

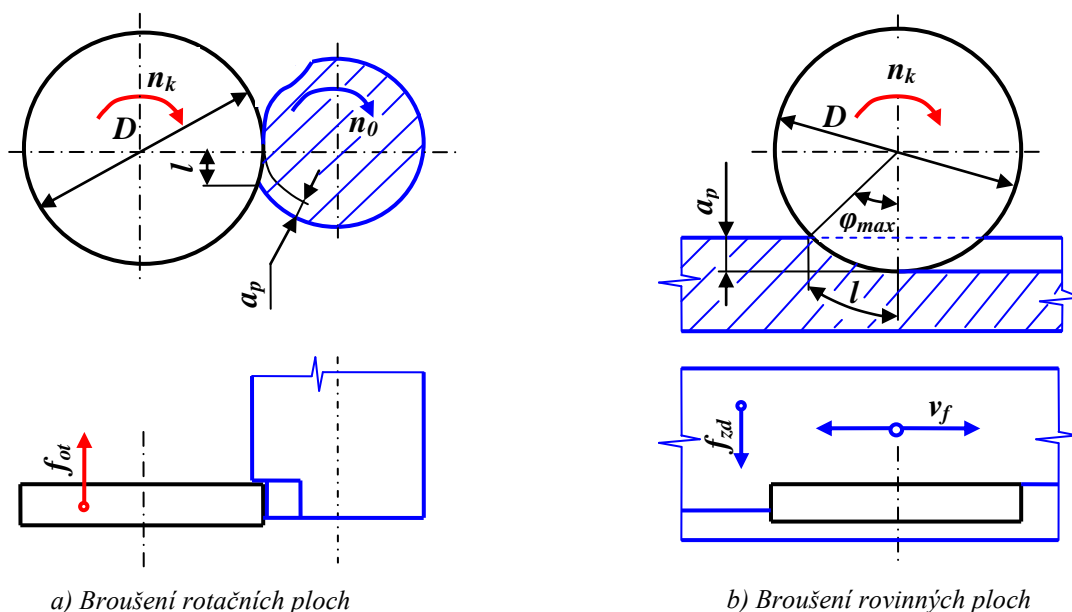
# Broušení

je nejčastěji používanou dokončovací operací s ohledem geometrickou i rozměrovou přesností a drsností povrchu. Příkladový přídavek na opracování bývá podle velikosti obrobku a s ohledem na použitou předchozí metodu obrábění – většinou pro běžné strojní součásti kolem 0,3 [mm].

## 1.1.1 Charakteristika výrobní metody

Při broušení se materiál z obrobku odebrává tvrdými zrnky brusiva brousícího kotouče při řezných rychlostech (30 až 80) [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]. Brusný kotouč si lze představit jako mnohobřitový nástroj, takže k úběru materiálu dochází analogicky jako u frézování, avšak průřez třísky je podstatně menší asi (0,000 1 až 0,002) [ $\text{mm}^2$ ]. S ohledem na tvar broušených ploch rozlišujeme dva základní způsoby broušení:

- Broušení rotačních ploch** - brousící kotouč se otáčí obvodovou rychlostí  $v_k$  a obrobek v opačném smyslu rychlostí  $v_o$ . Brousící kotouč se navíc posouvá posuvem na otáčku obrobku  $f_{ot}$ , takže výsledný pohyb má tvar šroubovice – analogicky jako při podélném soustružení.
- Rovinné broušení** - brousící kotouč se otáčí rychlostí  $v_k$ , stůl s obrobkem koná přímočarý vratný pohyb rychlostí posuvu stolu  $v_f$ . Obrobek se navíc posune v úvrtí stolu posuvem na zdvih  $f_{zd}$ .



Legenda:

$a_p$  ..... hloubka řezu ;  $f_{ot}$  ..... posuv kotouče na otáčku obrobku;  $f_{zd}$  ..... posuv obrobku na zdvih;  
 $l$  ..... délka styčné plochy;  $n_o$  ..... otáčky obrobku;  $n_k$  ..... otáčky kotouče;  $v_f$  ..... posuvová rychlost obrobku;  
 $D$  ..... průměr brousícího kotouče;  $\varphi_{max}$  ..... úhel krajního styku s obrobkem

### 1.1.2 Brusky

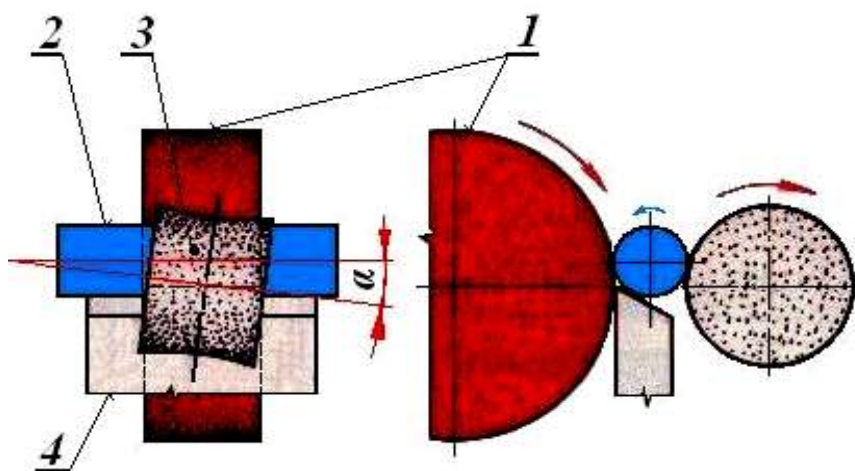
Hlavním požadavkem je přesné uložení vřetena, klidný chod – bez rázů a chvění a to všech pohyblivých částí stroje. Hydrostatická ložiska umožňují vysokou přesnost v rozsahu otáček (2 000 až 100 000) [ $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ].

Podle způsobu ubírání materiálu je dělíme na:

- a) **Brusky pro postupný úběr materiálu** - mnoha třískami, přičemž pracují velkým posuvem a malým přísuvem.
- b) **Brusky pro silové broušení** - velkým, většinou radiálním posuvem se bere celý přídavek (profil) najednou. Proto jde o tzv. silové resp. profilové broušení.

#### 1.1.2.1 Druhy brusek a jejich použití

- a) **Hrotové brusky** - používají se k broušení vnějších rotačních – válcových i kuželových ploch na obrocích upnutých mezi hroty. Charakteristickými rozměry jsou oběžný průměr obrobku nad ložem a největší vzdálenost mezi hroty. Stávají se z *lože, brousícího vřeteníku, unášecího vřeteníku, stolu, koníku a příslušenství*. Vyrábějí se ve dvou provedeních:
  - **hrotové brusky s posuvným unášecím vřeteníkem** - vřeteník a koník s obrobkem jsou uchyceny na pracovním stole, který vykonává posuv a brousící kotouč se otáčí a radiálně přísouvá k obrobku.
  - **hrotové brusky s posuvným brousícím vřeteníkem** - jsou vhodné pro broušení rozměrných obrobků s velkou hmotností. Obrobek se pouze otáčí a všechny ostatní pohyby vykonává brousící vřeteník.
- b) **Bezhruté brusky** - mají vřeteník brousícího kotouče otáčející se konstantními otáčkami a radiálně posuvný vřeteník podávacího kotouče s měnitelnými otáčkami, takže vzdálenost obou kotoučů lze nastavit podle průměru obrobku. Tento vřeteník se natáčí tak, aby osy obrobku a kotouče byly mimoběžné a dosáhlo se tak axiálního posuvu obrobku.



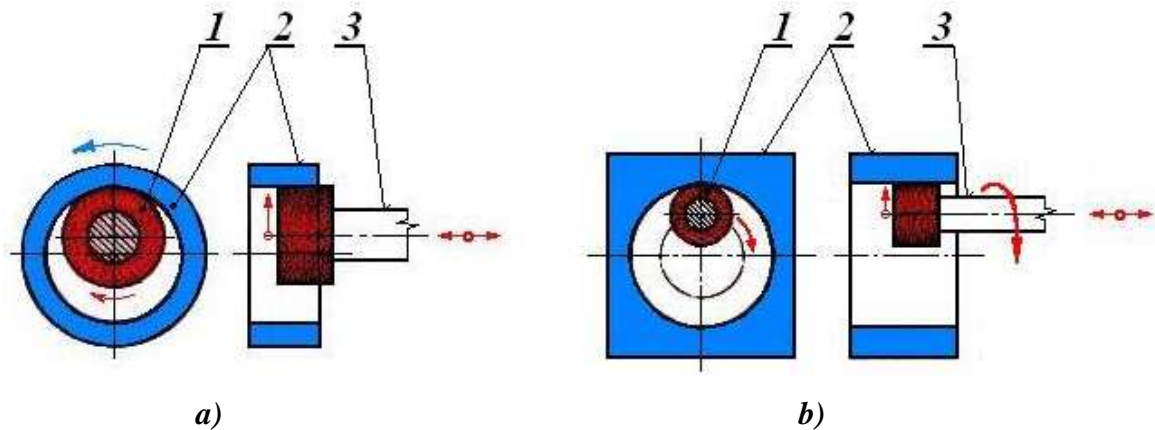
Legenda:

1 – brousící kotouč; 2 – obrobek; 3 – podávací kotouč; 4 – vodící lišta;

Obr. 314 Schéma bezhruté broušení

c) **Brusky na díry** - opět se vyskytují dvě provedení:

- **stroje s otáčejícím se obrobkem** - vhodné pro broušení velkých obrobků a děr souosých s vnějším povrchem.
- **stroje s planetovým pohybem brousícího kotouče** - slouží k broušení děr součástí skříňového tvaru.



Legenda:

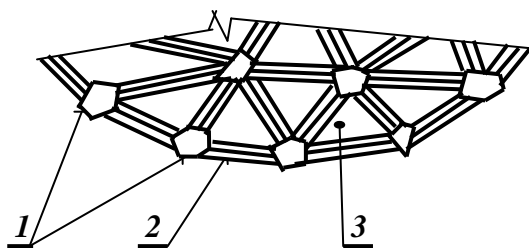
1 – brousící kotouč; 2 – obrobek – rotačního resp. skříňového tvaru; 3 – brousící vřeteno vykonávající současně rotační i posuvný pohyb a přísuv, resp. planetový pohyb

Obr. 315 Schéma broušení děr

- d) **Rovinné brusky** – **vodorovné nebo svislé** - pracují většinou čelem např. segmentového brousícího kotouče s průměrem větším než je šířka obrobku. Jsou velmi výkonné.  
 - **na broušení vodících ploch** - většinou dvoustojanové s upínacím stolem a mají také dva brousící vřeteníky.
- e) **Nástrojové brusky** - **univerzální ostříčky nástrojů** - na ostření fréz, závitníků, nožů apod.  
 - **automatické ostříčky nástrojů** - jsou řízené číslicově.
- f) **Speciální brusky** - např. kopírovací tvarové brusky, podbrušovací brusky – na broušení fréz a odvalovacích fréz na výrobu ozubení, brusky na závity a planetové brusky na broušení středících důlků.

### 1.1.3 Brusné nástroje

jsou tvořeny zrny **brusiva** spojovaných **pojivy** v tuhé těleso vhodného **tvaru, tvrdosti a struktury (slohu)**.



Legenda:

1 – brusná zrna  
 2 – spojovací můstky (pojivo)  
 3 - póry

Obr. 316 Struktura brusného nástroje

**Brusivo** - používají se v podstatě dva druhy:

- a) *tavený  $Al_2O_3$  - umělý korund*
- b) *karbid křemíku ( $SiC$ ) - karborundum*

**Brusivo** se posuzuje podle velikosti částic – zrna – tzv. **zrnitosti** a to v rozmezí (3 až 600) [ $\mu m$ ].

Platí zásada – pro velké styčné plochy mezi kotoučem a obrobkem a pro velké řezné rychlosti – volíme **hrubé zrno**. Čím větší zahřátí obrobku je přípustné – např. kalená ocel – volíme naopak **zrno jemnější**.

Mírou odolnosti zrn brusiva proti vydrolování je dána **tvrdost kotouče** – značí se písmeny **G** – velmi měkký, ....., **Z** – tvrdý.

Platí zásada - čím tvrdší broušený materiál, tím měkčí brousící kotouč a naopak.

**Struktura (sloh) brousícího kotouče** - určuje kvantitativní poměr objemu brusiva, pojiva a pórů. Označuje se čísly 1 až 13.

Platí zásada - čím vyšší číslo, tím větší jsou póry v kotouči, který je tak méně hutný.

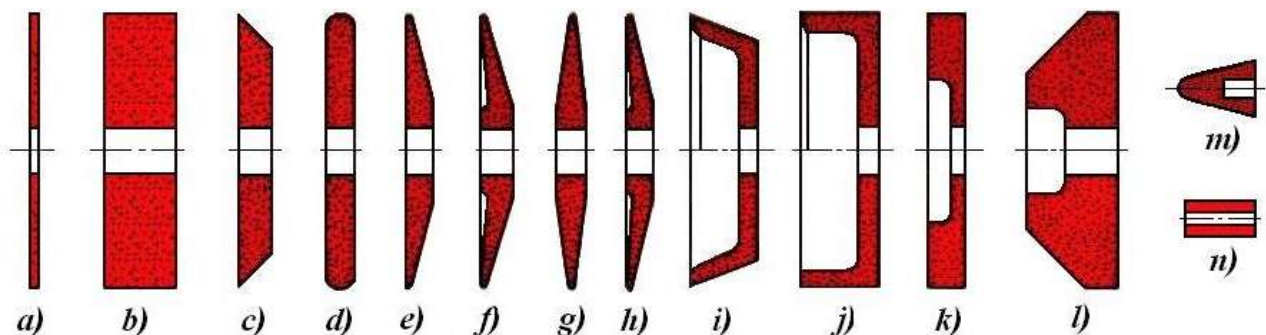
**Pojivo** - spojuje vzájemně zrna brusiva. Jeho druh určuje pevnost kotouče a tím i jeho dovolenou obvodovou rychlost. Například: **V** - označuje *keramické pojivo* – dovoluje obvodovou rychlost (30 až 80) [ $m \cdot s^{-1}$ ]. *Kovová pojiva* pro diamantové kotouče a *pryžová pojiva* pro úzké řezací kotouče umožňují obvodové rychlosti až do 80 [ $m \cdot s^{-1}$ ].

**Tvary brousících kotoučů** - jsou normalizovány, ukázky nejpoužívanějších viz *obr. 315*.

Abychom dosáhli jakostního povrchu orovnáváme kotouče diamantovými orovnávači. Kolečkovými orovnávači dosáhneme u kotoučů větších hospodárných úběrů. Orovnávači se odstraní otupená brusná zrna.

**Upínání brousících kotoučů** – většinou se provádí na vřetení brusky dvěma přírubami, jimiž jsou čelně sevřeny a unášeny – viz *obr. 316*.

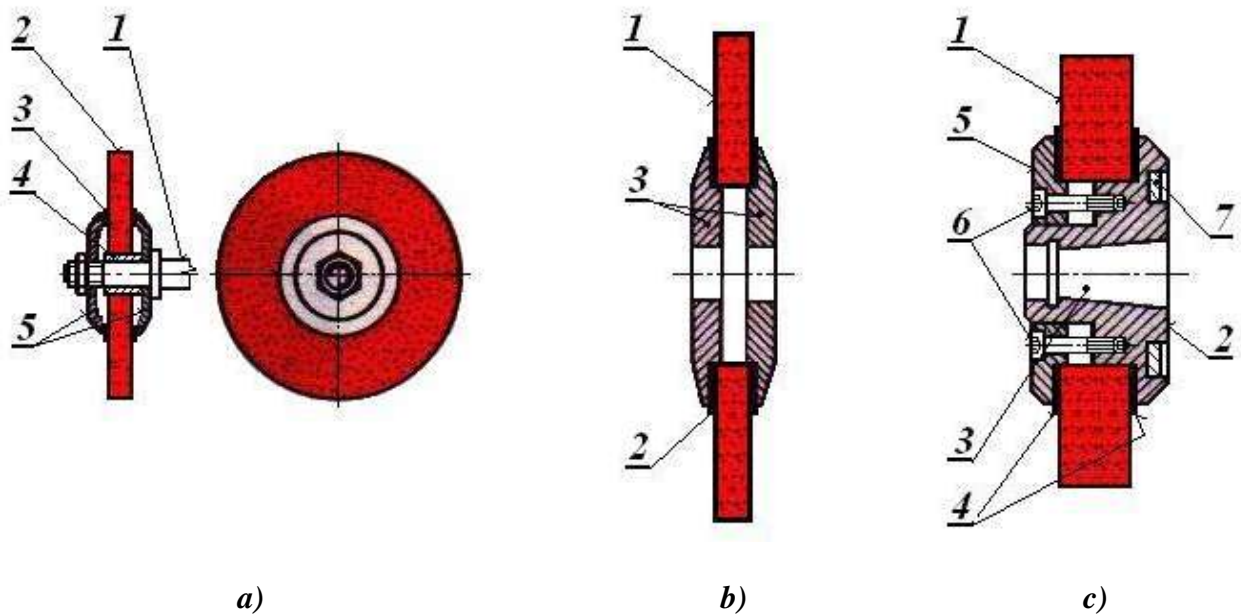
Diamantové brousící kotouče a kotouče z kubického nitridu bóru - mají nosné těleso a brousící vrstvu. Pojivo mají většinou kovové (bronz), organické (bakelit), pryžové – vhodné pro leštění a pryskyřičné – pro boronitové kotouče. Obecně diamantové kotouče jsou určeny pro broušení nástrojů z nástrojových a rychlořezných ocelí a k lapování nástrojů ze slinutých karbidů. Nejsou vhodné pro velké úběry.



Legenda:

- a) plochý úzký (řezací); b) plochý široký; c) kuželový jednostranný; d) plochý oblý; e) jednostranně kuželový; f) talířový; g) oboustranně kuželový; h) talířový na broušení ozubení; i) miskový; j) hrncový; k) plochý s jednostranným vybráním; l) kuželový s jednostranným vybráním; m) kuželové zaoblené brousící těleso; n) válcové brousící těleso

Obr. 317 Tvary brousících kotoučů



Legenda:

- a) Upevnění brousícího kotouče s malým otvorem: 1 – vřeteno brusky; 2 – brousící kotouč; 3 – pružná vložka; 4 – olověná vložka; 5 – ocelové příruby
- b) Upevnění brousícího kotouče s velkým otvorem: 1 – brousící kotouč; 2 – pružná vložka; 3 – ocelové příruby;
- c) Upevnění brousícího kotouče velké hmotnosti: 1 – brousící kotouč; 2 – příruba s kuzelem; 3 – středící kužel; 4 – pružné vložky; 5 – plochá příruba; 6 – spojovací šrouby; 7 – vyvažovací tělíška

Obr. 318 Upevnění brousícího kotouče na vřetenu brusky

**Označování brousících kotoučů** – je normalizované (ČSN 22 4501), uvádí se na brousícím kotouči, čímž jsou dány jeho parametry. Například:

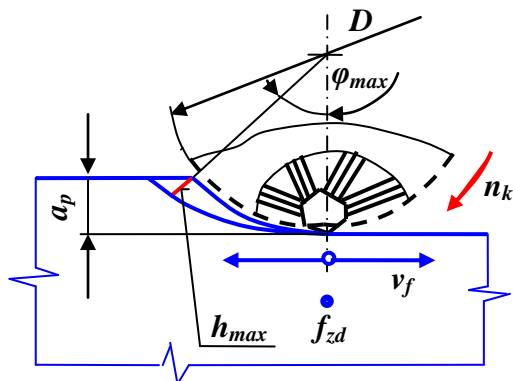
*300 x 40 x 127 A 99 60 K 9V*,

- kde 300 - průměr kotouče; 40 - šířka kotouče; 127 - průměr díry  
 A 99 - materiál brousícího kotouče (brusivo) – bílý  $Al_2O_3$   
 60 - zrnitost - střední  
 K - stupeň tvrdosti – měkký  
 9 - struktura (sloh, pórovitost) – velmi pórovitý  
 V - druh pojiva – keramické

Výše uvedený brousící kotouč je vhodný k broušení nástrojové legované kalené oceli. Větší podrobnosti ohledně jednotlivých parametrů brousících kotoučů a doporučení k jejich použití jsou uvedeny ve strojnických tabulkách.

### 1.1.4 Řezné podmínky při broušení

#### a) Rovinné broušení



$n_k$  .... otáčky brousícího kotouče [ $1 \cdot \text{min}^{-1}$ ];  
 $v_k$  .... řezná rychlost je největší obvodová rychlost na největším průměru brousícího kotouče [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$$v_k = \frac{\pi D n_k}{60 \cdot 1000};$$

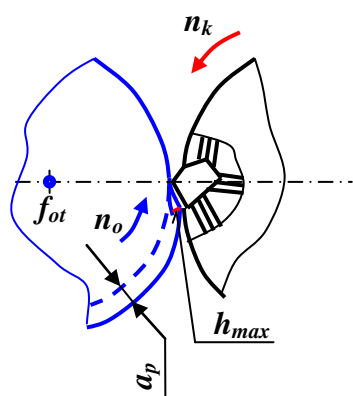
$D$  .... průměr brousícího kotouče [mm];  
 $v_f$  .... posuvová rychlost stolu [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ];  
 $f_{zd}$  .... příčný posuv v úvratích stolu [ $\text{mm} \cdot \text{zd}^{-1}$ ];  
 $h_{max}$  .... maximální tloušťka třísky [mm];  
 $\varphi_{max}$  .... úhel krajního styku [ $^\circ$ ];  
 $a_p$  .... hloubka řezu [mm]

Obr. 319 Parametry při rovinném broušení

Důležitým parametrem, jak dále uvidíme, je **střední průřez odebíraného materiálu**:

$$A_s = \frac{v_f \cdot \varphi_{max}}{360 \cdot n_k} \cdot \sqrt{\frac{a_p}{D}} \cdot f_{zd} \quad [\text{mm}^2]$$

#### b) Broušení do kulata



$n_k$  .... otáčky brousícího kotouče [ $1 \cdot \text{min}^{-1}$ ];  
 $v_k$  .... řezná rychlost je největší obvodová rychlost na největším průměru brousícího kotouče [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$$v_k = \frac{\pi D n_k}{60 \cdot 1000};$$

$D$  .... průměr brousícího kotouče [mm];  
 $n_o$  .... otáčky obrobku [ $1 \cdot \text{min}^{-1}$ ];  
 $v_o$  .... obvodová rychlost obrobku [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ];  
 $f_{ot}$  .... relativní posuv obrobku na jeho jednu otáčku vůči brousícímu kotouči [ $\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}$ ];  $f_{ot} = (0,3 \text{ až } 0,7) B$  - hrubování

$$f_{ot} = (0,3 \text{ až } 0,7) B \text{ - na čisto}$$

$B$  .... šířka brousícího kotouče [mm]

$h_{max}$  .... maximální tloušťka třísky [mm];

$a_p$  .... hloubka řezu [mm].

Obr. 320 Parametry při broušení do kulata



### Střední průřez odebíraného materiálu při broušení do kulata:

$$A_s = \frac{v_o}{60 v_k} \cdot a_p \cdot f_{ot} \quad [\text{mm}^2]$$

#### 1.1.5 Řezná síla a výkon elektromotoru při broušení

Oba výše uvedené parametry určíme při broušení obdobným způsobem jako u jiných metod obrábění:

$$F_z = A_s \cdot p; \quad p = \frac{15\,000}{a_p^{0,47} \cdot f_{ot}^{0,47}} \quad \dots \text{ měrný řezný odpor, který je mnohonásobně}$$

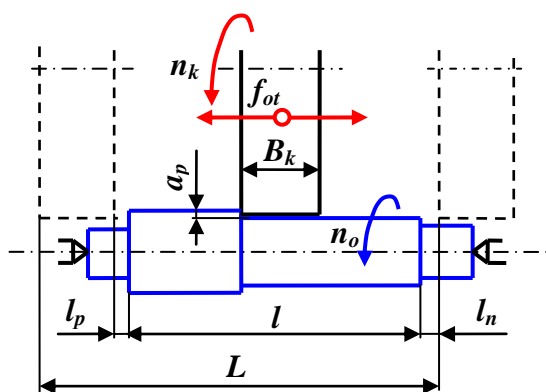
větší jak u jiných metod obrábění, např.:  
 pro ocel  $p = (15\,000 \text{ až } 30\,000) \text{ [MPa]}$ ,  
 pro litinu  $p = (7\,000 \text{ až } 15\,000) \text{ [MPa]}$ .

$$P_e = \frac{F_z \cdot v_k}{1\,000 \cdot \eta} \quad [\text{kW}]$$

#### 1.1.6 Produktivita při broušení

pro její posouzení je třeba stanovit **strojní časy** pro jednotlivé způsoby broušení a to pro *broušení válcových ploch*, pro *broušení rovinné obvodem kotouče* a pro *broušení rovinné čelem kotouče*. Základem je vždy vyjádření **délky dráhy nástroje** pro výše uvedené způsoby broušení.

##### a) Strojní čas při broušení válcových ploch



$a_p$  .... hloubka řezu [mm];  
 $f_{ot}$  .... posuv brusného kotouče na jednu otáčku obrobku [mm . ot];  
 $l$  .... broušená délka [mm];  
 $l_n$  .... náběh nástroje [mm];  
 $l_p$  .... přeběh nástroje [mm];  
 $n_k$  .... otáčky brousícího kotouče [ot . min<sup>-1</sup>];  
 $n_o$  .... otáčky obrobku [ot . min<sup>-1</sup>];  
 $B_k$  .... šířka brousícího kotouče [mm];  
 $L$  .... délka dráhy nástroje vzhledem k obrobku [mm].

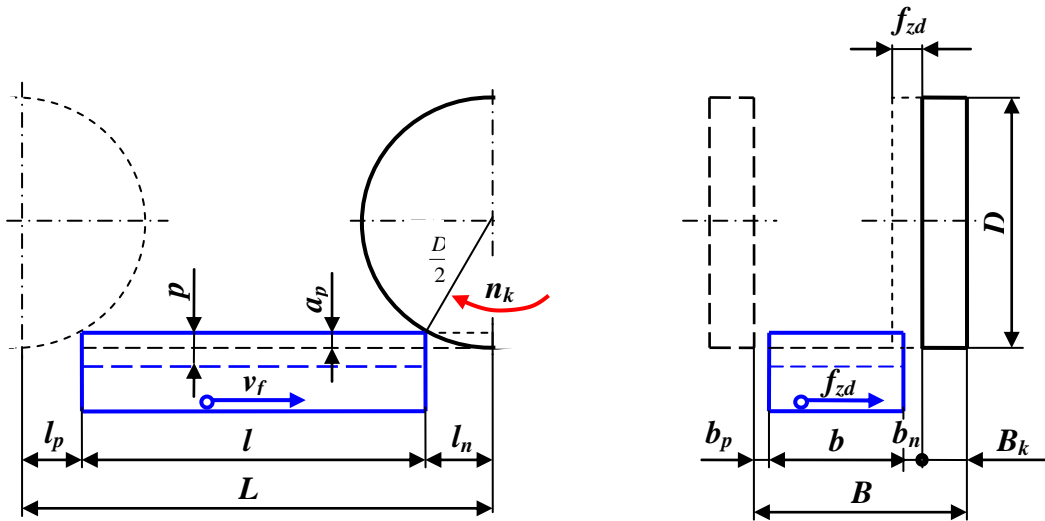
Obr. 321 Dráha nástroje při broušení válcových ploch

**Strojní čas:**  $t_s = \frac{2L}{f_{ot} \cdot n_o} \cdot i \quad [\text{min}],$

$$L = l_n + l + l_p + B_k \quad [\text{mm}]; \quad i = \frac{p}{a_p} \quad \dots \text{ počet třísek (záběrů);}$$

$$\frac{p}{2} \quad \dots \text{ jednostranný přídavek na broušení [mm].}$$

b) Strojní čas při rovinném broušení obvodem kotouče



Legenda:

$a_p$  ... hloubka řezu;  $b$  ... šířka obrobku;  $b_n$  ... boční náběh;  $b_p$  ... boční přeběh;  $f_{zd}$  ... boční posuv stolu na zdvih [mm · zd<sup>-1</sup>];  $l$  ... délka obrobku;  $l_n$  ... náběh;  $l_p$  ... přeběh;  $n_k$  ... otáčky brousícího kotouče;  $p$  ... přídavek na broušení;  $v_f$  ... posuvová rychlost stolu [mm · min<sup>-1</sup>];  $B$  ... dráha nástroje v příčném směru;  $B_k$  ... šířka brousícího kotouče;  $D$  ... průměr brousícího kotouče;  $L$  ... dráha nástroje vzhledem k obrobku v podélném směru.

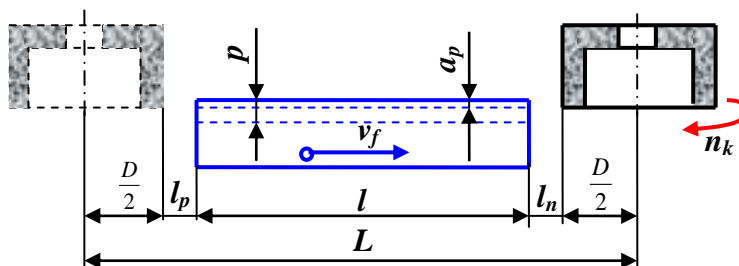
Obr. 332 Dráha nástroje při rovinném broušení obvodem kotouče

**Strojní čas:**  $t_s = \frac{2L}{v_f} \cdot \frac{B}{f_{zd}} \cdot i$  [min], kde

$$L = l_n + l + l_p \quad [\text{mm}], \quad \text{přičemž } l_n \geq \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - a_p\right)^2}, \quad l_p \approx 5 \quad [\text{mm}]$$

$$i \dots \text{počet záběrů} \quad i = \frac{p}{a_p}$$

c) Strojní čas při rovinném broušení čelem kotouče



Legenda: viz obr. 332

Obr. 333 Dráha nástroje při rovinném broušení čelem kotouče

**Strojní čas:**  $t_s = \frac{2L}{v_f} \cdot i$  [min], kde



$$L = l_n + l + l_p \quad [\text{mm}] \quad - \text{ při hrubém broušení,}$$

$$L = l_n + l + l_p + D \quad [\text{mm}] \quad - \text{ při broušení na čisto,}$$

$$i \dots \text{ počet záběrů} \quad i = \frac{p}{a_p}$$

Nutno podotknout, že v tomto případě bývá šířka obrobku:  $b \leq 0,7 \cdot D$ .

### 1.1.7 Dosahované parametry při broušení

Přesnost rozměru a drsnost povrchu při broušení je ovlivněna mnoha činiteli. Vyšší kvality dosáhneme především:

- jemnou zrnitostí brousícího kotouče,
- vyšší obvodovou rychlostí brousícího kotouče a nižší obvodovou rychlostí obrobku,
- menší hloubkou broušení,
- menším podélným posuvem při broušení mezi hroty a menším posuvem na zdvih při rovinném broušení.

*Tab. 31 Dosahovaná přesnost rozměrů a drsnost povrchu při broušení*

Způsob práce	Přesnost IT	Drsnost povrchu Ra [μm]
<i>Hrubování – čelem kotouče</i>	9 až 11	0,8 až 6,3
<i>Hrubování – obvodem kotouče</i>	9 až 11	0,8 až 3,2
<i>Na čisto - čelem kotouče</i>	5 až 7	0,2 až 1,6
<i>Na čisto - obvodem kotouče</i>	5 až 7	0,2 až 0,8
<i>Jemné broušení</i>	3 až 4	0,05 až 0,4