složka řezné síly $F_{cN} = \kappa Fc$ (koeficient κ = (0,3 až 1,2) pro praktické výpočty se obvykle volí κ=1)

Výkon potřebný na překonání tření ve vřetenu pily



$$P_T = \left(R_A + R_B\right) \cdot \mu \cdot \left(\pi d_1 \cdot n\right) \quad [W]$$

kde

d_1 … průměr hřídele v místě uložení
n … otáčky pily
R_A, R_B … reakce v místě uložení
μ … koeficient tření v ložiskách (0,03 – 0,06 pro kluzná ložiska, 0,002 – 0,004 pro valivá ložiska)

m40

Děkuji za pozornost

m40 After implementation of the experiment and comparison of theoretical methods with measured values it is possible to conclude that the analytical method approached most to the reality.

myself; 05.05.2003