

Analýza dynamických jevů při broušení se zaměřením na vysoce pórovité brousící kotouče

Adam Baselides

Bakalářská práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Adam BASELIDES**
Osobní číslo: **T08580**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Analýza dynamických jevů při broušení se zaměřením na vysoce pórovité brousící kotouče**

Zásady pro vypracování:

- 1) Přehled současného stavu aplikace brousících procesů**
- 2) Teoretická analýza procesu broušení**
- 3) Vymezení základních veličin při broušení**
- 4) Kvantifikace řezných sil, výkonu a měrné energie broušení**
- 5) Zpracování získaných výsledků analyticky a graficky**
- 6) Výsledky a vyhodnocení zjištěných parametrů.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] KOCMAN, K. – PROKOP, J.: Technologie obrábění. Akademické nakladatelství CERM, 1. vyd., s. 270, Brno, 2001

[2] KOCMAN, K. a kol.: Aktuální příručka pro technický úsek. Verlag Dashöfer, 16. aktualizované vydání, s. 4250, Praha, 2001, ISBN 80-902247-2-5

[3] Metals Handbook Volume 16, Machining. Edit Joseph R. Davis. 1 ed London, 1997, ISBN 0-02-328621-0

[4] KOCMAN, K. – Zemčík, O.: Analýza termodynamických jevů při broušení. 9th International Conference New wals in manufacturing technologies 2008, June 19 – 21, 2008, s. 211 – 215, Prešov, Technical University of Košice, SR, ISBN 978-80-553-0044-3.

[5] KOCMAN, K. – Zemčík, O.: Thermodynamic Effekt when Grinding. In Manufacturing Technology, Slovaca Košice, Journalů for science, research and production. 2007, vol.7, s. 23 – 26. ISSN 1213 – 2489

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **14. února 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2011**

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně30.5.2011

.....
Baselides

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odporá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Ve své práci se zaměřuji na dynamické jevy při broušení u vysoce pórovitých kotoučů. Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí. V teoretické části se zabývám všeobecným broušením a základními veličinami. Druhá část obsahuje analýzu dynamických jevů u vysoce pórovitých kotoučů.

Klíčová slova:

Broušení, povrch, síla a rychlost

ABSTRACT

In my thesis work I focus on dynamic phenomenon in the highly porous grinding wheels. The thesis is divided into two parts. The theoretical part engages in grinding and basic values in general. The second part contains an analysis of dynamic phenomenon in highly porous discs.

Keywords:

Grinding, surface, power and speed

Chtěl bych poděkovat panu prof. Ing. Karlovi Kocmanovi, DrSc. za pomoc, cenné poznámky, rady, čas a ochotu osvětit dané téma.

Motto:

„Vědět mnoho je nebezpečné, vědět málo také.“

Albert Einstein

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....

Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU APLIKACE BROUSÍCÍCH PROCESŮ	12
1.1 BĚŽNÉ BROUSÍCÍ PROCESY.....	12
1.2 POHYBY PŘI BROUŠENÍ	13
1.3 DOSAHOVANÉ PŘESNOSTI OBROBENÝCH PLOCH	15
2 TEORETICKÁ ANALÝZA PROCESU BROUŠENÍ	16
2.1 ZÁKLADNÍ METODY BROUŠENÍ	16
2.1.1 Axiální broušení do kulata	16
2.1.2 Hloubkové broušení	17
2.1.3 Radiální broušení	17
2.1.4 Broušení bezhroté.....	18
2.1.5 Zápichové broušení	20
2.2 BROUŠENÍ VNITŘNÍCH PLOCH DO KULATA	21
2.2.1 Broušení axiální	21
2.2.2 Bezhroté broušení.....	23
2.2.3 Planetové broušení	24
2.3 ROVINNÉ BROUŠENÍ.....	25
2.3.1 Broušení obvodové.....	25
2.3.2 Čelní broušení rovinné	26
2.4 DOKONČOVACÍ OBRÁBĚNÍ.....	27
2.4.1 Honování	28
2.4.2 Lapování.....	29
2.4.3 Superfinašování	29
3 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH VELIČIN PŘI BROUŠENÍ	31
3.1 ŘEZNÉ POHYBY	31
3.2 HLAVNÍ ŘEZNÝ POHYB A PŘÍSLUŠNÉ VELIČINY	32
3.3 MATERIÁLY BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ.....	34
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
4 KVANTIFIKACE ŘEZNÝCH SIL, VÝKONU A MĚRNÉ ENERGIE BROUŠENÍ	39
4.1 SÍLY A VZTAHY.....	39
4.2 ŘEZNÉ SÍLY	40
4.2.1 Řeznou sílu F_c je možné přibližně určit:	40
4.3 VÝKON A MĚRNÁ ENERGIE BROUŠENÍ.....	42
5 ZPRACOVÁNÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ ANALYTICKY A GRAFICKY	43

5.1	POUŽITÝ MATERIÁL OCEL 19 436	43
5.2	POUŽITÉ PŘÍSTROJE K EXPERIMENTÁLNÍMU MĚŘENÍ	44
	Bruska BRH 20.03F	44
	DYNAMOMETR	45
5.3	ZÍSKANÉ VÝSLEDKY ANALYTICKY	47
5.4	ZÍSKANÉ VÝSLEDKY GRAFICKY	49
6	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZJIŠTĚNÝCH PARAMETRŮ.....	51
	ZÁVĚR	52
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	53
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	54
	SEZNAM OBRÁZKŮ	57
	SEZNAM TABULEK.....	59
	SEZNAM PŘÍLOH.....	60

ÚVOD

Broušení už od nepaměti využíváme k obrábění kovů. V historii se setkáváme s broušením pomocí přírodních materiálů, které byly v dané době dostupné k úpravě nejen nástrojů a zbraní, ale také šperků.

Vývoj broušení si prošel mnohými etapami, ale nejvýznamnější rozkvět zažilo broušení na počátku 19. století, kde začala být důležitá hromadná a přesná výroba součástí.

Broušení je dokončovací operace, která se vyznačuje velmi vysokou přesností jak povrchu, tak geometrií a patří k významným technologiím této doby. Nástrojem při broušení je brousící kotouč. Brousící kotouč se vyznačuje tím, že má nerovnoměrně po obvodu brousícího kotouče rozmístěna zrna různých velikosti a tvarů, která jsou spojena pojivem. Zrna můžou být buď přírodní, nebo umělá. Brousící kotouče mají různé tvary a velikosti.

Broušení má velmi široké využití jak ve strojírenství, tak i v běžném životě. Spousta věcí, které se nacházejí v domácnostech, byly povrchově upraveny broušením. Ať už kuchyňský nůž nebo noha židle, tak i strojní součástky největších strojních zařízení, např. ložiska. Broušení se také využívá k ostření otupených nástrojů anebo může sloužit jako umělecká tvorba. Už v nejmenších součástech až po ty nejsložitější stroje, co v této době můžeme najít, se nacházejí broušené součásti.

Od broušení očekáváme zlepšení kvality ploch dané součásti. Při tomto způsobu obrábění, které patří k dokončovacím operacím, vzniká velmi vysoká teplota. Proto je často u broušení použita i chladicí kapalina.

Cílem mojí bakalářské práce bylo porovnat různé druhy pórovitosti kotoučů s přídkem sintrového korundu a zjistit, jak moc ovlivňuje pórovitost dynamické síly.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU APLIKACE BROUSÍCÍCH PROCESŮ

Broušení má využití zejména u obrábění součástí, které mají vysoké požadavky na přesnost daných rozměrů, tvarů, jakosti a povrchu. Broušení má především největší uplatnění pro obrábění materiálů, které jinou metodou nejdou obroubit, anebo je broušení hospodárnější než jiná vhodná metoda. Broušení nemusí být jen dokončovací operace, ale taky díky rozvoji výkonu brousících nástrojů a strojů může sloužit jako produkční obrábění. [1]

1.1 Běžné brousící procesy

Broušení probíhá různými metodami, které se volí podle nejvhodnějších kritérií. Tvar obrobku a jeho povrch určuje způsob, jak se bude vytvářet, způsoby vytváření se pak rozlišují na: [1]

- *Rovinné broušení* (rovinná plocha)
- *Broušení do kulata* (rotační povrch)
- *Broušení na otáčivém stole* (broušení probíhá s rotačním posuvem)
- *Tvarovací broušení* (na závity, ozubená kola apod.)
- *Kopírovací broušení* (NC stroje, mají řízenou změnu posuvu)
- *Broušení tvarovými brousícími kotouči* (brousící kotouč určuje konečný profil obrobku)

Podle aktivní části brousícího kotouče:

- *Obvodové broušení* (obvodový kotouč)
- *Čelní broušení* (čelem kotouče kolmým k jeho ose)

Podle vzájemné polohy brousícího kotouče a obrobku:

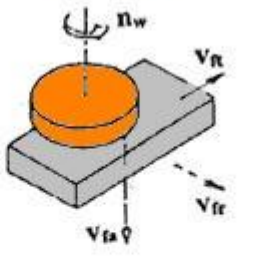
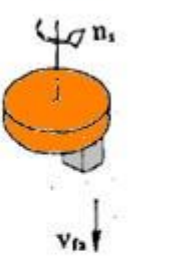
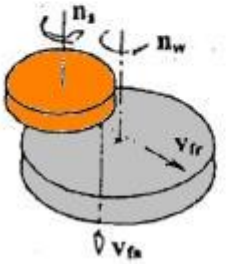
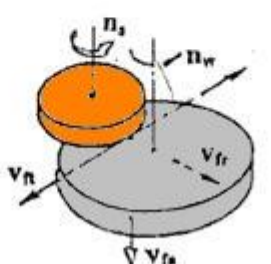
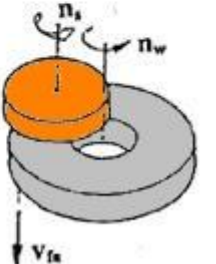
- *Vnější broušení* (vnější povrch obrobku)
- *Vnitřní broušení* (vnitřní povrch obrobku)

Podle hlavního pohybu posuvu stolu k broušícímu kotouči:

- **Axiální broušení** (hlavní pohyb stolu je rovnoběžný s osou kotouče)
- **Tangenciální broušení** (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě D)
- **Radiální broušení** (hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě D je radiální vzhledem ke kotouči)
- **Obvodové broušení** (posuv stolu je plynulý radiální)
- **Čelní vpichové broušení** (posuv stolu je plynulý axiální)

D - je hlavní bod při broušení [1]

1.2 Pohyby při broušení

		ČELNÍ BROUŠENÍ		
		Radiální	Tangenciální	Axiální
Rovinné – pohyb stolu	Přímočárý			
	Otáčivý			

Obrázek 1. Čelní broušení [3]

BROUŠENÍ OBVODOVÉ				
		Radiální	Tangenciální	Axiální
Rovinné – polyb stolů	Přímocárý			
	Otáčivý			
Do kulatá	Vnější			
	Vnitřní			

Obrázek 2. Broušení obvodové [3]

n_s	– frekvence otáčení brousícího kotouče	$[\text{ot} \cdot \text{s}^{-1}]$
n_w	– frekvence otáčení obrobku	$[\text{ot} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_{fa}	– axiální rychlost posuvu stolu	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
v_{fr}	– radiální rychlost posuvu stolu	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
v_{ft}	– tangenciální rychlost posuvu stolu	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$

1.3 Dosahované přesnosti obrobků ploch

Metoda obrábění		Přesnost rozměru IT		Drsnost plochy R _a [μm]	
		<i>střední</i>	<i>rozsah</i>	<i>střední</i>	<i>rozsah</i>
Vnější rotační plochy	Broušení				
	<i>hrubování</i>	10	9 až 11	1,6	0,8 až 3,2
	<i>dokončování</i>	5	5 až 6	0,4	0,2 až 0,6
	<i>jemné</i>	4	3 až 5	0,2	0,05 až 0,6
	Lapování				
	<i>normální</i>	4	3 až 4	0,1	0,05 až 0,2
	<i>jemné</i>	2	1 až 2	0,05	0,012 až 0,05
	Superfinišování				
	<i>dokončování</i>	4	3 až 5	0,2	0,05 až 0,4
	<i>jemné</i>	3	2 až 4	0,1	0,025 až 0,1
Vnitřní rotační plochy	Vnitřní broušení				
	<i>hrubování</i>	9	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	<i>dokončování</i>	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	<i>jemné</i>	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4
	Honování				
	<i>hrubování</i>	7	6 až 8	0,4	0,2 až 0,8
	<i>dokončování</i>	6	5 až 7	0,2	0,1 až 0,2
	<i>jemné</i>	4	3 až 5	0,1	0,05 až 0,1
	Lapování				
	<i>dokončování</i>	4	3 až 5	0,2	0,01 až 0,4
	<i>jemné</i>	3	1 až 3	0,05	0,012 až 0,05
Rovinné plochy	Broušení				
	<i>hrubování</i>	10	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	<i>dokončování</i>	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	<i>jemné</i>	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4
	Lapování				
	<i>dokončování</i>	4	3 až 5	0,2	0,1 až 0,4
	<i>jemné</i>	3	1 až 3	0,05	0,012 až 0,05

Tabulka 1. Abrasivní metody broušení [1]

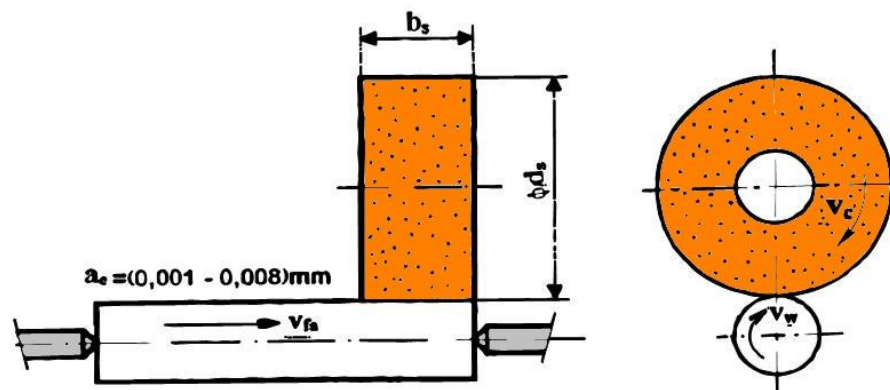
2 TEORETICKÁ ANALÝZA PROCESU BROUŠENÍ

2.1 Základní metody broušení

Ve strojírenské výrobě se používá řada metod broušení na standardních i číslicově řízených bruskách. Nejčastěji využívané metody jsou dále charakterizovány. [1]

2.1.1 Axiální broušení do kulata

Podélný posuv se používá u dlouhých součástí, kdy se obrobek otáčí mezi hroty a současně s osou, která je rovnoběžná k obrobku, nebo obrobek vykonává jen pohyb otáčivý a nástroj posuvný podél osy obrobku. [1]



Obrázek 3. Schéma obvodového broušení s podélným (axiálním) posuvem. [1]

Materiál	Obvodová rychlost brousícího kotouče (na max. průměru) v_c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Obvodová rychlost obrobku v_w [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Axiální posuv stolu na jednu otáčku obrobku f_a [$\text{m}\cdot\text{ot}^{-1}$]
ocel	$(25 \div 35) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$(15 \div 20) \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ – na hrubo $(8 \div 15) \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ – na čisto	$(0,6 - 0,8)\cdot b_s$ – hrubování $(0,2 - 0,4)\cdot b_s$ – na čisto
litina	$25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$(15 \div 22) \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ – na hrubo $(12 \div 16) \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ – na čisto	$(0,75 - 0,85)\cdot b_s$ – hrubování $(0,3 - 0,5)\cdot b_s$ – na čisto $(0,1 - 0,2)\cdot b_s$ – jemné broušení
hliník	-	$(20 \div 30) \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$	-

Tabulka 2. Hodnoty pro ocel, litinu, hliník [3]

b_s – šířka brousícího kotouče [mm]

2.1.2 Hlubkové broušení

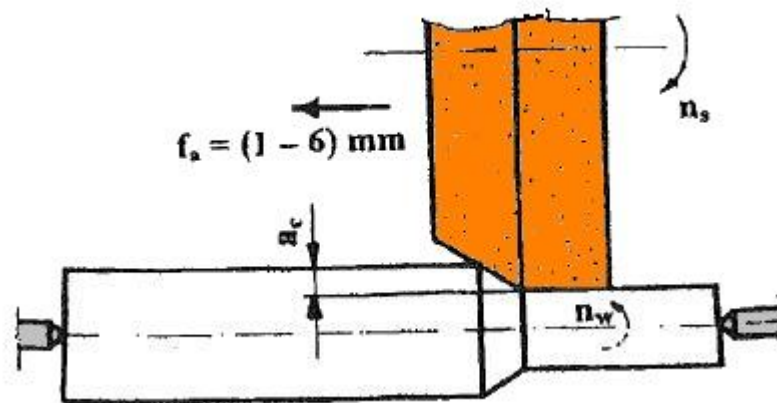
Broušení kotoučem nastaveným na rozměr je metoda broušení, kdy se celý přídavek obrousí za jeden zdvih stolu s malou axiální rychlostí posuvu. [3]

- patří mezi nejproduktivnější metody broušení
- využití při malých přídavicích na broušení

Výhoda je, že větší část odebraného materiálu odřeže malé množství brousících zrn a ostatní zrna vyjiskřují. Používá se hodnota pracovního (radiálního) záběru.

$a_e = (0,1 - 0,4) \text{ mm}$. Výkon při hlubkovém broušení je o (25 – 75) % větší než při axiálním broušení. Pro zlepšení podmínek hrubovacích brousících zrn se na kotouči vytvoří kuželové zkosení. [3]

- na velké přídávky se kotouč tvaruje stupňovitě
- řezná rychlost v_c a obvodová rychlost otáčení obrobku v_w je stejná jako u broušení s podélným posuvem [3]

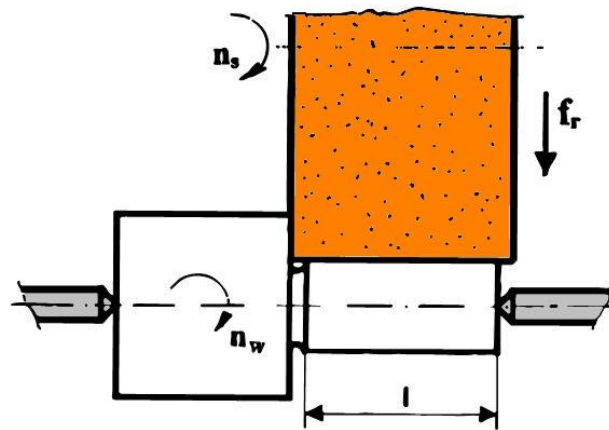


Obrázek 4. Princip hlubkového broušení [1]

n_s – frekvence otáčení brousícího kotouče; n_w – frekvence otáček obrobku; f_a – šířka broušené plochy

2.1.3 Radiální broušení

Podmínkou aplikace radiálního (zapichovacího) broušení je tuhý obrobek, zpravidla do max. délky 350mm. Výkon broušení je o (40 – 80)% vyšší než u axiálního broušení. [1]



Obrázek 5. Princip zapichovacího broušení [1]

n_s – frekvence otáčení brousícího kotouče; n_w – frekvence otáček obrobku; f_r – radiální posuv stolu na jednu otáčku obrobku; l – délka obráběné plochy

- řezná rychlost v_c a obvodová rychlost otáčení obrobku v_w je stejná jako u axiálního broušení [3]

Při hrubém broušení se volí radiální posuv stolu na jednu otáčku obrobku:

Posuv stolu na jednu otáčku obrobku:

$$f_r = (0,0025 \div 0,0075)mm$$

Broušení na čisto:

$$f_r = (0,001 \div 0,005)mm$$

2.1.4 Broušení bezhroté

Broušení bezhroté má vysokou produktivitu práce při průchozím i zapichovacím způsobu broušení. Využívá se u přesného broušení, ale také v hromadné a velkosériové výrobě. [3]

- pro broušení hladkých válcových součástí

Obrobek se vkládá mezi dva kotouče, jeden je brousící a druhý podávající. Brousící kotouč má průměr dvojnásobný než kotouč podávající. Obrobek se při broušení otáčí obvodovou rychlostí podávajícího kotouče a jeho osa je asi 5 ÷ 30mm nad osou obou kotoučů. Je veden na kalené vodící liště, která prochází podélně mezi oběma kotouči. Natočením podáva-

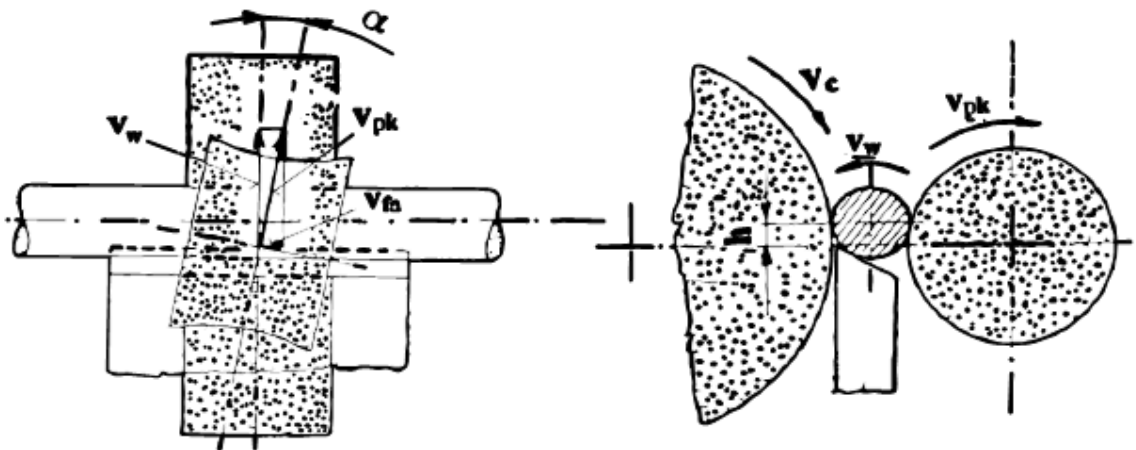
cího kotouče se rozkládá jeho obvodová rychlost na dvě složky, vodorovná uděluje obrobku axiální posuvový pohyb a svislá jím otáčí příslušnou obvodovou rychlostí. [1]

Při bezhrotém průběžném broušení se doporučuje:

<i>Obvodová rychlost brousícího kotouče</i>	v_c (30 ÷ 35) m.s ⁻¹
<i>Obvodová rychlost obrobku</i>	v_w (18 ÷ 45) m.min ⁻¹
<i>Pracovní radiální záběr</i>	a_e (0,005 ÷ 0,30) mm

Tabulka 3. Doporučené hodnoty [3]

- rychlost posuvu se dá ovlivnit zvětšením nebo zmenšením úhlu α
- podávací kotouč je pomalejší a také menší

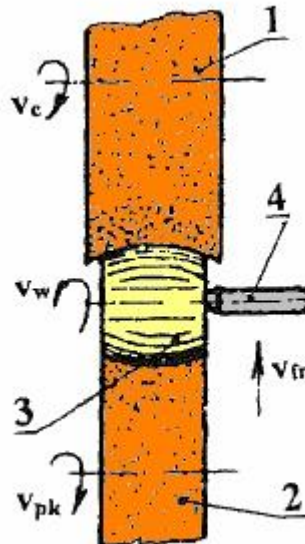


Obrázek 6. Bezhroté průběžné broušení [1]

α	- úhel vyklonění podávacího kotouče	[rad]
v_c	- obvodová rychlost brousícího kotouče	[m.s ⁻¹]
v_{pk}	- obvodová rychlost podávacího kotouče	[m.s ⁻¹]
v_w	- obvodová rychlost obrobku	[m.min ⁻¹]
v_{fa}	- axiální rychlost posuvu obrobku	[m.min ⁻¹]
h	- výškové přestavení obrobku	[mm]

2.1.5 Zápichové broušení

Využití u součástí s nákrůžkem, kuželové nebo tvarové plochy bez středícího důlku. Součást je kladena axiálně shora k dorazu mezi podávacím a brousícím kotoučem. Oba kotouče mají vůči sobě rovnoběžné osy. Většinou se brousí na dva úběry s přídavkem pro druhý úběr $(0,03 \div 0,05)\text{mm}$. [1]



Obrázek 7. Bezhruté zápichové broušení

I – brousící kotouč; *2* – podávací kotouč; *3* – obrobek; *4* – doraz; v_c – obvodová rychlost brousícího kotouče; v_w – obvodová rychlost obrobku; v_{pk} – obvodová rychlost podávacího kotouče; v_{fr} – radiální rychlost posuvu stolu

Druh práce	Průměr broušené součásti d_w [mm]	Přídavek na průměr $2a_e$ [mm]	Úhel nastavení α	Obvodová rychlost podávacího kotouče v_w [m.min ⁻¹]
Hrubování	do 10	0,04 až 0,06	3 až 4	150 až 80
	10 až 25	0,06 až 0,1	2,5 až 3,5	120 až 50
	25 až 75	0,1 až 0,3	2 až 3,5	50 až 10
	75 až 150	0,2 až 0,4	1 až 2,5	25 až 8
Broušení na čisto	-	0,005 až 0,02	1,5 až 2	120 až 50

Tabulka 4. Volba řezných podmínek při průběžném způsobu [1]

Druh práce	Radiální posuv na 1 otáčku obrobku f_r [mm]	Obvodová rychlost podávacího kotouče v_w [m.min ⁻¹]
Hrubování	0,005 až 0,02	10 až 25
Broušení na čisto	0,03 až 0,01	10 až 25

Tabulka 5. Volba řezných podmínek při zápichovém způsobu [1]

2.2 Broušení vnitřních ploch do kulata

Vnitřní broušení slouží k úpravám povrchu obrobku. Je složitější než u vnějších ploch.

Potřebný pohyb:

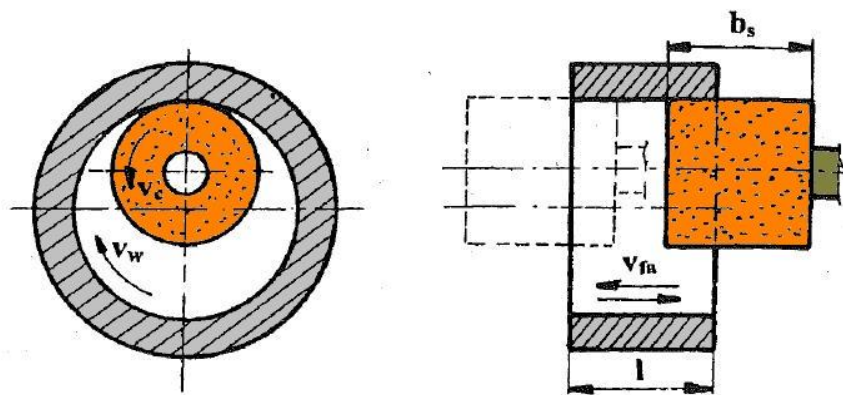
Brousícího kotouče (otáčivý)

Obrobku (otáčivý proti kotouči)

Přísuv kotouče nebo obrobku a podélný posuv

2.2.1 Broušení axiální

Brousící kotouč se otáčí uvnitř otvoru rychlostí v_c a posouvá se ve směru otvoru posuvem v_{fa} . Obrobek se otáčí s frekvencí otáčení n_w a obvodovou rychlostí v_w . Odbroušení přídavku zabezpečí vzájemné posunutí součástí a kotouče kolmo na broušený povrch a hodnotu pracovního (radiálního) záběru a_e . [1]



Obrázek 8. Vnitřní broušení s podélným posuvem a radiálním přísuvem [3]

v_c – řezná rychlost; v_f – posuvová rychlost; v_{fa} – šířka broušené plochy; b_s – šířka brousícího kotouče; l – délka obráběné plochy

- vnitřní broušení ovlivňuje geometrické rozměry součásti, především průměr broušeného otvoru a průměr brousícího kotouče d_s .
- průměr brousícího kotouče d_s je maximálně $(0,7 \div 0,9)$ průměru broušeného otvoru d_w

Kotouč malého průměru se rychle opotřebí, zanáší se a ztrácí řeznou schopnost i geometrický tvar, proto je ho třeba často orovnávat a musí mít vysoké otáčky, které je těžké zabezpečit. Při volbě obvodové rychlosti obráběné součásti v_w je třeba brát v úvahu, že zvýšením v_w se zlepšuje odvod tepla a klesá možnost tvorby opalů na broušeném povrchu. Parametry drsnosti obrobené plochy se v důsledku kratší doby doteku součásti s kotoučem zhoršují. [3]

- poměr mezi rychlostmi v_w a v_c je v rozmezí $1:60 \div 1:100$

Při volbě obvodové rychlosti obrobku v_w se musí brát následující technologické faktory. [3]

Materiál a druh tepelného zpracování

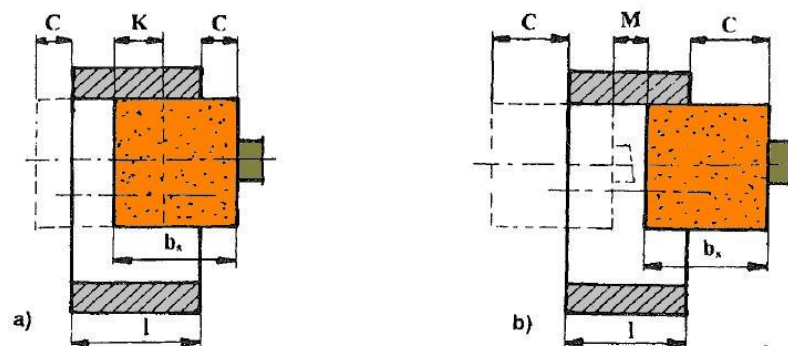
Řezné parametry

Druh brousícího kotouče

Druh práce	Podélný (axiální) posuv f_a [mm]	Pracovní (radiální) záběr a_e [mm]	Obvodová rychlost obrobku v_w [m.min ⁻¹]
Jednoduché brusky			
▪ hrubování	$(0,4 \div 0,7) \cdot b_s$	$0,005 \div 0,02$	$20 \div 40$
▪ broušení na čisto	$(0,25 \div 0,4) \cdot b_s$	$0,0025 \div 0,01$	$20 \div 40$
Poloautomatické brusky			
▪ hrubování	$(0,4 \div 0,75) \cdot b_s$	$0,0025 \div 0,005$	$50 \div 150$
▪ broušení na čisto	$(0,25 \div 0,4) \cdot b_s$	$0,0015 \div 0,0025$	$50 \div 150$

Tabulka 6. Volba řezných poměrů při vnitřním broušení [3]

b_s – šířka brousícího kotouče



Obrázek 9. Schéma vnitřního broušení [1]

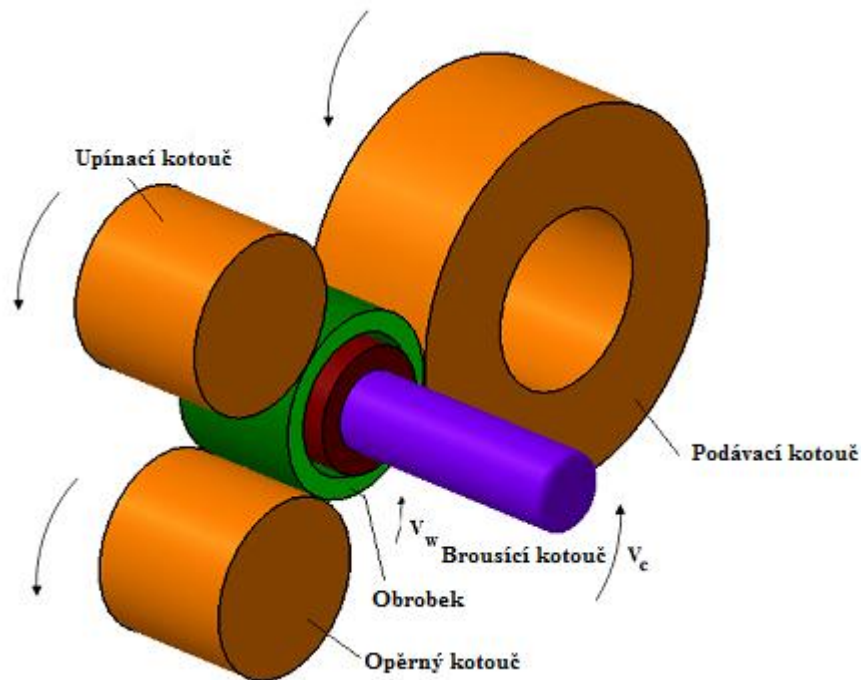
a – s překrytím; **b** – s průsvitem; **C** – přeběh kotouče; **K** – překrytí; **M** – průsvit;

b_s – šířka brousícího kotouče; l – délka obráběné plochy

2.2.2 Bezhraté broušení

Součást se vkládá mezi kotouče - podávací kotouč (2), opěrný kotouč (3) a upínací kotouč (4). Podávací kotouč 2 zabezpečuje otáčení součásti a opěrný kotouč 3 určuje polohu součásti, upínací kotouč 4 přitlačuje, a tím upíná součást během broušení. Tento způsob broušení je možné použít u součástí, které mají válcový povrch sousý s broušeným vnitřním povrchem. [1]

U bezhratého vnitřního broušení je větší přesnost v porovnání s běžným vnitřním broušením, protože u vnitřního broušení nedeformují řezné síly broušenou součást. [1]

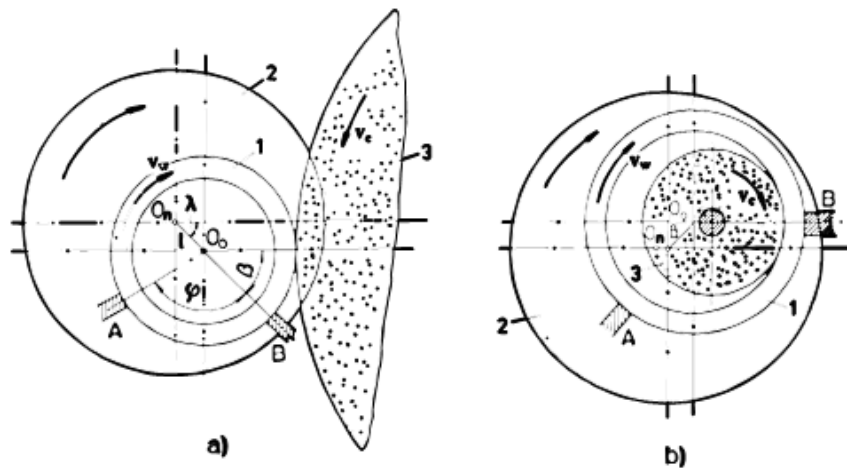


Obrázek 10. Vnitřní bezhraté broušení

- schéma bezhratého broušení se podobá vnitřnímu broušení
- vnitřní bezhraté broušení se dá použít jen pro součástky, které mají válcový vnější povrch sousý s broušeným vnitřním povrchem
- větší přesnost u vnitřního bezhratého broušení s porovnáním běžným vnitřním broušením (řezné síly nedeformují obrobek) [3]

Broušení bezhroté v tuhých opěrkách:

- vysoká přesnost geometrického tvaru
- jak pro vnitřní, tak pro vnější broušení



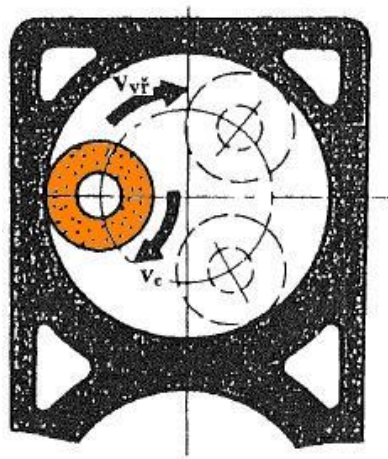
Obrázek 11. Schéma broušení v tuhých opěrkách [1]

a – vnější broušení; *b* – vnitřní broušení; *1* – obrobek; *2* – příruba; *3* – brousící kotouč;
A – opěrka; *B* – opěrka

2.2.3 Planetové broušení

Při broušení děr v součástech, které nelze upnout na brusce na díry do sklíčidla nebo čelisti, se používá planetové broušení na planetových bruskách. Obrobek se upne pevně na stole brusky a vřeteno s brousícím kotoučem se otáčí kolem vlastní osy obvodovou rychlostí v_c a obíhá kolem osy broušené díry rychlostí $v_{vř}$ a současně se pohybuje ve směru osy díry a axiální rychlostí v_{fa} . [1]

- přesnost planetových brusek je menší, protože vřeteno má delší vyložení, a je proto méně tuhé. [1]



Obrázek 12. Vnitřní planetové broušení [3]

$v_{vř}$ – rychlost otáčení osy brousícího kotouče kolem osy brousící díry; v_c – obvodová rychlost kotouče

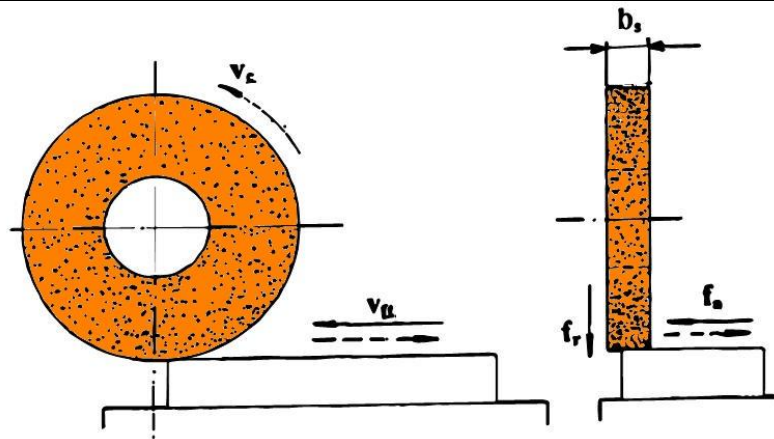
2.3 Rovinné broušení

Především má využití jako operace na čisto po frézování nebo honování, ale často se používá místo frézování při obrábění velmi tvrdých materiálů nebo materiálů s tvrdou kůrou. Rovinné plochy se brousí obvodem nebo čelem brousícího kotouče. [3]

2.3.1 Broušení obvodové

Je to nejpřesnější metoda k broušení ploch, protože se pracuje s relativně úzkým kotoučem. Obrobek se vlivem tepla vznikajícího při broušení deformuje jen nepatrně. Využívá se při výrobě nástrojů, měřidel, přípravků atd. Tímto způsobem je možné zhotovit i různé tvarové plochy. [3]

U přímočarého posuvu obrobku se otáčí brousící kotouč obvodovou rychlostí v_c , obrobek vykonává podélný vratný pohyb posuvovou rychlostí v_{ft} . V jedné nebo obou úvratích se příčně posouvá kotouč vzhledem k obrobku o hodnotu f_a a radiálním posuvem f_r nastavím hloubku broušení. [3]



Obrázek 13. Rovinné broušení obvodové – přímočarý pohyb stolu [1]

f_a – axiální posuv stolu na otáčku obrobku; v_c – řezná rychlost; v_f – posuvová rychlost; v_{fr} – radiální rychlost posuvu stolu

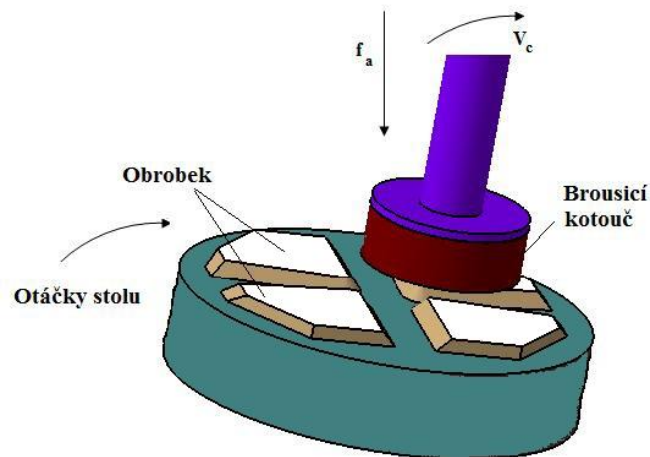
- při broušení obvodem kotouče se obrobek může otáčet nebo přímočaře posouvat

2.3.2 Čelní broušení rovinné

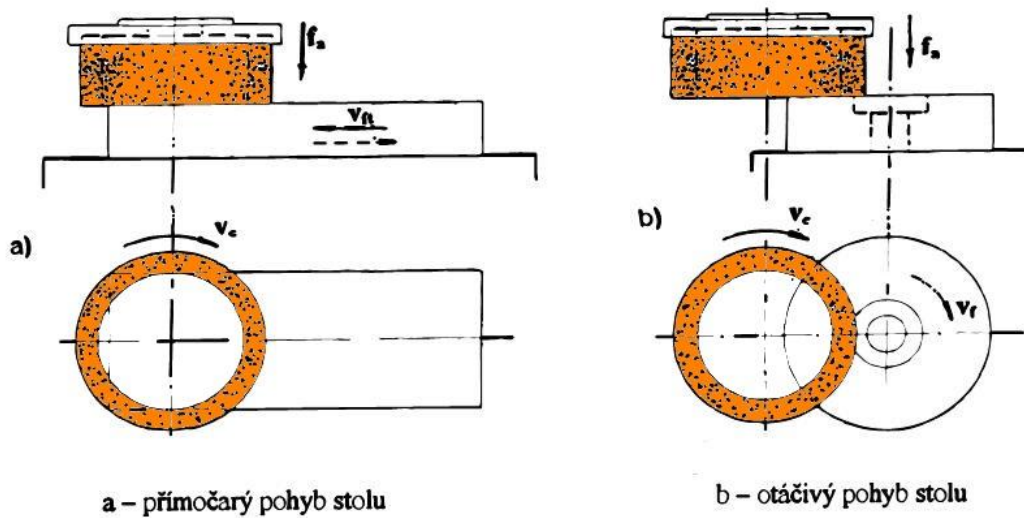
Není tak přesné jak obvodové broušení kotoučem, ale je mnohem výkonnější.

- součást se buď posouvá, nebo otáčí
- u přímočarého pohybu stolu se v sériové a hromadné výrobě brousí zejména menší součástky (čelní plochy ozubených kol, pístní kroužky, čela kroužků kuličkových ložisek ...)

U rovinných brusek pracujeme s celistvými kotouči, někdy se vřeteno sklání k obráběné ploše o několik stupňů (max. o 4 stupně), aby se styčná plocha nástroje zmenšila. [3]



Obrázek 14. Čelní broušení s otáčivým pohybem stolu



Obrázek 15. Rovinné broušení čelní [1]

f_a – axiální posuv stolu na otáčku obrobku; v_c – řezná rychlost; v_f – posuvová rychlost, v_{ft} – radiální rychlost posuvu stolu

2.4 Dokončovací obrábění

Účelem dokončovacích operací je dosažení:

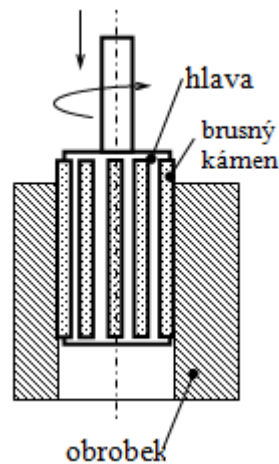
Dokonalé jakosti obrobené plochy

Vysoké přesnosti rozměru

Geometrického tvaru

2.4.1 Honování

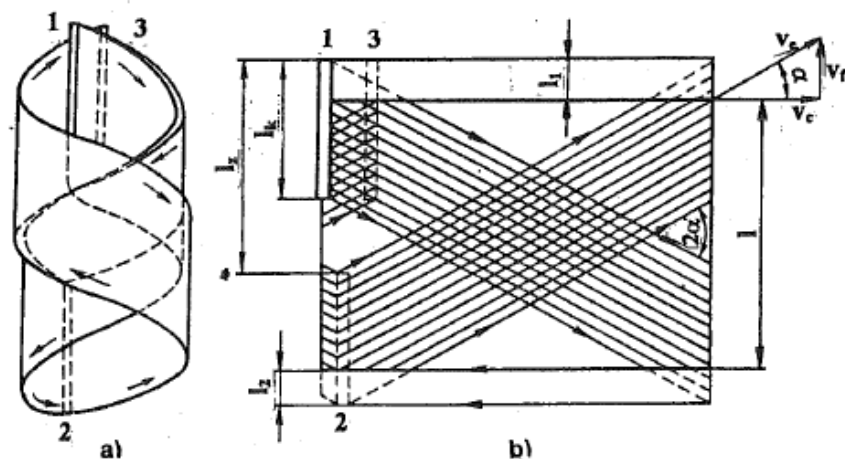
Honování je dokončovací metoda obrábění, u které se jakost povrchů zvyšuje řezným účinkem jemného brusiva. Honování je vhodné na dokončování hydraulických, pneumatických a brzdových válců, válce spalovacích motorů, bubny, pouzdra, ložiska atd. Honování lze použít na kalené i nekalené oceli, litiny, hliníkové slitiny, neželezné kovy, slinuté karbidy, tvrdé povlaky a další materiály. [1]



Obrázek 16. Honovací nástroj a obrobek [5]

Podle požadované přesnosti honování povrchu se rozlišuje honování:

- *Jednostupňové*
- *Dvoustupňové*



Obrázek 17. Kinematika honovacího procesu [1]

a – pohyb honovacích kamenů; *b* – rozvinutá plocha honovaného povrchu

1 – počáteční poloha honovacího kamene; *2* – poloha honovacího kamene v dolní úvrti;

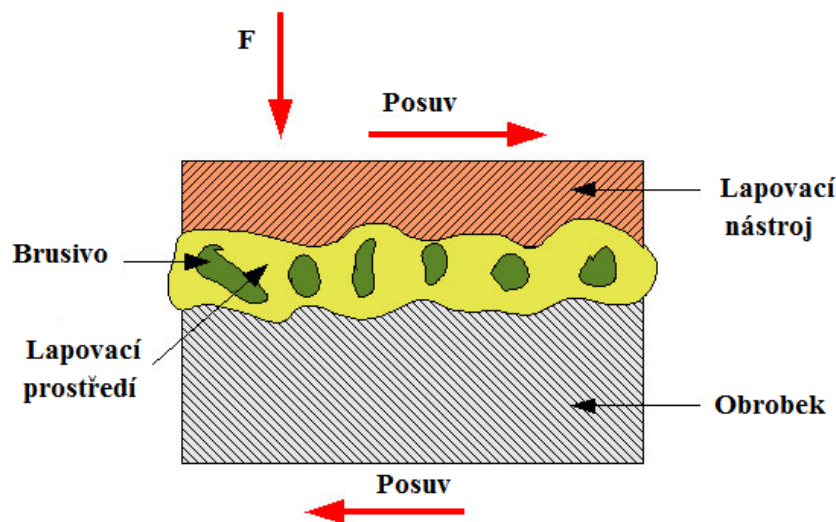
3 – poloha honovacího kamene po jednom dvojzdvihu; v_c – řezná rychlost; v_t – posuvová rychlost; v_e – rychlost řezného pohybu; 2α – úhel křížení stop; l_k – délka honovacích kamenů; $l_{1,2}$ – horní a dolní přeběh, l_z – zdvih honovací hlavy

2.4.2 Lapování

Dokončovací metoda obrábění, kterou je možné dosáhnout nejvyšší rozměrové přesnosti a nejmenší drsnosti povrchu. Používá se na dokončování rovinných, válcových a tvarových vnějších ploch. Lapují se funkční plochy měřidel (kalibry, koncové měřky). [3]

Lapování je abrazivní metoda obrábění, při níž dochází k úběru materiálu volným brusivem. Brusivo je přiváděno mezi lapovací nástroj a obrobek, které se vzájemně proti sobě pohybují. Z technologického hlediska rozlišujeme lapování na jemné a velmi jemné lapování. [1]

Lapovací nástroje mají negativní tvar lapované plochy. Lapování má nevýhodu v tom, že je velmi pracné, má malou produktivitu a také vysoké nároky na jednotku plochy v porovnání s ostatními metodami obrábění, které se používají na dokončování. [3]



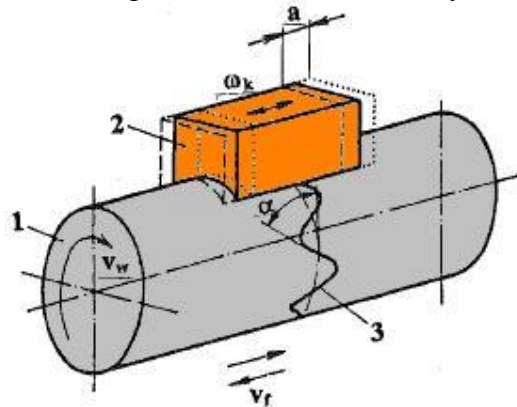
Obrázek 18. Schéma řezného procesu při lapování [6]

- F je síla vyvolávající tlak p_k mezi nástrojem a obrobkem

2.4.3 Superfinašování

Superfinašování patří mezi metody obrábění, které jsou vysoce produktivní. Využití má na plochy vnější a vnitřních rotační, tvarové a rovinné. Největší využití nachází superfinašování při dokončování valivých ložisek a součástí v automobilovém průmyslu. [1]

Při superfinišování se z povrchu odřezávají vrcholky nerovností za použití velmi jemných zrn brousícího nástroje. Hlavní pohyb, který charakterizuje superfinišování, je kmitavý pohyb superfinišovacího kamene definován silou, která vyvolává nízký tlak na danou obráběnou plochu, a malou řeznou rychlostí. [1]

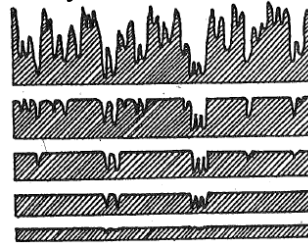


- 1 – obrobek
- 2 – superfinišovací kámen
- 3 – stopa po jednom zrně brusiva
- v_w – rychlost otáčení obrobku
- v_f – rychlost podélného posuvu obrobku
- a – amplituda
- ω_k – frekvence kmitavého pohybu
- α – úhel sklonu stopy po jednom zrně brusiva

Obrázek 19. Kinematické schéma superfinišování [1]

Kameny superfiniše jsou přitlačovány silou $p_k = 0,1 \div 0,4$ MPa, která během procesu postupně klesá. K největšímu úběru dochází $\alpha = 40 \div 60$ stupňů, povrch je pak matný. Pokud má úhel $\alpha < 40$ stupňů, snižuje se schopnost kamene a povrch je pak velmi lesklý. [3]

- superfinišování má dvě fáze - hrubovací a leštící
- důležitá hodnota při superfinišování je mezi rychlostí kmitavého pohybu nástroje a obvodové rychlosti obrobku.



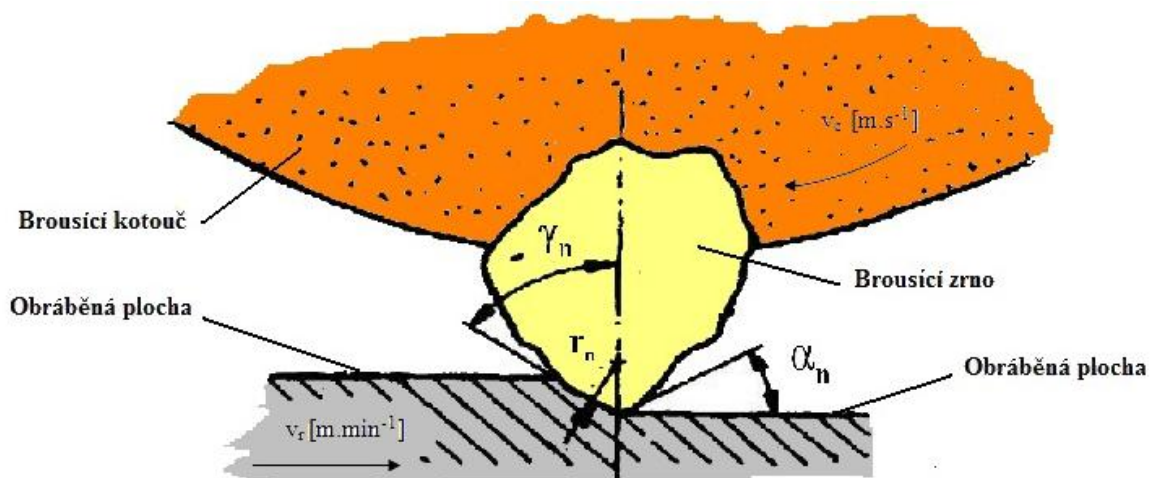
Obrázek 20. Průběh superfinišování v procesu zvětšování nosného podílu [1]



Obrázek 21. Superfinišovací stroj Supfina SpheroLine pro průměr obrobků 18-65 mm [10]

3 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH VELIČIN PŘI BROUŠENÍ

Broušení patří mezi dokončovací operace rovinných, tvarových a válcových ploch. Je to obrábění na čisto. Břit je tvořen zrny na brousícím kotouči. Zrna jsou nepravidelně uspořádaná po cele ploše kotouče a odebírají daný materiál ve formě třísek. Každé zrno má jiný geometrický tvar, který je nepravidelný a má jiný řezný uhel. Mají vysokou tvrdost a odolnost proti teplotám. Zrna se vyznačují záporným úhlem čela γ_n a úhlem hřbetu α_n . Mezi zrny brusiva a pojivem jsou volná místa tzv. póry. [1]



Obrázek 22. Model záběru brousícího zrna [1]

γ_n – normálový úhel čela; α_n – normálový úhel hřbetu; v_c – řezná rychlost; v_f – posuvová rychlost

3.1 Řezné pohyby

U broušení rozdělujeme dva pohyby - hlavní a vedlejší.

Hlavní řezný pohyb je rotační, vykonává jej řezný nástroj. Vedlejší pohyb, posuv a přísv je ovlivněn obráběnou plochou. Některá zrna řezou a jiná se jen třou - u velkých řezných rychlostí způsobuje vznik tepla. Tříska je u broušení zahřívána, nebo tavena a některé z nich i shoří. Jednotlivá zrna se časem zaoblují, odlamují, a tím se řezné vlastnosti snižují, až nakonec dojde k vylomení zrna. [3]

3.2 Hlavní řezný pohyb a příslušné veličiny

Řezná rychlost v_c

– tangenciální rychlost brousícího kotouče ve zvoleném bodě [m.s⁻¹]

Obvodová rychlost BK v_s

– tang. rychlost brousícího kotouče na max. průměru [m.s⁻¹]

Frekvence otáčení BK n_s

– počet otáček BK za jednotku času [ot.s⁻¹]

Posuv a příslušné veličiny:

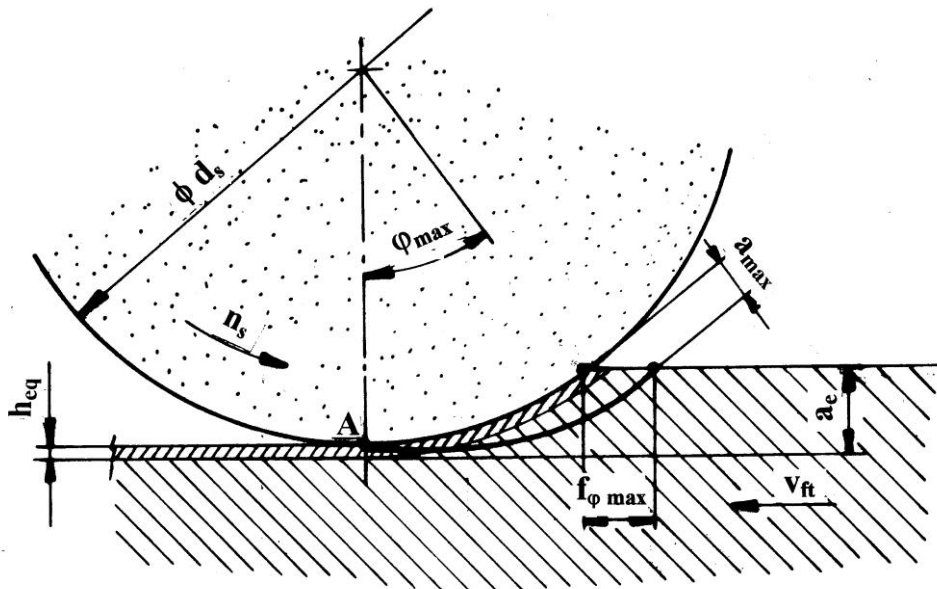
Aby bylo umožněno odebrat na celé ploše určený přírůstek na broušení, jsou nutné vzájemné pohyby broušení součástky a kotouče, které jsou definovány:

Hlavní pohyb

– plynulý posuvný pohyb s největší posuvovou rychlostí při broušení

Otáčivý pohyb obrobku

– obrobek rotuje okolo osy ve vztahu ke stolu při broušení [1]



Obrázek 23. Ekvivalentní tloušťka třísky h_{eq} [1]

a_{\max}	maximální tloušťka třísky	[mm]
h_{eq}	ekvivalentní tloušťka třísky broušení	[mm]
φ_{\max}	úhel otočení kotouče	[°]
n_s	frekvence otáčení brousícího kotouče	[s ⁻¹]
$f\varphi_{\max}$	posuv stolu připadající na otočení brousícího kotouče o úhel	[mm/φ _{max}]
v_{ft}	rychlost posuvu stolu	[m.min ⁻¹]
v_s	obvodová rychlost brousícího kotouče	[m.s ⁻¹]
a_e	hloubka broušení	[mm]
$\varnothing d_s$	průměr kotouče	[mm]

Obvodová rychlost brousícího kotouče:

$$v_s = \frac{\pi \cdot D_s \cdot n_s}{1000}$$

$$[\text{m.s}^{-1}] \quad (1)$$

- v_s je tangenciální rychlost na obvodě kotouče

- měrná na největším průměru

D_s – průměr brousícího kotouče [mm]

n_s – frekvence otáčení brousícího kotouče [ot.s⁻¹]

Frekvence otáčení brousícího kotouče:

n_s – počet otáček brousícího kotouče za jednotku času [ot.s⁻¹]

Ekvivalentní tloušťka třísky broušení:

$$h_{\text{eq}} = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot a_e$$

$$[\text{mm}] \quad (2)$$

a_e – radiální záběr [mm]

v_w – rychlost obrobku [m.min⁻¹]

v_c – řezná rychlost [m.s⁻¹] [3]

3.3 Materiály brousících kotoučů

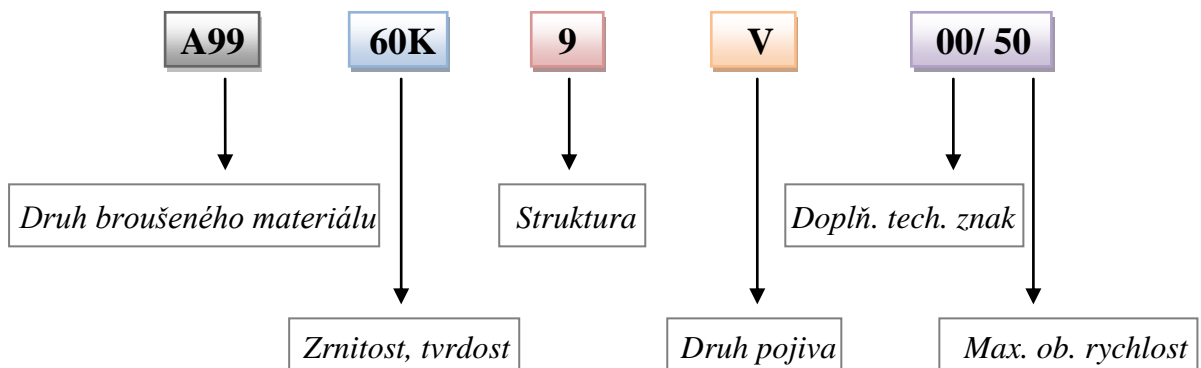
Hlavní část brousících materiálů se skládá z brousících zrn. Používají se ve formě volných zrn (brousící, lapovací a leštící prášky), zrn nanesených a přilepených k pružnému podkladu (brousící a leštící plátna a papíry), zrn rozptýlených v mazadlech a tekutinách (brousící a leštící pasty), nebo nejčastěji zrn spojených pojivou v tuhém tělese spojené do potřebného tvaru (brousících kotoučů a segmentů). [3]

- v praxi se používá standardní brousící materiál na bázi kysličníku hlinitého Al_2O_3 anebo karbidu křemíku SiC
- brousící diamantové materiály z kubického nitridu bóru [3]

Standardní brousící materiály

Volba jednotlivých vlastností brousícího kotouče se volí zejména s ohledem na druh obráběného materiálu, jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti, tepelné zpracování a požadovanou strukturu povrchové vrstvy po broušení. [3]

Příklad označení jakosti brousícího kotouče:



Druh brousícího materiálu

- obecná volba druhu brusiva je orientovaná pro elektrokorund na ocel, ocel na odlitky, temperované litiny, tvrdé bronzy, karbid křemíku na obrábění šedé litiny, mosazi, mědi, lehkých kovů a jejich slitin, slinutých karbidů, skla a keramiky [3]

- A99B Elektrokorund bílý** (broušení rychlořezných, kalených a nerezavějících ocelí)
- A99 Elektrokorund bílý – barvený červeně** (broušení nástrojových, RO, kalených a nerezavějících ocelí)
- A99M Elektrokorund bílý – barvený modře** (broušení nástrojových, rychlořezných, kalených a nerezavějících ocelí)
- A98 Elektrokorund růžový** (broušení vysoce legovaných ocelí velké pevnosti před kalením)
- A96 Elektrokorund hnědý** (broušení nízce legovaných ocelí, kovových materiálů střední a vysoké pevnosti, hrubovací práce)
- C48 Karbid křemíku - černý** (broušení šedé litiny, temperované litiny, mosazi, hliníku, organických, minerálních a keramických materiálů)
- C49 Karbid křemíku - zelený** (broušení slinutých karbidů, keramických hmot a skla)
- 90MA Monokrystalický korund** (brouš. titanové slitiny 58 ÷ 64 HRC)
- 97A Polokřehký korund** (broušení nízce legovaných ocelí, kovových materiálů střední a vysoké pevnosti, hrubovací práce)
- 80A Zirkonový korund** (broušení odlitků, hrubovací práce)
- CBN Kubický nitrid bóru** (broušení kalených nástrojových a rychlořezných ocelí, má vysokou tvrdost a tepelnou odolnost)
- AG92 Mikrokrystalický korund** (též označován SG korund, broušení těžko obrobitelných materiálů s tvrdostí nad 60 HRC)
- K Slinutý korund** (dok. operace, obtahování ostří, honování, superfinišování) [3]

Zrnitost brousícího materiálů:

- volí se podle požadované drsnosti broušeného povrchu

Zrnitost					
Velmi hrubá	8	10	12		
Hrubá	14	16	20	24	
Střední	30	36	46	54	60
Jemná	70	80	90	100	120
Velmi jemná	150	180	220	240	
Zvláště jemná	280	320			

Tabulka 7. Zrnitost brousícího materiálů [3]

Tvrdość brousícího materiálu:

Tvrdość				
Velmi měkká	G	H		
Měkká	I	J	K	
Střední	L	M	N	O
Tvrdá	P	Q	R	S
Velmi tvrdá	T	U	V	W

Tabulka 8. Označení tvrdosti brousícího kotouče [3]

Struktura brousícího materiálu:

Struktura		
Velmi hutná	1	2
Hutná	3	4
Střední	5	6
Otevřená	7	8
Velmi otevřená	9	10
Zvláštní pórovitá	11	18
Vysokoporézní	10VS	18VS

Tabulka 9. Struktura brousícího materiálu [3]

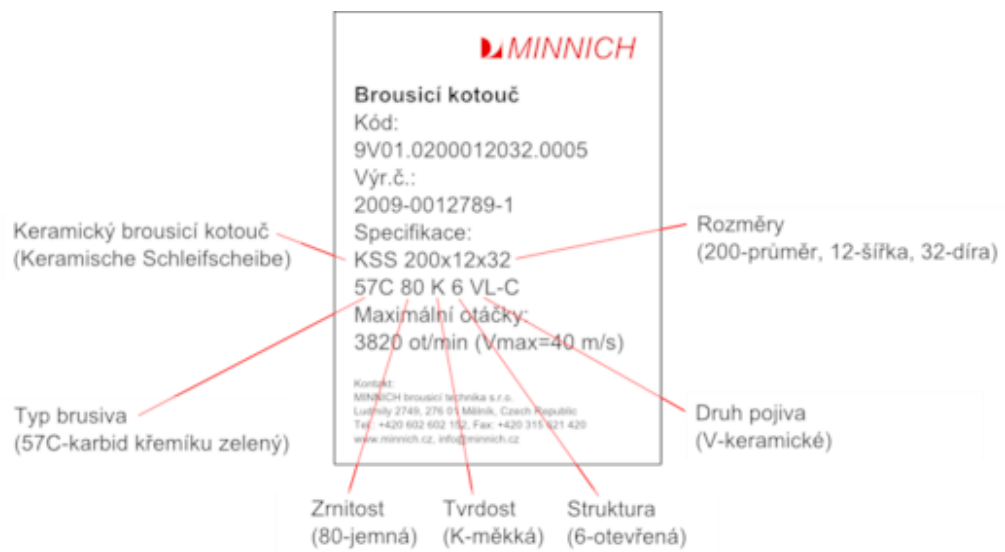
Pojiva brousícího materiálu

Pojivo vytváří můstky mezi brousícími zrny a jeho vlastnosti významně ovlivňuje (samoostrění) brousící nástroj. S **keramickým pojivem** jsou křehké, citlivé vůči nárazu a bočním tlakům, řezná kapalina jim neškodí a při dobrém skladování se jejich řezné vlastnosti nemění - univerzální použití. Pevnost **magnezitového pojiva** se skladováním zhoršuje, škodí mu vlhko, kyselé i zásadité prostředí, kotouče jsou křehké a používají se pro jemný ohrus bez tepelného ovlivnění součásti. Kotouče s **pryžovým pojivem** se používají na jemné ostření nástrojů, broušení vnějších válcových ploch, tenké řezné kotouče, podávací kotouče u bezhrotého broušení a elastický nástroj pro čištění a leštění. Nástroje s **polyuretanovým pojivem** se využívají pro jemné broušení. Kotouče s **šelakovým pojivem** - použití pro leštění kamene. [3]

Pojivo	
Keramické	V
Umělá pryskyřice	B
Magnezitové	Mg
Pryžové	R

Tabulka 10. Označení druhů pojiva [3]

Příklad značení:



Obrázek 24. Příklad orovňovacího SiC kotouče [7]

Tvary a rozměry kotoučů:



Obrázek 25. Brusné kotouče - sintrovaný korund [8]

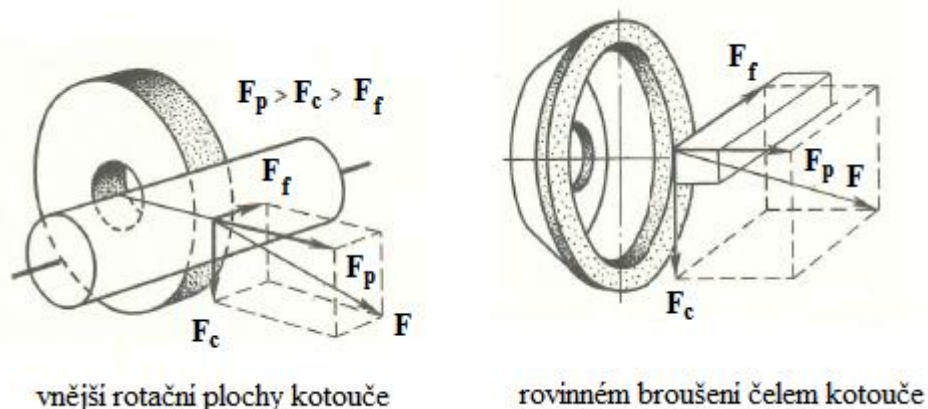
II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 KVANTIFIKACE ŘEZNÝCH SIL, VÝKONU A MĚRNÉ ENERGIE BROUŠENÍ

4.1 Síly a vztahy

U broušení dochází k působení sil na pracovní ploše nástroje a obrobku. Zrna odebírají materiál ve formě drobné třísky. Řezné síly dosahují značné velikosti, jelikož najednou pracuje více zrn. S rostoucí řeznou silou je opotřebenější kotouče větší, a tím se zkrátí jeho životnost. Roste teplota brusné plochy a klesá přesnost broušení a kvalita povrchu.

Při broušení rozeznáváme: výslednou řeznou sílu při broušení a řeznou sílu připadající na jedno zrno brusiva. Výsledná řezná síla při broušení F se skládá z normálové nebo radiální síly F_f , tangenciální síly F_c a posuvné síly F_p . Při broušení je radiální síla F_f vždy větší než tangenciální F_c , přičemž $F_p/F_c = 1,0$ až $3,0$. [2]



Obrázek 26. Řezné síly a složky [2]

Velikost řezných sil závisí zejména na způsobu broušení a na průřezu třísky, dále na zrnitosti brusiva, druhu a tvrdosti pojiva a struktuře brousícího kotouče. S otupováním brousícího kotouče může vzrůst řezná síla až několikanásobně. [2]

4.2 Řezné síly

Při broušení je F celková řezná síla, která se rozkládá do směru hlavního pohybu F_c - řezná síla, složky celkové řezné síly v pracovní rovině, vztahující se ke směru posuvu F_f - posuvová síla a složky celkové řezné síly, která je kolmá na pracovní rovinu F_p na směr výsledného řezného pohybu F_p - pasivní síla radiální. [3]

Platí, že:

$$F_p > F_c > F_f \quad a \quad F_p \cong (1,2 \div 3)F_c \quad (3)$$

4.2.1 Řeznou sílu F_c je možné přibližně určit:

1. Experimentálně získanou rovnicí při rotačním broušení s příčným posuvem
2. Pomocí řezné síly na jednotku plochy řezu k_c
3. Nepřímým způsobem z naměřeného řezného příkonu P_c brusného vřeteníku

1. Experimentálně získanou rovnicí při rotačním broušení s příčným posuvem:

$$F_c = C_m \cdot V_s^{0,7} \cdot f_a^{0,7} \cdot a_s^{0,6} \quad [N] \quad (4)$$

C_m - konstanta charakterizující broušený obrobek

zakalené oceli $C_m = 21$

litiny $C_m = 20$

2. Pomocí řezné síly na jednotku plochy řezu k_c :

$$F_c = k_c \cdot A \quad [N] \quad (5)$$

k_c - měrná řezná síla [MPa]

$k_c =$ oceli 10000 ÷ 35000 MPa

$k_c =$ litina 4000 ÷ 12000 MPa

- větší hodnoty platí pro broušení na čisto a jemné broušení

A_D - nominální plocha řezu [mm²] [3]

K výpočtu k_c u oceli můžeme použít vztah z radiálního záběru a_e :

$$k_c = \frac{C}{f_a^{0,47} \cdot a_e^{0,47}} \quad [MPa] \quad (6)$$

C	– měrná tepelná kapacita	$[J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$
f_a	– axiální posuv	$[mm \cdot ot^{-1}]$
a_e	– radiální záběr	$[mm]$

Nominální plocha řezu:

$$A_D = \frac{v_w}{60 \cdot v_s} \cdot a_e \cdot f_a \quad [mm^{-2}] \quad (7)$$

v_w	– rychlost obrobku	$[m \cdot min^{-1}]$
f_a	– axiální posuv	$[mm \cdot ot^{-1}] \quad [mm \cdot zdvih^{-1}]$
a_e	– radiální záběr	$[mm]$
v_s	– řezná rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$

3. *Nepřímým způsobem z naměřeného řezného příkonu P_c brusného vřeteníku:*

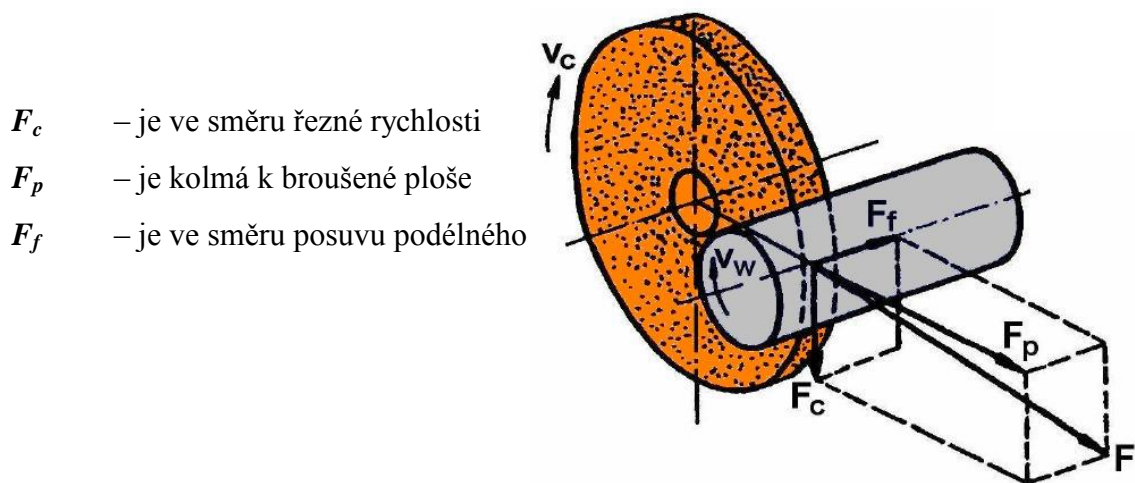
$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{10^3} \quad [kW] \quad (8)$$

v_c	– řezná rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
F_c	– tangenciální řezná síla	$[N]$

Po zjištění P_c můžeme zjistit řeznou sílu F_c

$$F_c = \frac{10^3 \cdot P_c}{v_c} \quad [N] \quad (9)$$

P_c	– řezný příkon	$[kW]$
v_c	– řezná rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$



Obrázek 27. Řezné síly při rovinném broušení [1]

4.3 Výkon a měrná energie broušení

Objemový výkon:

Objemový výkon je definován jako úběr materiálu za jednu sekundu, se zvyšující se hodnotou Q_w se zvyšuje i řezivost brousícího kotouče.

$$Q_w = a_e \cdot b_D \cdot 10^3 \cdot v_w \quad [\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

a_e	– radiální záběr	[mm]
b_D	– šířka broušení	[mm]
v_w	– rychlost obrobku	[m.min ⁻¹]

Měrná energie broušení:

Účinnost energetické stránky procesu broušení, čím menší je hodnota e_c , tím lepší je řezivost brousícího kotouče.

$$e_c = \frac{F_c \cdot v_c}{Q_w} \quad [\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}] \quad (11)$$

F_c	– tangenciální složka řezné síly	[N]
v_c	– obvodová rychlost BK na max. průměru	[m.s ⁻¹]

5 ZPRACOVÁNÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ ANALYTICKY A GRAFICKY

V teoretické části mé bakalářské práce jsem se zaměřil na jednotlivé druhy broušení a na kvantifikaci řezných sil. Praktická část byla zaměřena na měření dynamických jevů a pórovitostí brousících kotoučů. Porovnával jsem čtyři brousící kotouče s různou pórovitostí za stejných podmínek.

Měřené veličiny byly tangenciální řezná síla F_c [N], radiální řezná síla F_p [N] a efektivní výkon P_{ef} [kW].

Dané podmínky měření:

- měření proběhlo experimentálně na rovinné horizontální brusce BRH 20.03F
- za řezné konstantní rychlosti $v_c = 32 m \cdot s^{-1}$
- posuvové konstantní rychlosti $v_f = 21 m \cdot min^{-1}$
- za radiální hloubky záběru: $0,005 mm$; $0,01 mm$; $0,02 mm$; $0,04 mm$

Brousící kotouče, které byly použity:

- vysoce pórovité kotouče s danými rozměry 250x20x76mm
- typ pojiva: keramické

1) č. kotouče: 120	zrno: bílý korund	typ: A99B 80L	struktura: 12VS
2) č. kotouče: 121	zrno: 10% sint. kor.	typ: AG92/99B 80I	struktura: 12VS
3) č. kotouče: 123	zrno: 30% sint. kor.	typ: AG92/99B 80I	struktura: 12VS
4) č. kotouče: 125	zrno: 50% sint. kor.	typ: AG92/99B 80I	struktura: 12VS

5.1 Použitý materiál ocel 19 436

Oceli třídy 19 patří k nástrojovým ocelím. U těchto ocelí se požaduje vysoká tvrdost a pevnost, dostatečná houževnatost, odolnost proti opotřebení, vhodná prokalitelnost a leštitelnost. Různým chemickým složením a vhodnou tepelnou úpravou lze u nástrojových ocelí změnit jejich vlastnosti v širokém rozsahu. Ocel třídy 19 můžeme mít buď legovanou, nebo nelegovanou. Ocel 19 436 je nástrojová ocel legovaná. [4]

5.2 Použité přístroje k experimentálnímu měření

Bruska BRH 20.03F

- základní parametry brusky BRH 20.03F

Pracovní plocha stolu	200x630mm
Rozměry brousícího kotouče	250x20-50x76mm
Rychlost stolu regulovatelná	1-30m.min ⁻¹
Otáčky brousícího vřetena	2550 min ⁻¹

Tabulka 11. Rozměry BRH 20.03F [9]



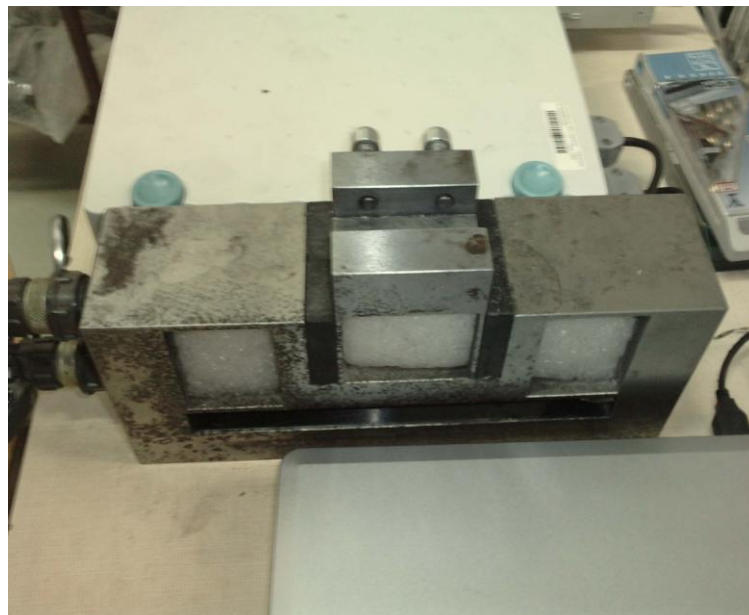
Obrázek 28. Rovinná horizontální bruska BRH 20.03F

Dynamometr

- dvousložkový tenzometrický dynamometr, který byl magneticky upnut na pracovní stůl brusky BRH 20.03F
- měření tangenciální řezné síly F_c [N] a radiální řezná síly F_p [N]
- dynamometr byl napojen na přístroj Spider8 a ten byl propojený se softwarem v PC



Obrázek 29. Spider8; tenzometrický dynamometr a PC



Obrázek 30. Tenzometrický dynamometr

Dynamický vyvažovací přístroj

- pomocí dynamického vyvažování byly všechny kotouče vyváženy, aby se předešlo kmitání brousícího kotouče a také zhoršení jakosti broušené plochy vzorku



Obrázek 31. Vyvažovací přístroj

5.3 Získané výsledky analyticky

Číslo zkoušky	Číslo kotouče	BK 250x20x76mm	Hloubka řezu a_e [mm]	Řezná síla F_p [N]	Řezná síla F_c [N]	Efektivní výkon P_{ef} [kW]
1.	120 zrno bílý korund 0%	A99B 80L 12VS keramické pojivo, pórotvorné látky	0,005	41,5	21,3	0,66
2.			0,01	125,6	55,6	1,76
3.			0,02	209,6	82	2,61
4.			0,04	293,7	100,4	3,22
5.	121 zrno AG92 10%	AG92/99 80I 12VS keramické pojivo	0,005	44,5	22,6	0,65
6.			0,01	128,9	56,06	1,71
7.			0,02	213,4	81,5	2,53
8.			0,04	297,8	98,94	3,09
9.	123 zrno AG92 30%	AG92/99 80I 12VS keramické pojivo	0,005	38,4	21,7	0,69
10.			0,01	121,9	54,6	1,73
11.			0,02	205,5	79,4	2,51
12.			0,04	289,1	96,3	3,05
13.	125 zrno AG92 50%	AG92/99 80I 12VS keramické pojivo	0,005	40,6	23,3	0,75
14.			0,01	129,9	53,7	1,71
15.			0,02	199,4	76	2,42
16.			0,04	278,8	90,4	2,85

Tabulka 12. Naměřené hodnoty pro materiál ČSN 19 436.4

Experimentálně získaná rovnice - Tečná řezná síla při broušení

$$F_c = C_m \cdot V_s^{0,7} \cdot f_a^{0,7} \cdot a_e^{0,6} \quad [N]$$

(4)

- C_m – konstanta charakterizující broušený obrobek [-]
 v_s – řezná rychlost [m.s⁻¹]
 f_a – axiální posuv stolu na otáčku obrobku [mm.ot⁻¹]
 a_e – pracovní záběr [mm]

Měrná energie broušení

$$e_c = \frac{F_c \cdot v_c}{Q_w} \quad [J \cdot mm^{-3}] \quad (11)$$

F_c – tangenciální složka řezné síly [N]

v_c – obvodová rychlost BK na max. průměru [m.min⁻¹]

Objemový výkon

$$Q_w = a_e \cdot b_D \cdot 10^3 \cdot v_w \quad [mm^3 \cdot min^{-1}] \quad (12)$$

a_e – radiální záběr [mm]

b_D – šířka broušení [mm]

v_w – rychlost obrobku [m.min⁻¹]

Součinitel řezivosti BK ξ

$$\xi = \frac{F_p}{F_c} \quad (13)$$

F_c – tangenciální složka řezné síly [N]

F_p – radiální složka řezné síly [N]

- poměr pasivní složky a řezné síly při broušení [-]

Součinitel broušení BK μ

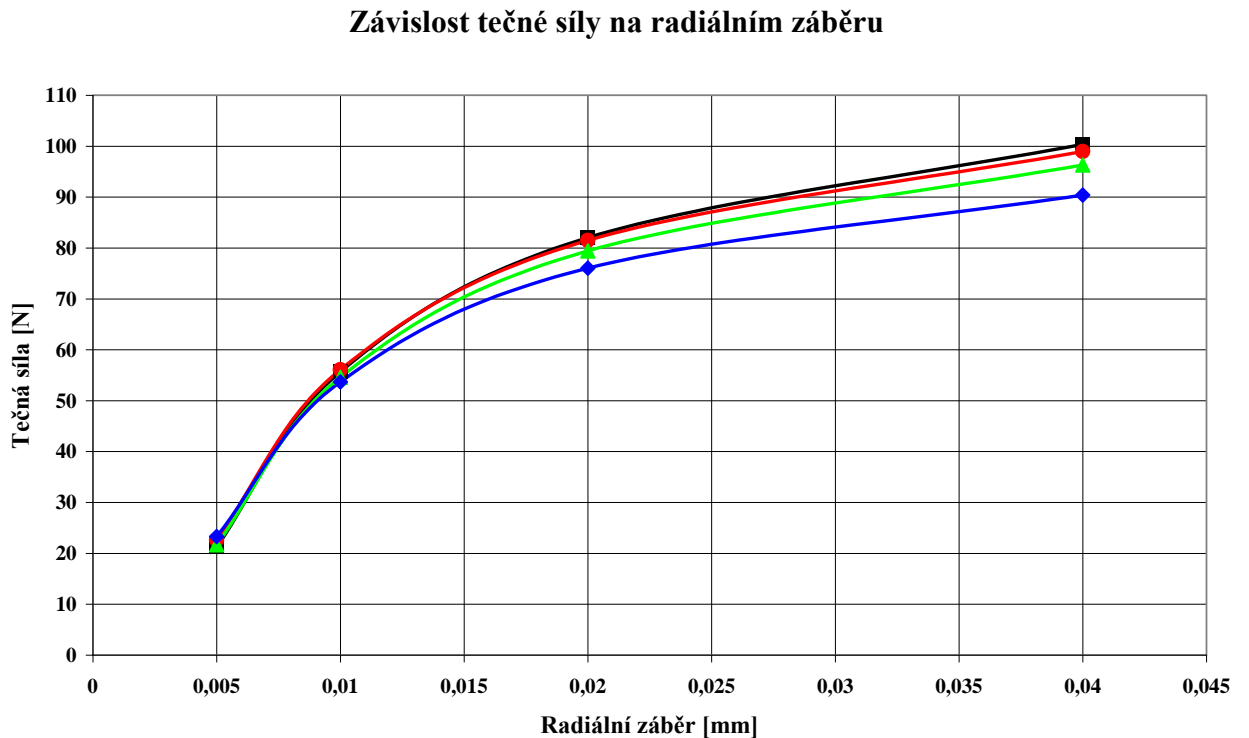
$$\mu = \frac{F_c}{F_p} \quad (14)$$

F_c – tangenciální složka řezné síly [N]

F_p – radiální složka řezné síly [N]

- poměr mezi řeznou a pasivní silou při broušení [-]

5.4 Získané výsledky graficky

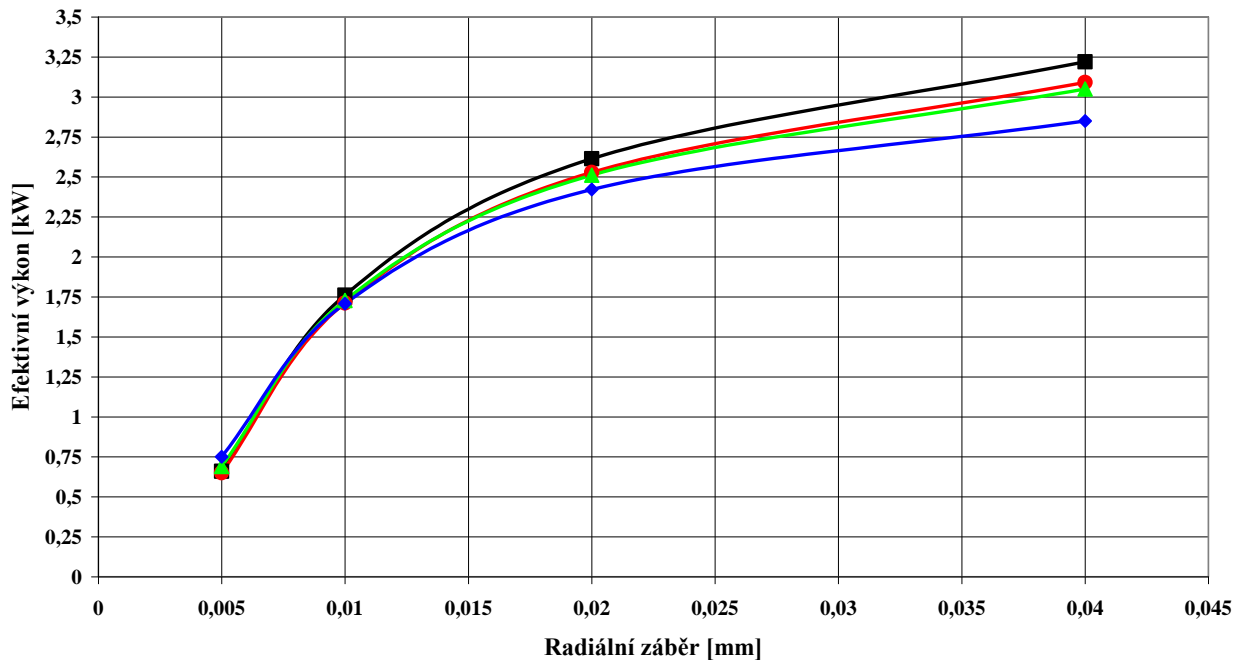


Obrázek 32. Graf závislosti tečné síly na radiálním záběru

Materiál ČSN 19 436.4			Závislost $F_c = f(a_e)$
Číslo kotouče	Sintrovaný korund	Brousící kotouč	$v_f = 21,0 \text{ m.min}^{-1}, v_c = 32,0 \text{ m.min}^{-1}$
■ 120	0%	A99B 80L 12VS	$a_e = 0,005\text{mm} \quad F_c = 38,029\text{Ln}(a_e) + 226,78$
● 121	10%	AG92/99 80I 12VS	$a_e = 0,005\text{mm} \quad F_c = 36,697\text{Ln}(a_e) + 221,01$
▲ 123	30%	AG92/99 80I 12VS	$a_e = 0,005\text{mm} \quad F_c = 35,875\text{Ln}(a_e) + 215,78$
◆ 125	50%	AG92/99 80I 12VS	$a_e = 0,005\text{mm} \quad F_c = 32,268\text{Ln}(a_e) + 198,27$

Tabulka 13. Legenda závislosti tečné síly na radiálním záběru 0,005mm

Závislost efektivního výkonu na radiálním záběru



Obrázek 33. Graf závislosti efektivního výkonu na radiálním záběru

Materiál ČSN 19 436.4		Závislost $P_{ef} = f(a_e)$	
Číslo kotouče	Sintrovaný korund	Brousící kotouč	$v_f = 21,0 \text{ m.min}^{-1}, v_c = 32,0 \text{ m.min}^{-1}$
■ 120	0%	A99B 80L 12VS	$a_e = 0,04\text{mm}$ $P_{ef} = 1,2316\text{Ln}(a_e) + 7,1823$
● 121	10%	AG92/99 80I 12VS	$a_e = 0,04\text{mm}$ $P_{ef} = 1,1782\text{Ln}(a_e) + 6,8872$
▲ 123	30%	AG92/99 80I 12VS	$a_e = 0,04\text{mm}$ $P_{ef} = 1,1301\text{Ln}(a_e) + 6,6824$
◆ 125	50%	AG92/99 80I 12VS	$a_e = 0,04\text{mm}$ $P_{ef} = 1,0291\text{Ln}(a_e) + 6,1975$

Tabulka 14. Legenda závislosti efektivního výkonu na radiálním záběru 0,04mm

6 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZJIŠTĚNÝCH PARAMETRŮ

Výsledky pro jednotlivé brousící kotouče a radiální záběr 0,005mm.

- BK 250x20x76mm
- pro 0% **A99B 80L 12VS**
- pro (10,30,50)% **AG92/99 80I 12VS** sintrovaný korund

materiál ČSN 19 436.4		Sintrovaný korund			
Veličina	Symbol	0%	10%	30%	50%
Radiální záběr	a_e [mm]	0,005	0,005	0,005	0,005
Efektivní výkon broušení	P_{ef} [kW]	0,66	0,65	0,69	0,75
Tangenciální složka řezné síly	F_c [N]	21,3	22,6	21,7	23,3
Pasivní složka řezné síly	F_p [N]	41,5	44,5	38,4	40,6
Měrná energie broušení	e_c [J.mm ⁻³]	0,43	0,35	0,44	0,47
Objemový výkon	Q_w [mm ³ .min ⁻¹]	1575	1575	1575	1575
Efektivní hloubka broušení	h_{eq} [mm]	5,47E-05	5,47E-05	5,47E-05	5,47E-05
Součinitel řezivosti BK	ξ [-]	1,95	1,97	1,77	1,74
Součinitel broušení BK	μ [-]	0,51	0,51	0,57	0,57

Tabulka 15. Vyhodnocení hodnot pro hloubku 0,005mm

Výsledky pro jednotlivé brousící kotouče a radiální záběr 0,04mm.

- BK 250x20x76mm
- pro 0% **A99B 80L 12VS**
- pro (10,30,50)% **AG92/99 80I 12VS** sintrovaný korund

materiál ČSN 19 436.4		Sintrovaný korund			
Veličina	Symbol	0%	10%	30%	50%
Radiální záběr	a_e [mm]	0,04	0,04	0,04	0,04
Efektivní výkon broušení	P_{ef} [kW]	3,22	3,09	3,05	2,85
Tangenciální složka řezné síly	F_c [N]	100,4	98,94	96,3	90,4
Pasivní složka řezné síly	F_p [N]	293,7	297,8	289,1	278,8
Měrná energie broušení	e_c [J.mm ⁻³]	2,04	2,01	1,96	1,84
Objemový výkon	Q_w [mm ³ .min ⁻¹]	12600	12600	12600	12600
Efektivní hloubka broušení	h_{eq} [mm]	4,37E-04	4,37E-04	4,37E-04	4,37E-04
Součinitel řezivosti BK	ξ [-]	2,93	3,01	3,00	3,08
Součinitel broušení BK	μ [-]	0,34	0,33	0,33	0,32

Tabulka 16. Vyhodnocení hodnot pro hloubku 0,04mm

ZÁVĚR

Na základě teoretického studia a experimentálního měření lze stanovit obecný závěr.

U materiálu 19 436.4 brousící kotouč **A99B 80L12VS** oproti **AG92/99 80I 12VS** se zvyšujícím se obsahem sintrovaného korundu.

Při radiálním záběru o hodnotě 0,005mm.

- zvýší-li se pórovitost u kotouče AG92/99 80I 12VS, řezná síla F_c bude mít pro daný radiální záběr největší řeznou sílu - kotouč s 50% přídavku sintrovaného korundu $F_c=23,3N$
- u pasivní složky řezné síly F_p dosáhl prokazatelně největší hodnoty kotouč AG92/99 80I 12VS s obsahem 10% sintrovaného korundu (hodnota $F_p= 44,5N$)
- měrná energie e_c pro daný radiální záběr 0,005mm se zvýšenou pórovitostí kotouče AG92/99 80I 12VS bude mít pro daný radiální záběr největší měrnou energii s kotoučem s 50% přídavku sintrovaného korundu ($e_c=0,47 J.mm^{-3}$)

Při radiálním záběru o hodnotě 0,04mm.

- zvýší-li se pórovitost u kotouče AG92/99 80I 12VS, řezná síla F_c bude mít pro daný radiální záběr tyto hodnoty: kotouč 121 - hodnota $F_c=98,55\%$, kotouč 123 - hodnota $F_c=95,92\%$ a kotouč 125 - hodnota $F_c=90,04\%$.
- u pasivní složky řezné síly F_p dosáhl prokazatelně největší hodnoty kotouč AG92/99 80I 12VS s obsahem 10% sintrovaného korundu (hodnota $F_p= 297,8N$)
- měrná energie e_c pro daný radiální záběr 0,04mm se zvýšenou pórovitostí kotouče AG92/99 80I 12VS je v rozmezí e_c od 98,5% až po 90,2% - čím větší je pórovitost, tím dosahuje měrná energie nižších hodnot

Experimentálním měřením jsem zjistil, že brousící kotouč s obsahem sintrovaného korundu a s vyšší pórovitostí zaručuje lepší výsledky v daných sledovaných parametrech.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOCMAN, K. – PROKOP, J.: *Technologie obrábění*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2011. 330 s.
- [2] MASLOV, J. N.: *Teorie broušení kovů*. Vyd. 1. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1979. 248 s. L13-B2-v-31f/22649.
- [3] KOCMAN, Karel.: *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [4] HLUCHÝ, M.; KOLOUCH, J.: *Strojírenská technologie 1: Nauka o materiálu 1*. Vyd. 3. Praha: Scientia, spol. s. r. o., pedagogické nakladatelství, 2002. 266 s. ISBN 80-7183-262-6.
- [5] Honovací hlava
Zdroj z <<http://jhamernik.sweb.cz/Dokoper.htm>>
- [6] Lapování schema
Zdroj z <<http://strojirenstvi-ucivo.blogspot.com/2011/03/31518-lapovani.html>>
- [7] Orovnávací kotouč SiC
Zdroj z <<http://www.minnich.cz/inpage/specifikace-brousicihokotouce>>
- [8] Tvary brusných kotoučů
Zdroj z <<http://www.diapraha.cz/swiss-master-ceralox-brusne-kotouce>>
- [9] Bruska BRH 20.03F
Zdroj: Návod k použití
- [10] Superfinašovací stroj Supfina SpheroLine pro průměr obrobků 18-65 mm
Zdroj z <<http://www.mmspektrum.com/clanek/systemy-pro-finisovani-povrchu>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_D	Nominální plocha řezu.	$[\text{mm}^2]$
a_e	Šířka frézování.	$[\text{mm}]$
$2a_e$	Přídavek na průměr.	$[\text{mm}]$
a_{max}	Maximální tloušťka třísky.	$[\text{mm}]$
Al_2O_3	Kysličník hlinitý.	$[-]$
b_D	Jmenovitá šířka řezu.	$[\text{mm}]$
b_s	Šířka brousícího kotouče.	$[\text{mm}]$
BK	Brousící kotouč.	$[\text{mm}]$
C	Měrná tepelná kapacita.	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$
C_m	Konstantní charakteristika broušeného obrobku.	$[-]$
d_s	Průměr brousícího kotouče.	$[\text{mm}]$
d_w	Průměr obrobku.	$[\text{mm}]$
e_c	Měrná energie broušení.	$[\text{J} \cdot \text{mm}^3]$
F	Celková řezná síla.	$[\text{N}]$
F	Síla vyvolávající tlak.	$[\text{N}]$
F_c	Tangenciální složka řezné síly.	$[\text{N}]$
F_f	Posuvová složka řezné síly.	$[\text{N}]$
F_p	Pasivní složka řezné síly.	$[\text{N}]$
f_a	Axiální posuv stolu na jednu otáčku obrobku.	$[\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}]$
f_r	Radiální posuv stolu na jednu otáčku obrobku.	$[\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1}]$
$f_{\varphi_{\text{max}}}$	Posuv stolu připadající na otočení brousícího kotouče o úhel.	$[\text{mm}/\varphi_{\text{max}}]$
h	Výškové přestavení obrobku.	$[\text{mm}]$
h_{eq}	Ekvivalentní tloušťka třísky.	$[\text{mm}]$
k_c	Měrná řezná síla.	$[\text{MPa}]$

l	Délka obráběné plochy.	[mm]
l_k	Délka honovacích kamenů.	[mm]
l_z	Zdvih honovací hlavy.	[mm]
$l_{1,2}$	Horní a dolní přeběh.	[mm]
n_s	Frekvence otáčení brousícího kotouče.	[ot.s ⁻¹]
n_w	Frekvence otáčení obrobku.	[min ⁻¹]
P_c	Příkon broušeného vřeteníku.	[kW]
P_{ef}	Efektivní výkon.	[kW]
Q_w	Objemový výkon.	[mm ³ .s ⁻¹]
R_a	Střední aritmetická drsnost povrchu.	[μm]
SiC	Karbid křemíku.	[-]
v_c	Tangenciální rychlost na maximálním průměru brousícího kotouče.	[mm.s ⁻¹]
v_c	Řezná rychlost.	[mm.min ⁻¹]
v_f	Posuvová rychlost.	[mm.min ⁻¹]
v_{fa}	Axiální rychlost posuvu stolu.	[m.min ⁻¹]
v_{ft}	Radiální rychlost posuvu stolu.	[mm.min ⁻¹]
v_{pk}	Obvodová rychlost podávacího kotouče.	[m.s ⁻¹]
v_t	Posuvová rychlost.	[m.min ⁻¹]
$v_{vř}$	Rychlost otáčení osy brousícího kotouče kolem osy brousící díry.	[m.min ⁻¹]
v_w	Obvodová rychlost obrobku.	[m.min ⁻¹]
α	Úhel nastavení.	[rad]
2α	Úhel křížení stop.	[rad]
μ	Součinitel broušení.	[-]
γ_n	Nástrojový úhel čela.	[rad]
ξ	Součinitel řezivosti brousícího kotouče.	[-]

φ_{\max} Úhel otočení kotouče.

[°]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1. Čelní broušení [3]</i>	13
<i>Obrázek 2. Broušení obvodové [3]</i>	14
<i>Obrázek 3. Schéma obvodového broušení s podélným (axiálním) posuvem. [1]</i>	16
<i>Obrázek 4. Princip hloubkového broušení [1]</i>	17
<i>Obrázek 5. Princip zapichovacího broušení [1]</i>	18
<i>Obrázek 6. Bezhraté průběžné broušení [1]</i>	19
<i>Obrázek 7. Bezhraté zápichové broušení</i>	20
<i>Obrázek 8. Vnitřní broušení s podélným posuvem a radiálním přísuvem [3]</i>	21
<i>Obrázek 9. Schéma vnitřního broušení [1]</i>	22
<i>Obrázek 10. Vnitřní bezhraté broušení</i>	23
<i>Obrázek 11. Schéma broušení v tuhých opěrkách [1]</i>	24
<i>Obrázek 12. Vnitřní planetové broušení [3]</i>	25
<i>Obrázek 13. Rovinné broušení obvodové – přímočarý pohyb stolu [1]</i>	26
<i>Obrázek 14. Čelní broušení s otáčivým pohybem stolu</i>	27
<i>Obrázek 15. Rovinné broušení čelní [1]</i>	27
<i>Obrázek 16. Honovací nástroj a obrobek [5]</i>	28
<i>Obrázek 17. Kinematika honovacího procesu [1]</i>	28
<i>Obrázek 18. Schéma řezného procesu při lapování [6]</i>	29
<i>Obrázek 19. Kinematické schéma superfinišování [1]</i>	30
<i>Obrázek 20. Průběh superfinišování v procesu zvětšování nosného podílu [1]</i>	30
<i>Obrázek 21. Superfinišovací stroj Supfina SpheroLine pro průměr obrobků 18-65 mm [10]</i>	30
<i>Obrázek 22. Model záběru brousícího zrna [1]</i>	31
<i>Obrázek 23. Ekvivalentní tloušťka třísky heq [1]</i>	32
<i>Obrázek 24. Příklad orovnávacího SiC kotouče [7]</i>	37
<i>Obrázek 25. Brusné kotouče - sintrovaný korund [8]</i>	37
<i>Obrázek 26. Řezné síly a složky [2]</i>	39
<i>Obrázek 27. Řezné síly při rovinném broušení [1]</i>	42
<i>Obrázek 28. Rovinná horizontální bruska BRH 20.03F</i>	44
<i>Obrázek 29. Spider8; tenzometrický dynamometr a PC</i>	45
<i>Obrázek 30. Tenzometrický dynamometr</i>	45

<i>Obrázek 31. Vyvažovací přístroj.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 32. Graf závislosti tečné síly na radiálním záběru.....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 33. Graf závislosti efektivního výkonu na radiálním záběru.....</i>	<i>50</i>

Obrázek: 10, 14, 27, 28, 29, 30, zdroj: vlastní

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1. Abrazivní metody broušení [1]</i>	15
<i>Tabulka 2. Hodnoty pro ocel, litinu, hliník [3]</i>	16
<i>Tabulka 3. Doporučené hodnoty [3]</i>	19
<i>Tabulka 4. Volba řezných podmínek při průběžném způsobu [1]</i>	20
<i>Tabulka 5. Volba řezných podmínek při zapichovacím způsobu [1]</i>	20
<i>Tabulka 6. Volba řezných poměrů při vnitřním broušení [3]</i>	22
<i>Tabulka 7. Zrnitost brousícího materiálů [3]</i>	35
<i>Tabulka 8. Označení tvrdosti brousícího kotouče [3]</i>	36
<i>Tabulka 9. Struktura brousícího materiálu [3]</i>	36
<i>Tabulka 10. Označení druhů pojiva [3]</i>	36
<i>Tabulka 11. Rozměry BRH 20.03F [9]</i>	44
<i>Tabulka 12. Naměřené hodnoty pro materiál ČSN 19 436.4</i>	47
<i>Tabulka 13. Legenda závislosti tečné síly na radiálním záběru 0,005mm</i>	49
<i>Tabulka 14. Legenda závislosti efektivního výkonu na radiálním záběru 0,04mm</i>	50
<i>Tabulka 15. Vyhodnocení hodnot pro hloubku 0,005mm</i>	51
<i>Tabulka 16. Vyhodnocení hodnot pro hloubku 0,04mm</i>	51

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY