

Teoretická analýza termodynamických jevů s orientací na vysoce pórovité brousící kotouče

Milan Suchánek

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: **Milan SUCHÁNEK**
Osobní číslo: **T08655**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Teoretická analýza termodynamických jevů
s orientací na vysoce pórovité brousící kotouče**

Zásady pro vypracování:

- 1) Vymezení základních veličin při broušení
- 2) Kvantifikace závislostí energetických faktorů broušení
- 3) Ekvivalentní tloušťka třísky
- 4) Analýza teplotních polí brousícího kotouče a broušeného povrchu
- 5) 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 Zlíně 30.5.2011

Suchánek
.....

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 nevydělečně 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 vzdělávacího 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). Odpírá-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 užit 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 výtěžku 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 přihlídí k výši výtěžku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

V teoretické části této bakalářské práce se zaměřuji na analýzu termodynamických jevů s orientací na vysoce pórovité brousící kotouče. Teoretická část je rozdělena do tří fází. V první fázi se zabývám vymezením základních veličin při broušení, dále pak kvantifikací závislosti energetických faktorů broušení a nakonec ekvivalentní tloušťkou třísky. V praktické části je mým úkolem zanalyzovat teplotní pole brousícího kotouče a broušeného povrchu a vyhodnotit výsledky zjištěných parametrů.

Klíčová slova:

broušení, teplota, kotouče, termodynamika

ABSTRACT

In the theoretical part of this thesis I survey thermodynamic analysis as a phenomenon with a special focus on highly porous grinding wheels. The theoretical part is divided into three phases. The first phase deals with the determination of basic parameters for grinding, followed by quantification of dependency of energy grinding factors and equivalent thickness of splinter.

The practical part of this thesis analyses the temperature field of grinding wheel and grinding surface and afterwards evaluates the results of obtained parameters.

Keywords:

grinding, temperature, wheel, thermodynamics

Poděkování, motto

Tímto bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Karlu Kocmanovi za ochotu, cenné rady a pomoc při řešení bakalářské práce.

Per aspera ad astra - Přes překážky ke hvězdám.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem citoval(a). V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden(a) jako spoluautor(ka).

Ve Zlíně

.....

Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH VELIČIN PŘI BROUŠENÍ	12
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ BROUŠENÍ	12
1.2 ZÁKLADNÍ VELIČINY PŘI BROUŠENÍ	16
1.2.1 Výpočet veličin.....	17
1.3 BROUSÍCÍ NÁSTROJE	19
1.4 ZNAČENÍ BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ	19
1.5 UPÍNÁNÍ BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ	20
1.6 BROUSÍCÍ MATERIÁLY	20
1.6.1 Standardní brousící materiály.....	21
1.6.2 Druhy brousících materiálů	21
1.6.3 Zrnitost:	22
1.6.4 Tvrdost brousícího materiálu	23
1.6.5 Struktura brousícího materiálu	23
1.6.6 Pojivo	24
2 KVANTIFIKACE ZÁVISLOSTI ENERGETICKÝCH FAKTORŮ BROUŠENÍ	25
2.1 TEPelné JEVY	27
2.2 TERMODYNAMICKÉ JEVY PŘI BROUŠENÍ	29
3 EKVIVALENTNÍ TLOUŠŤKA TŘÍSKY	30
3.1 TVORBA TŘÍSKY	30
3.2 TYPY TŘÍSEK	33
3.3 ŘEZNÉ SÍLY	35
3.4 TEPLO V TŘÍSCE.....	37
3.5 EKVIVALENTNÍ TLOUŠŤKA TŘÍSKY H_{EQ}	37
II PRAKTICKÁ ČÁST	40
4 ANALÝZA TEPLOTNÍCH POLÍ BROUSÍHO KOTOUČE A BROUŠENÉHO POVRCHU	41
4.1 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	41
4.2 MĚŘENÍ:	41
4.2.1 Technologické podmínky	41
4.2.2 Broušený materiál.....	41
4.2.3 Brousící kotouče.....	42
4.2.4 Přístroje použité k měření	42
4.2.5 Postup.....	45
4.2.6 Grafické vyjádření	46

4.2.7	Kvantifikace efektivity procesu broušení	47
4.2.8	Analýza termodynamických jevů	49
5	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZJIŠTĚNÝCH PARAMETRŮ.....	52
5.1	VSTUPNÍ A VÝSLEDNÉ PARAMETRY PRO RADIÁLNÍ ZÁBĚR 0,005MM.....	52
5.2	VSTUPNÍ A VÝSLEDNÉ PARAMETRY PRO RADIÁLNÍ ZÁBĚR 0,04MM.....	53
5.3	POROVNÁNÍ MNOŽSTVÍ VZNIKLÉHO TEPLA NA OBSAHU MIKROKRYSALICKÉHO KORUNDU PRO RADIÁLNÍ ZÁBĚR $A_E = 0,4$ MM.....	54
5.4	POROVNÁNÍ TEPLoty TRÍSKY NA OBSAHU MIKROKRYSALICKÉHO KORUNDU PRO RADIÁLNÍ ZÁBĚR $A_E = 0,4$ MM.....	55
5.5	POROVNÁNÍ MNOŽSTVÍ TEPLA PŘECHÁZEJÍCÍHO DO OBROBKU NA OBSAHU MIKROKRYSALICKÉHO KORUNDU PRO RADIÁLNÍ ZÁBĚR $A_E = 0,4$ MM.....	56
	ZÁVĚR	57
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	59
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ	63
	SEZNAM TABULEK.....	64
	SEZNAM PŘÍLOH.....	66

ÚVOD

Cílem všech současných vývoju nových technologií v oblasti dokončování funkčních ploch je dosažení vyšších kvalit broušených ploch. Zdokonalování brousících procesů znamená zlepšování provozních vlastností výrobků, především těch, které jsou extrémně zatěžovány a jsou na jejich kvalitu kladeny vysoké požadavky. Jedna z abrazivních metod pomocí které můžeme dosahovat takto vysokých přesností je proces broušení. Proces broušení se neustále vyvíjí. Jednou z možných cest vývoje v oblasti dokončování funkčních ploch je výroba nových brousících materiálů – sintrovaných korundů, které zaručí zvýšení kvality broušených ploch. Brusivo ze sintrovaného korundu je vhodné pro broušení velmi tvrdých a houževnatých materiálů.

Cílem této bakalářské práce bylo provést teoretickou analýzu termodynamických jevů s orientací na vysoce pórovité kotouče. V experimentech byly porovnávány vlastnosti kotoučů AG92/99 80I 12VS s rozdílnými obsahy mikrokrystalického korundu (10%, 30% a 50%), oproti kotouči s klasickou strukturou A99B 80L 12 VS (obsah mikrokrystalického korundu = 0%). Experimenty byly realizovány na brusce BRH 20.03F rovinným broušením, při řezné rychlosti $v_c = 32,0\text{m/s}$ a posuvové rychlosti $v_f = 21,0\text{m/min}$. Vlastnosti kotoučů byly porovnávány při radiálních záběrech $0,005\text{mm} \div 0,004\text{mm}$.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH VELIČIN PŘI BROUŠENÍ

Broušení je dokončovací metoda obrábění, jejíž cílem je dosažení výrobku s vysokou tvarovou i povrchovou přesností. Přednostmi broušení jsou vysoká přesnost, možnost velkého úběru materiálu a schopnost obrábění tvrdých materiálů a kalených povrchů.

Proces broušení má základní charakteristiky podobné frézování. Od frézování se však liší hlavně různorodostí geometrického tvaru zrn s nepravidelným rozmístěním po ploše kotouče. Brousící kotouč má brousící zrna záměrně slabě zakotvena, aby se v důsledku zvýšených řezných sil, které působí na otupené zrna, tyto zrna vylomila a nahradila je zrna neotupená.

Broušení se uskutečňuje různými metodami. Zvolení potřebné metody je závislé na tvaru obrobeného povrchu a způsobu jeho vytváření.

1.1 Základní rozdělení broušení

Základní rozdělení broušení je závislé na tom, kde je aktivní část brousícího kotouče.

Podle aktivní části brousícího kotouče dělíme broušení na:

- a) **obvodové broušení**
- b) **čelní broušení**

ad. a) obvodové broušení – jedná se o broušení obvodem kotouče. Tímto způsobem můžeme obrábět jak rovinné tak i kulové plochy.

U obvodového broušení do kulata rozdělujeme, podle vzájemné polohy brousícího kotouče a obrobku:

- vnější broušení (broušení vnějšího povrchu)
- vnitřní broušení (broušení vnitřního povrchu)

U obvodového broušení rovinných ploch může být hlavní pohyb stolu přímočarý i otáčivý.

BROUŠENÍ OBVODOVÉ				
		radiální	tangenciální	axiální
Rovinné – pohyb stolu	přímočarý			
	otáčivý			
Do kulata	vnější			
	vnitřní			

Tabulka 1. obvodové broušení [1]

ad. b) čelní broušení – jedná se o broušení čelem kotouče, kolmým k jeho ose. Pohyb stolu může být přímočarý i otáčivý, ale můžeme obrábět pouze rovinné plochy.

Podle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brousícímu kotouči se definuje:

- axiální broušení (hlavní posuv je rovnoběžný s osou kotouče)
- tangenciální (hlavní posuv je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě D)
- radiální (hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě D je radiální vzhledem ke kotouči)
- obvodové zápachové broušení (posuv stolu je plynulý radiální)
- čelní zápachové broušení (posuv stolu je plynulý axiální)

BROUŠENÍ ČELNÍ				
		radiální	tangenciální	axiální
Rovinné – pohyb stolu	přímočarý			
	otáčivý			

Tabulka 2. čelní broušení [1]

veličina	popis	jednotky
n_s	frekvence otáčení brousícího kotouče	[ot.s ⁻¹]
n_w	frekvence otáčení obrobku	[ot.s ⁻¹]
v_{fa}	axiální rychlost posuvu stolu	[m.min ⁻¹]
v_{fr}	radiální rychlost posuvu stolu	[m.min ⁻¹]
v_{ft}	tangenciální rychlost posuvu stolu	[mm.min ⁻¹]

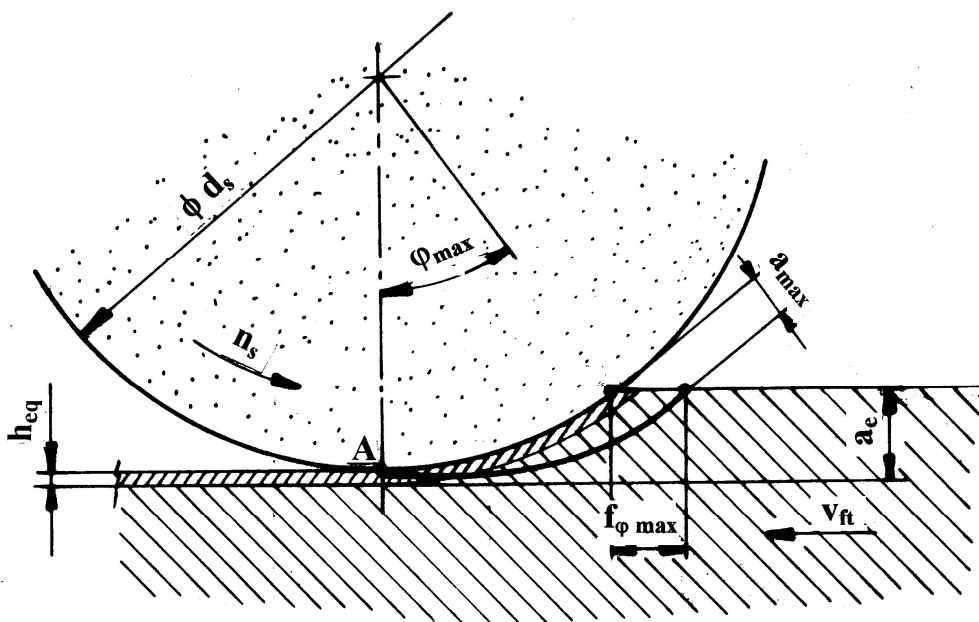
Tabulka 3. Legenda k tabulkám 1a 2

V tabulce 2 jsou naznačeny dosahované parametry přesnosti broušení v porovnání s dalšími abrazivními metodami obrábění (honování, lapování a superfinišování).

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

Tabulka 4. dosahované parametry přesností obrobek pro abrazivní metody obrábění [1]

1.2 Základní veličiny při broušení



Obrázek 1. základní veličiny při broušení [2]

veličina	popis	jednotky
a_{max}	maximální tloušťka třísky	[mm]
h_{eq}	ekvivalentní tloušťka třísky	[mm]
φ_{max}	úhel otočení kotouče	[°]
n_s	frekvence otáčení BK	[s ⁻¹]
$f_{\varphi_{max}}$	posuv stolu za φ_{max}	[mm/ φ_{max}]
v_{ft}	rychlost posuvu stolu	[m.min ⁻¹]
v_s	obvodová rychlost BK	[m.s ⁻¹]
a_e	hloubka broušení	[mm]
$\varnothing d_s$	průměr kotouče	[mm]

Tabulka 5. základní veličiny při broušení [2]

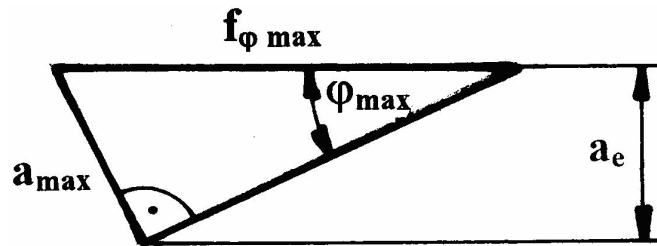
*BK – brousící kotouč

1.2.1 Výpočet veličin

Maximální tloušťka třísky a_{\max} :

Maximální tloušťku třísky lze vypočítat jako násobek míry posuvu stolu za určitý úhel pootočení brousícího kotouče a sinu tohoto úhlu.

$$a = f\varphi_{\max} \cdot \sin \varphi_{\max} \quad (1)$$



Obrázek 2. maximální tloušťka třísky

veličina	popis	jednotky
a_{\max}	maximální tloušťka třísky	[mm]
φ_{\max}	úhel otočení kotouče	[°]
$f\varphi_{\max}$	posuv stolu za φ_{\max}	[mm/ φ_{\max}]
a_e	hloubka broušení	[mm]

Tabulka 6. maximální tloušťka třísky

Ekvivalentní tloušťka třísky h_{eq} :

$$h_{eq} = f\varphi_{\max} \cdot \sqrt{\frac{a_e}{d_s}} \quad (2)$$

Ekvivalentní tloušťka třísky h_{eq} je podrobněji rozvedena v kapitole 3.

Úhel otočení brousícího kotouče φ_{\max} :

Úhel φ_{\max} :

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{d_s - 2a_e}{d_s} = 1 - \frac{2a_e}{d_s} \quad (3)$$

Pro výpočet malých úhlů platí vztah:

$$\varphi_{\max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{a_e}{d_s}} \quad (4)$$

Posuv stolu za určitý úhel pootočení brousícího kotouče $f\varphi_{\max}$:

Hodnota φ_{\max} závisí na poměru:

$$\frac{f\varphi_{\max}}{f_o} = \frac{f_{\max}}{2\pi} \Rightarrow f\varphi_{\max} = f_o \cdot \frac{f_{\max}}{2\pi} \quad (5)$$

veličina	popis	jednotky
f_o	posuv stolu za 1 otáčku BK	[mm/ot.BK]

Tabulka 7. posuv stolu

$$f_o = \frac{10^3 \cdot v_{ft}}{60 \cdot n_s} \quad (6)$$

Rychlost posuvu stolu v_{ft} :

$$v_{ft} = f_o \cdot 10^{-3} \cdot n_s \cdot 60 \quad (7)$$

veličina	popis	jednotky
n_s	frekvence otáčení BK	[s ⁻¹]

Tabulka 8. frekvence otáčení kotouče BK

Obvodová rychlost brousícího kotouče v_s :

$$v_s = \frac{L}{60 \cdot 10^3} \text{ [m/s]} \quad (8)$$

veličina	popis	jednotky
L	Délka dráhy obvodu BK za minutu	[mm/min]

Tabulka 9. délka dráhy obvodu BK

1.3 Brousící nástroje

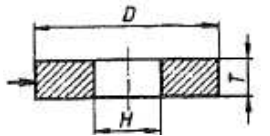
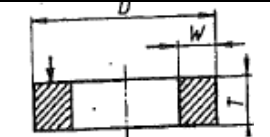
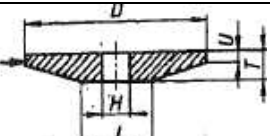
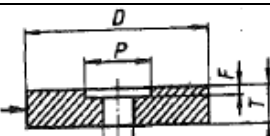
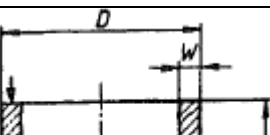
Brousící nástroje jsou tvořeny zrný brusiva, které je pevně vázáno do různých tvarů a tuhostí kotouče (brousící, řezací a drážkovací), brousících tělísek, superfinišovacích a honovacích kamenů, pilníků, pláten a papírů. Z těchto nástrojů mají největší rozsah brousící kotouče. [1]

1.4 Značení brousících kotoučů

Brousící kotouče se označují dle ČSN ISO 0525 (22 4503). Značení kotoučů odpovídá tvaru, rozměru, specifikaci složení a maximální obvodové rychlosti.

Příklad: „Pro plochý brousící kotouč, vnější průměr 300 mm, tloušťka 50 mm díra 76 mm, brousící materiál umělý korund, velikost zrna 36, tvrdost L, struktura 5, pojivo keramické, maximální obvodová rychlost 35 m.s⁻¹:“ [1]

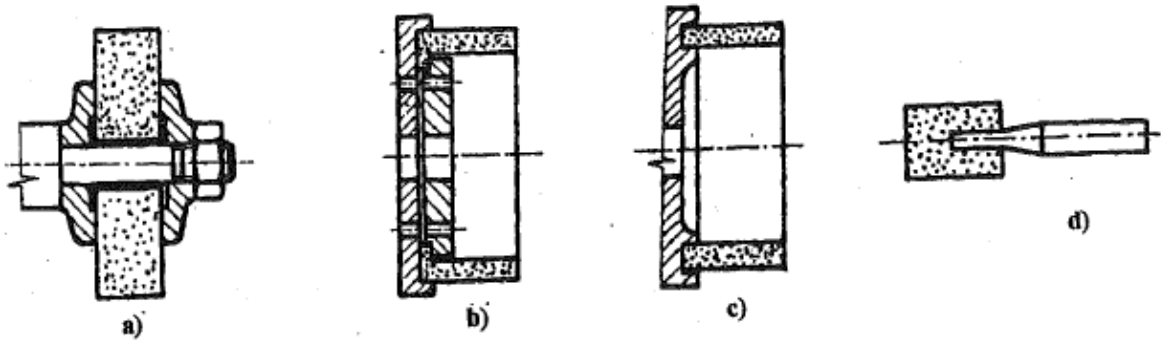
Typ kotouče 1-300x50x76-A36L5V-35m.s⁻¹

Typ	Vyobrazení	Označení - charakteristika
1		Kotouče ploché Typ 1 – profil – D x T x H
2		Kotouče prstencové Typ 2 – D x T x W
3		Kotouče jednostranně zkosené Typ 3 – D/J D x T /U... x
4		Kotouče s jednostranným vybráním Typ 5 – D x T x H – P..., F
5		Kotouče hrncovité Typ 6 – D x T x H – W..., E

Tabulka 10. Označování tvarů a rozměrů BK – výběr [1]

1.5 Upínání brousících kotoučů

K vřetenu brusky se brousící kotouče upínají nejčastěji mechanickým sevřením pomocí upínacích přírub, nebo lepením speciálními tmely.



Obrázek 3. Upínání brousících kotoučů [1]

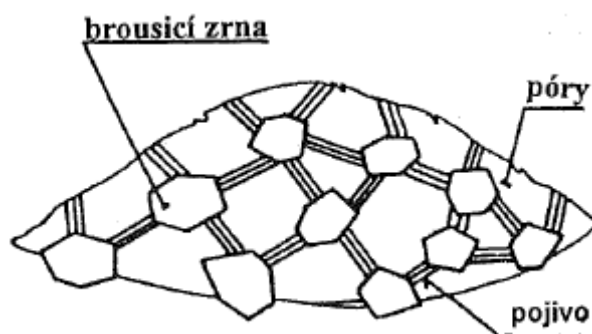
a,b – mechanické

c,d – lepením

1.6 Brousící materiály

Brousící materiál je tvořen zrnny ve formě:

- Volných zrn (brousící, lapovací a leštící prášky)
- Nanesených k pružnému podkladu (brousící a leštící plátna a papíry)
- Rozptýlených v mazadlech a tekutinách (brousící a leštící pasty)
- Zrn spojených pojivou v tuhá tělesa potřebného tvaru



Obrázek 4. Schématické znázornění stavby BK – řezné části a spojovací části

1.6.1 Standardní brousící materiály

Mezi technologicky nejrozšířenější brousící materiály patří Al_2O_3 (umělý korund, elektrolit) a SiC (karbidisilicium, karborundum). Vlastnosti BK volíme dle vlastností obráběného materiálu.

A99	60K	9	V	00/	50
Druh brousícího materiálu	Zrnitost, tvrdost	Struktura	Druh pojiva	Doplňující technologický znak	Maximální obvodová rychlost

Tabulka 11. Označení jakosti brousícího kotouče [2]

1.6.2 Druhy brousících materiálů

Volba druhu brusiva:

- Elektrokorund – (ocel, ocel na odlitky, temperované litiny, tvrdé bronzy)
- Karbid křemíku – (obrábění šedé litiny, mosazi, mědi, lehkých kovů a jejich slitin, slinutých karbidů, skla a keramiky)

[2]

Druh	Název	Využití
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	broušení 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	těž označován SG korund, broušení těžko obrobitelných materiálů s tvrdostí nad 60 HRC
K	Slinutý korund	dokončovací operace, obtahování ostří, honování, superfinišování

Tabulka 12. Druhy standardních brousících materiálů [2]

1.6.3 Zrnitost:

Volba závisí na požadované drsnosti broušeného povrchu. Jemná zrnitost = vysoké požadavky na drsnost povrchu. Hrubší zrnitost = větší úběr.

Zrnitost	Rozměr = v μm				
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	20	240	
Zvlášť jemná	280	320			

Tabulka 13. Zrnitost

[2]

1.6.4 Tvrdost brousícího materiálu

Tvrdost definuje jak je hmota brousícího nástroje soudržná a volí se v závislosti na způsobu broušení. Čím tvrdší broušený materiál a větší styčná plocha BK s brousící plochou, tím měkčí volíme BK.

Tvrdost	Značení			
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 14. Tvrdost

1.6.5 Struktura brousícího materiálu

Vyjadřuje vzdálenost mezi jednotlivými brousícími zrny. Čím vyšší číslo označení, tím je materiál pórovitější. Pro broušení houževnatých materiálů jsou vhodné kotouče pórovité. Hutné kotouče se používají k broušení tvrdých a křehkých materiálů.

Struktura	Značení (rozmezí)	
Velmi hutná	1	2
Hutná	3	4
Střední	5	6
Otevřená	7	8
Velmi otevřená	9	10
Zvlášť pórovitá	11	18
Vysokoporézní	10VS	18VS

Tabulka 15. Struktura

1.6.6 Pojivo

Vlastnosti pojiva ovlivňují samoostření brousícího nástroje

- Magnezitové pojivo – křehké kotouče pro jemný výbrus, tepelně neovlivňují součást
- Pojivo z umělé pryskyřice – odolnější kotouče pro hrubování, broušení vnějších i vnitřních ploch, rovinných ploch, řezání kovů, keramiky, kamene
- Pryžové pojivo – elastické nástroje pro čištění, leštění a jemné broušení
- Polyuretanové pojivo – jemné broušení a leštění
- Šelakové pojivo – tyto kotouče se používají jako leštící pro leštění kamene

Druh pojiva	Značení
Keramické	V
Umělá pryskyřice	B
Magnezitové	Mg
Pryžové	R

Tabulka 16. Druhy pojiva

2 KVANTIFIKACE ZÁVISLOSTI ENERGETICKÝCH FAKTORŮ BROUŠENÍ

Ukazatelem účinnosti brousícího procesu je **měrná energie** e_c . S rostoucí hodnotou e_c se zhoršuje řezivost BK.

$$e_c = \frac{F_c \cdot v_c}{Q_t} \quad [\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}] \quad (9)$$

veličina	popis	jednotky
F_c	tangenciální složka řezné síly	[N]
Q_t	objem obroušeného materiálu	[mm ³]
v_c	obvodová rychlost BK na max. průměru	[m.s ⁻¹]

Tabulka 17. veličiny pro výpočet měrné energie

Úběr materiálu za sekundu definuje **objemový výkon** U_t . S rostoucí hodnotou objemového výkonu roste i řezivost BK.

$$U_t = \frac{a_e \cdot b_D \cdot 10^3 \cdot v_w}{60} \quad [\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

veličina	popis	jednotky
a_e	hloubka broušení	[mm]
b_D	šířka BK	[mm]
v_w	obvodová rychlost obrobku	[m/min]

Tabulka 18. veličiny pro výpočet objemového výkonu [2]

Zvyšujeme-li řeznou rychlost a tečnou složku řezné síly, roste i vzniklé **teplo** Q .

$$Q = F_c \cdot v_c \quad [\text{J} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

Brusný poměr G se určuje z objemu odebraného materiálu V_m , který připadá na jednotku objemu zrna spotřebovaného k broušení V_s . S rostoucí hodnotou G se zlepšuje řezivost BK.

$$G = \frac{V_m}{V_s} \quad [-] \quad (12)$$

Součinitel účinnosti broušení η komplexně hodnotí vliv kvality brousícího kotouče, broušeného materiálu a řezné kapaliny při konstantních podmínkách. Udává kolik energie je zapotřebí k úběru 1 mm^3 broušeného materiálu. S rostoucí hodnotou součinitele účinnosti η se zlepšuje řezivost BK.

$$\eta = \frac{G}{e_c} [\text{mm}^3 \cdot \text{J}^{-1}] \quad (13)$$

Součinitel broušení BK μ vyjadřuje poměr mezi řeznou silou F_c a pasivní F_p při broušení.

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

Pasivní síla F_p limituje tuhost soustavy. Při broušení s rostoucí hodnotou F_p klesá tuhost soustavy.

$$F_p \sim (1,0 \div 3,0) \cdot F_c [\text{N}] \quad (15)$$

Množství tepla procházející plochou 1 m^2 obrobku definuje **hustota tepelného toku φ_w** .

$$\varphi_w = \frac{F_c \cdot v_c \cdot q_w \cdot 10^7}{A_D} [\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (16)$$

veličina	popis	jednotky
q_w	podíl tepla přecházejícího do obrobku	[%]
A_D	nominální plocha řezu	$[\text{mm}^2]$

Tabulka 19. veličiny pro výpočet hustoty tepelného toku

Čím menší je **teplota třísek t_t** , tím je kvalita broušení zpravidla vyšší.

$$t_t = \frac{6 \cdot 10^5 \cdot P_{ef} \cdot q_t}{v_w \cdot f_a \cdot a \cdot \rho \cdot c} + 20 [^\circ\text{C}] \quad (17)$$

veličina	popis	jednotky
P_{ef}	efektivní výkon	[kW]
q_t	podíl tepla přecházejícího do třísky	[mm]
f_a	šířka broušené plochy	[mm]
ρ	hustota broušeného kovu	$[\text{kg}/\text{dm}^3]$
c	měrná tepelná kapacita	$[\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}]$

Tabulka 20. veličiny pro výpočet teploty třísek

[2]

2.1 Tepelné jevy

Při broušení vzniká vlivem intenzivní plastické deformace odřezávané vrstvy a třením mezi brusnými zrny a povrchem obrobku mechanická energie. Tato mechanická energie se spotřebovává v oblastech řezání a přeměňuje se zde na teplo, čímž se tato plocha intenzivně zahřívá. Odvedené teplo můžeme definovat pomocí rovnice:

$$Q_e = Q_o + Q_k + Q_t + Q_{ch} + Q_v \quad [J] \quad (18)$$

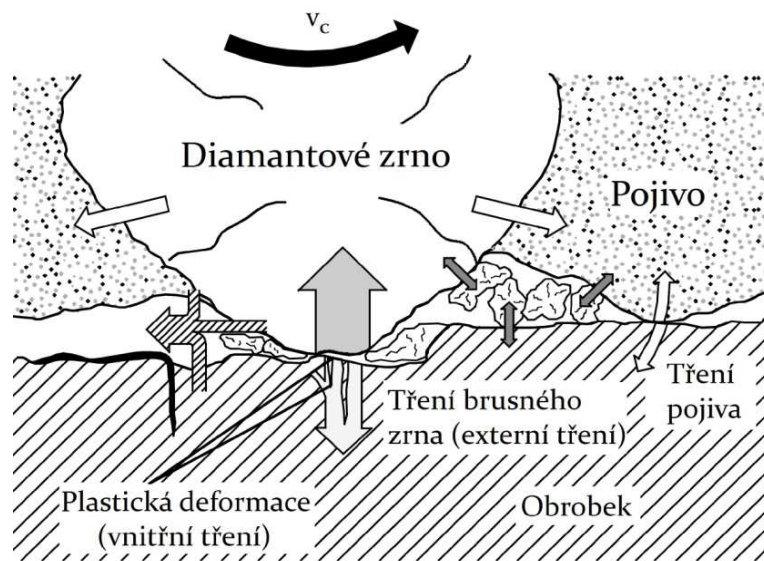
kde: Q_o - teplo odvedené do obrobku, (60÷80%)

Q_k - teplo přestupující do kotouče, (10 ÷13%)

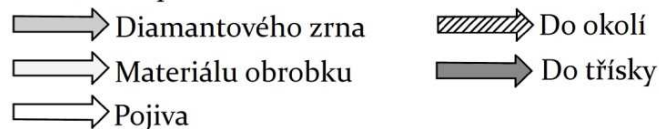
Q_t - teplo odcházející třískami, (5÷30%)

Q_{ch} - teplo odebírané řeznou kapalinou

Q_v - teplo vyzářené do okolí (nejmenší část)



Proudění tepla do:



Obrázek 5. Přestup tepla při broušení tvrdých a křehkých materiálů

U broušení rozeznáváme:

- a) okamžitou teplotu, která je v místě záběru zrna brusiva a dosahuje vysokých hodnot jen po krátkodobě
- b) stykovou teplotu, která je v oblasti kontaktu kotouče s obrobkem
- c) střední teplotu, která je ustálená na obrobeném povrchu

Teplu v místě obrábění intenzivně přestupuje do obrobku, proto je v místě broušení (s použitím procesní kapaliny) styková teplota o mnoho nižší než okamžitá. S postupným opotřebením brousícího kotouče roste i vznikající teplo.

„Vznik a rozdělení tepla při broušení závisí na všech těchto podmínkách broušení: Na typu kotouče, řezných podmínkách, mechanických a fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, vlastnostech řezné kapaliny. Zvětší-li se zatížení zrna, vzniká v místě jeho řezu větší množství tepla za časovou jednotku a zvyšuje se teplota. Zatížení na zrno se zvyšuje při zvýšení obvodové rychlosti obrobku a podélného i příčného posuvu. Jednotlivé činitele (řezná rychlost apod.) ovlivňují tepelné jevy při broušení komplikovaně. Např. zvýší-li se řezná rychlost, zmenšuje se tloušťka ubírané vrstvy, zvětšuje se množství tepelných impulsů, ale současně se zkracuje doba jejich působení a mění se podmínky tření zrn brusiva po obráběné ploše. V důsledku vzájemného působení všech těchto činitelů se teplota obrobku při zvýšené řezné rychlosti zvyšuje.“ [3]

Teplotu při broušení lze snížit zmenšením intenzity působení zdrojů tepla a jeho intenzivnějším odváděním.

Toho lze dosáhnout několika způsoby:

1. technologicky - výběrem optimálního způsobu broušení, vhodným typem brousícího kotouče, řezných podmínek, vhodné řezné kapaliny.
2. konstrukčně – vhodnou konstrukcí kotoučů pro dané podmínky obrábění, zdokonalováním čistících a chladících zařízení pro řeznou kapalinu.

2.2 Termodynamické jevy při broušení

Při teoretické analýze broušení tvoří termodynamickou soustavu obrobek, obroušené elementy kovu a brousící kotouč. Veličiny, které charakterizují stav soustavy jsou práce, řezání, teplo, teplota, hmotnost a řezné prostředí. Při interakci soustavy s okolím dochází ke stavovým změnám, soustava přechází z nestabilního počátečního stavu do stavu konečného.

Množství tepla Q vzniklého přeměnou práce broušení, při aplikaci řezné síly:

$$Q = k_c \cdot A_D \cdot v_c \quad (19)$$

veličina	popis	jednotky
k_c	měrná řezná síla	[MPa]

Tabulka 21. veličiny pro výpočet množství tepla

Vzniklé teplo Q je odváděno třískami, obrobkem, chladicí kapalinou (prostředím) a brousícím kotoučem. 2% celkové práce řezání se spotřebuje na deformaci mřížky a vytvoření nových povrchů, 98% práce se přemění v teplo.

Teplo odváděné třískami Q_t :

$$Q_t = F_c \cdot v_c \cdot \frac{q_t}{10^2} \cdot 60 = m_t \cdot c \cdot (t_1 - t_0) \quad [\text{J} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (20)$$

veličina	popis	jednotky
m_t	hmotnost třísek	[Kg.min ⁻¹]

Tabulka 22. veličiny pro výpočet tepla odváděného třískami

Teplota třísek t_t , úpravou z rovnice (20):

$$t_t = \frac{F_c \cdot v_c \cdot \frac{q_t}{10^2} \cdot 60}{m_t \cdot c} + t_o \quad [^\circ\text{C}] \quad (21)$$

Teplo přecházejícího do obrobku Q_w :

$$Q_w = \varphi_w \cdot \frac{A_D}{10^6} = \frac{P_c \cdot q_w \cdot 10^7}{A_D} = P_c \cdot q_w \cdot 10 \quad [\text{J} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (22)$$

veličina	popis	jednotky
q_w	množství tepla přecházejícího do obrobku	[%]

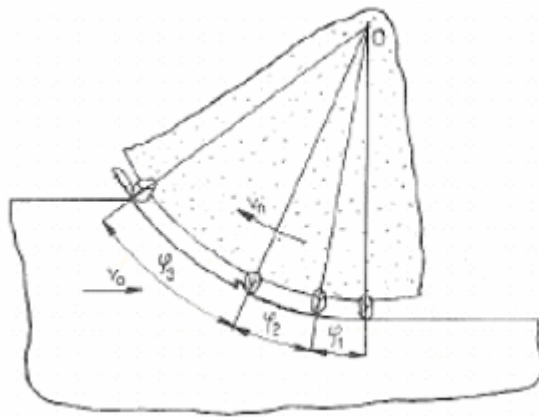
Tabulka 23. veličiny pro výpočet tepla přecházejícího do obrobku [2]

3 EKVIVALENTNÍ TLOUŠŤKA TŘÍSKY

3.1 Tvorba třísky

Tříška je charakteristickým produktem procesu obrábění. Tříška vzniká působením nástroje na obrobek a je ovlivněna vlivem topografií brousícího kotouče, geometrií zrn, ohřevem obrobku v místě broušení a proměnlivou hloubkou odřezávané vrstvy.

V kontaktní zóně, mezi obrobkem a brousícím kotoučem prochází každé zrno odřezávající materiál třemi stádii. Pružnou deformací povrchu, plastickou deformací povrchu a odebíráním třísky. Zkoumáním těchto oblastí pomocí experimentálních metod lze o tvorbě třísky získat spolehlivé informace o specifikaci procesu tvoření třísky.



Obrázek 6. fáze broušení [4]

α_1 - pružná deformace

α_2 - plastická deformace

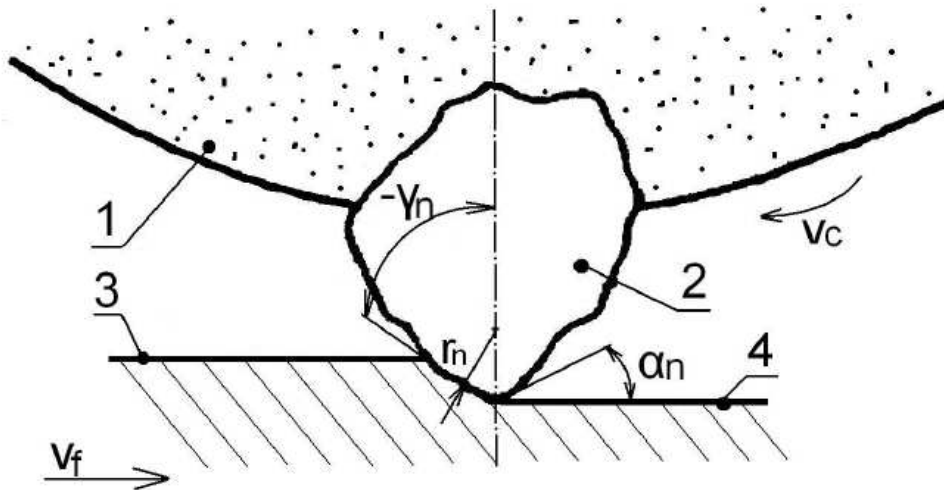
α_3 - tvorba třísky

Broušení je charakteristické specifickými podmínkami tvorby třísky a vzniku obrobeného povrchu. Důsledkem plastických deformací vnějšího i vnitřního tření se část třísky zahřívá natolik, že se roztaví nebo shoří. Brousící zrna jsou nepravidelných geometrických tvarů, jsou velmi tvrdá a vysoce odolná vůči teplotním vlivům. Mají nepravidelné poloměry zaoblení ostří r_n v řádech tisíců milimetrů, negativní úhel čela γ_n a poměrně velký úhel hřbetu α_n . Rychlost při broušení je určena obvodovou rychlostí brousícího kotouče. Rychlost posuvů obrobku nebo kotouče mají na rychlost řezného pohybu zanedbatelný vliv.

Obvodová rychlost brousícího kotouče v_s :

$$v_s = \frac{L}{60 \cdot 10^3} \quad (23)$$

Model záběru vázaného brousícího zrna:



Obrázek 7. Model záběru brousícího zrna [1]

veličina	popis	jednotky
v_c	řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
v_f	posunová rychlost	[mm.min ⁻¹]
γ_n	normálový úhel čela	[°]
α_n	normálový úhel hřbetu	[°]
r_n	poloměr zaoblení ostří	[mm]
1	brousící kotouč	[-]
2	brousící zrno	[-]
3	obráběná plocha	[-]
4	obrobená plocha	[-]

Tabulka 24. Legenda k obrázku 5

Řezná rychlost v_c je při běžném broušení 30-35m.s⁻¹, při rychlostním broušení se přesahuje rychlost 80m.s⁻¹ až do 180m.s⁻¹, proto je nutno použít kotouč se speciálním druhem pojiva.

Řezná rychlost v_c :

$$v_c = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{1000} [m \cdot s^{-1}] \quad (24)$$

veličina	popis	jednotky
d_s	průměr BK	[mm]
n_s	frekvence otáčení BK	[min ⁻¹]

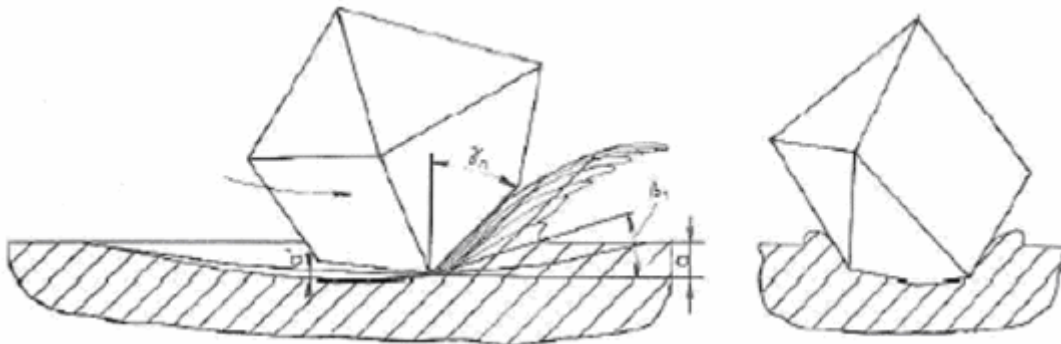
Tabulka 25. Veličiny pro výpočet řezné rychlosti

Obvodová rychlost obrobku:

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{1000} [m \cdot \text{min}^{-1}] \quad (25)$$

veličina	popis	jednotky
d_w	průměr obrobku	[mm]
n_w	frekvence otáčení obrobku	[min ⁻¹]

Tabulka 26. Veličiny pro výpočet obvodové rychlosti [1]



Obrázek 8. Model tvorby třísky při broušení [4]

veličina	popis	jednotky
β_1	mez plastické deformace	[°]
a	vrstva proměnlivé tloušťky odřezávané vrstvy	[mm]

Tabulka 27. Legenda k obrázku 6

Intenzita deformace je ovlivněna geometrií zrna, jeho polohou a třením mezi brousícím kotoučem a obráběným materiálem. Průřez třísky je závislý na okamžité tloušťce odřezávané vrstvy. Okolo tvořící se třísky ve směru pohybu zrna se příčně vytlačí materiál. Strana třísky, která je obrácená k brousícímu zrně je lesklá, zadní má vyústující smykové

stopy v tříse. Morfologie broušeného povrchu je způsobena drážkami po brousících zrnech a stopami po plastickém vytlačení materiálu z drážek.

Kvůli plastickým deformacím tvoření třísky dochází k pěchování třísky, tzn., že průřez třísky je větší než průřez odřezávaného materiálu a tříska se zkracuje. Velikost této deformace můžeme vyjádřit pomocí součinitele pěchování třísky. [4]

Pro výpočet součinitele pěchování třísky vycházíme z rovnosti objemů odřezávané vrstvy a realizované třísky:

$$A_D \times v_c = A_{Dc} \times v_t \quad (26)$$

veličina	popis	jednotky
A_D	jmenovitý průřez třísky	[mm ²]
A_{Dc}	plocha průřezu třísky	[mm ²]
v_c	řezná rychlost	[m.s ⁻¹]
v_t	rychlost třísky	[m.min ⁻¹]

Tabulka 28. Veličiny pro výpočet součinitele pěchování třísky

Vzorec pro součinitele pěchování třísky Λ :

$$\Lambda = \frac{A_{Dc}}{A_D} = \frac{v_c}{v_t} \quad (27)$$

[4]

3.2 Typy třísek

Tvar a velikost třísky je jsou důležité vlastnosti pro následující manipulaci. Podle tvaru rozlišujeme třísky na plynulé (stuhovité, spirálové), článkovité a elementární (drobené). Tvar třísky je závislý na použitém materiálu nástroje a obrobku, geometrií nástroje, technologií obrábění a řeznými podmínkami. Nejvyšší tříška je plynulá, ale z hlediska následné manipulace je nejvýhodnější tříška drobená. Pro kvalifikaci vhodnosti třísky k její následné manipulaci slouží objemový součinitel třísek W .

[1]




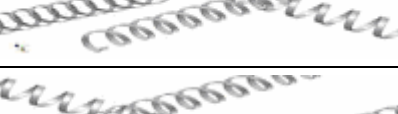


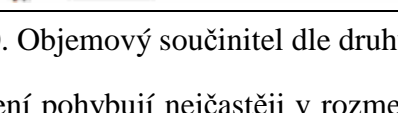
Objemový součinitel třísek W :

$$W = \frac{V_t}{V_m} \quad (28)$$

veličina	popis	jednotky
V_t	objem volně ložených třísek	$[\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$
V_m	objem odebraného materiálu	$[\text{mm}^3]$

Tabulka 29. Veličiny pro výpočet objemového součinitele třísek W .

Tvar třísky můžeme ovlivnit pomocí tzv. tvarovače nebo lamače třísek, taktéž se používá lomeného ostří.

typ třísky	tvar třísky	W
drobená		4-6
obloukovité spojené		8-10
spirálové ploché		10-20
vinuté krátké		40-60
vinuté dlouhé		80-150
stuhové smotané		300-400
stuhové dlouhé		400 +

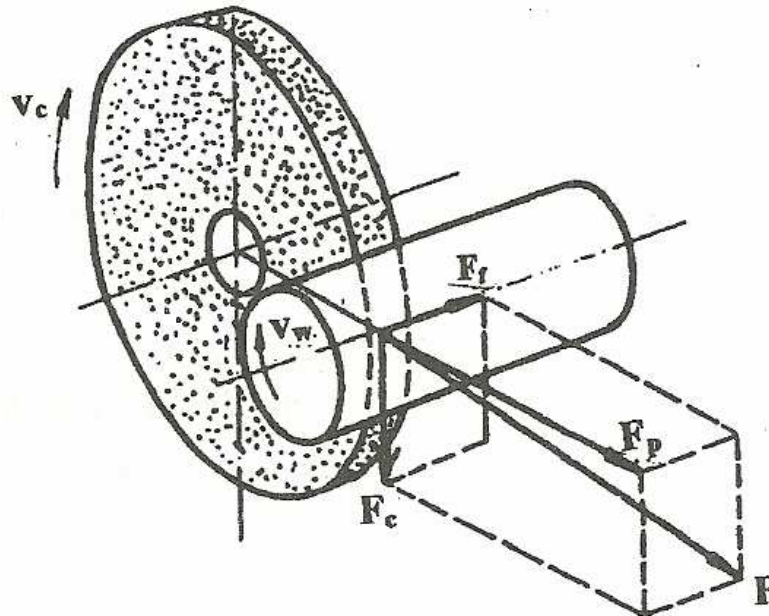
Tabulka 30. Objemový součinitel dle druhu třísek [1]

Rozměry třísky se u broušení pohybují nejčastěji v rozmezí 0,0001 až 0,002 mm². Takto malé třísky je možné odpravit přímo kapalinou, a proto není třeba používat dopravníky.

3.3 Řezné síly

Řezné síly při broušení vznikají kontaktem aktivní plochy kotouče s obrobkem. Každé zrnko odebírá z obrobku zanedbatelné množství materiálu, kterému odpovídají elementární řezné síly, které však mohou dosahovat v důsledku velkého množství zrn značně velké síly. S narůstající řeznou silou roste teplota broušení, brousící kotouč více opotřebovává a snižuje se přesnost obrábění i kvality obrobku. Řezné síly narůstají především z těchto důvodů:

- snižování obvodové (řezné) rychlosti kotouče
- snižování koncentrace zrn a zrnitosti
- zvyšování pracovního záběru
- zvyšování obvodové rychlosti obrobku
- zvyšování posunové rychlosti



Obrázek 9. Rozložení řezných sil při obvodovém axiálním broušení do kulata [1]

veličina	popis	jednotky
F	celková řezná síla	[N]
F_f	posuvová síla	[N]
F_c	tangenciální řezná síla	[N]
F_p	pasivní řezná síla	[N]
v_c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
v_w	obvodová rychlost	[m·min ⁻¹]

Tabulka 31. Legenda k obrázku 7

Celková řezná síla F působí mezi kotoučem a obrobkem a je výslednicí tří vzájemně kolmých směrů tangenciální (řezné) síly F_c (způsobuje odřezávání třísky), radiální (pasivní) síly F_p (přitlačuje brusné zrna k obráběné ploše) a axiální (posuvové) síly F_f . Řezná síla působí ve směru podélného posuvu (kolmo na rovinu kotouče).

$$\text{Platí: } F_p > F_c > F_f \text{ a } F_p/F_c = 1,2 \text{ až } 3 \quad (29)$$

Velikost řezné síly F_c můžeme orientačně zjistit pomocí experimentální rovnice:

$$F_c = 25 \cdot (V_w \cdot f_a)^{0,6} \cdot a_e^{0,5} \quad [N] \quad (30)$$

veličina	popis	jednotky
V_w	obvodová rychlost obrobku	[m.min ⁻¹]
f_a	axiální posuv stolu na otáčku obrobku	[mm]
a_e	pracovní (radiální) záběr	[mm]

Tabulka 32. Veličiny pro orientační výpočet řezné síly

Nebo z rovnice:

$$F_c = k_c \cdot A \quad [N] \quad (31)$$

veličina	popis	jednotky
k_c	měrná řezná síla	[MPa]
A	průřez odebírané vrstvy	[mm ²]

Tabulka 33. Veličiny pro výpočet řezné síly v závislosti na odebírané vrstvě

Měrná řezná síla k_c má hodnoty:

Pro ocel: $k_c = 10\,000$ až $35\,000$ MPa

Pro litinu: $k_c = 4\,000$ až $12\,000$ MPa

Průřez odebírané vrstvy A se vyjadřuje v závislosti na způsobu broušení.

Pro obvodové axiální vnější broušení do kulata:

$$A = a_e \cdot h_{eq} \quad [mm^2] \quad (32)$$

veličina	popis	jednotky
a_e	pracovní radiální záběr	[mm]
h_{eq}	tloušťka třísky	[mm]

Tabulka 34. Veličiny pro výpočet průřezu odebírané vrstvy (axiální broušení)

Pro rovinné obvodové tangenciální broušení s přímočarým pohybem stolu:

$$A = b_D \cdot h_{eq} \quad [mm^2] \quad (33)$$

veličina	popis	jednotky
b_D	šířka aktivní části BK	[mm]

Tabulka 35. Veličiny pro výpočet průřezu odebírané vrstvy (tangenciální broušení)

3.4 Teplo v tříse

S rostoucí řeznou rychlostí roste množství tepla v tříse nerovnoměrně, protože při vyšších řezných rychlostech se množství tepla zvyšuje velmi pomalu. Teploty v tříse jsou nerovnoměrné, protože plastická deformace není rovnoměrně rozložená po celém průřezu odřezávané vrstvy. Ze závislosti trvanlivost opotřebení nástroje na teplotě vyplývá, že střední teplota třísky a trvanlivost nástroje na sobě nezávisí. Když zvýšíme 5x řeznou rychlost, střední teplota třísky se zvětší asi jen o třetinu. [3]

3.5 Ekvivalentní tloušťka třísky h_{eq}

Ekvivalentní tloušťka třísky vztažená na jednotku aktivní části kotouče se obecně vyjádří vztahem:

$$h_{eq} = \frac{Q_w}{b_D \cdot v_c} \quad (37)$$

veličina	popis	jednotky
Q_w	(objemový výkon)	[mm ³ .s ⁻¹]

Tabulka 36. Veličiny k výpočtu h_{eq}

[1]

Kde:

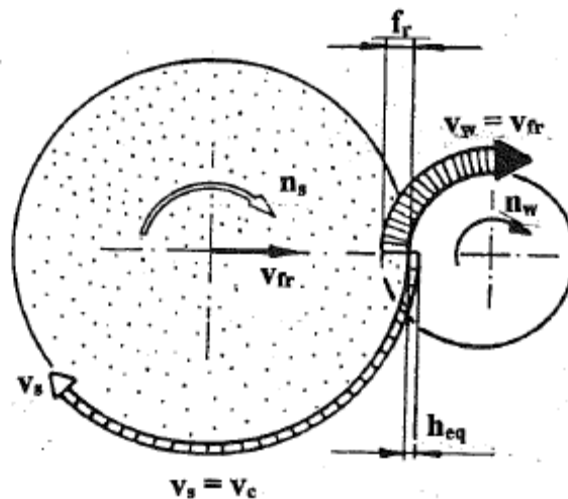
$$Q_w = \frac{\Delta V_w}{\Delta t} \quad (38)$$

veličina	popis	jednotky
ΔV_w	odebraný materiál za časový interval	[kg/min]

Tabulka 37. Veličiny pro výpočet rychlosti odebrání materiálu

Pro obvodové radiální broušení do kulata je hodnota ekvivalentní tloušťky třísky broušení h_{eq} závislá na radiálním posuvu stolu f_r a poměrech sil, znázorněných na obrázku 10.

$$h_{eq} = \frac{V_w}{60 \cdot v_c} \cdot f_r \quad [mm] \quad (39)$$



Obrázek 10. Obvodovém radiálním broušení do kulata

Při obvodovém broušení do kulata s radiální rychlostí posuvu stolu v_{fr} platí:

$$h_{eq} = \frac{v_{fr}}{60 \cdot v_c \cdot n_w} \quad (40)$$

[1]

PRAKTICKÁ ČÁST

4 ANALÝZA TEPLOTNÍCH POLÍ BROUSÍHO KOTOUČE A BROUŠENÉHO POVRCHU

4.1 Cíle bakalářské práce

Teoretická část mé bakalářské práce se vztahuje na vymezení základních veličin při broušení, kvantifikací závislostí energetických faktorů broušení a ekvivalentní tloušťku třísky. Cílem praktické části bylo provést měření a zhotovit analýzu teplotních polí broušícího kotouče a broušeného povrchu. Při měření byly porovnávány čtyři brousící kotouče při stejných technologických podmínkách a zjišťovány **následující parametry**:

- řezná síla F_p
- řezná síla F_c
- efektivní výkon P_{ef}

4.2 Měření:

4.2.1 Technologické podmínky

Experimentální měření byly provedeny na brusce BRH 20.03F rovinným broušením, při řezné rychlosti $v_c=32,0\text{m/s}$ a posuvové rychlosti $v_f= 21,0\text{m/min}$. Experiment byl proveden pro radiální hloubky záběru [mm]:

- 0,005
- 0,01
- 0,02
- 0,04

4.2.2 Broušený materiál

Jako broušený materiál k účelům mého experimentu byla zvolena Ocel 14 109. Jakožto ocel třídy 14 mezi nejdůležitější legované oceli. Obsahuje cca 1,1%C, 0,8 až 1,6%Cr a cca 1%Mn. Je vysoce tvrdá a pevná v tlaku. Díky svým vlastnostem se používá k výrobě valivých ložisek. [5]

4.2.3 Brousící kotouče

K experimentu byly zvoleny vysoce pórovité brousící kotouče o rozměrech 250 x 20 x 76 mm.

číslo kotouče	zrno	typ	struktura
120	bílý korund	A99B 80I	12VS
121	AG92 10%	AG92/99 80I	12VS
123	AG92 30%	mikrokrytalický bílý korund	12VS
125	AG92 50%		12VS

Tabulka 39. Použité brousící kotouče

4.2.4 Přístroje použité k měření

- *Dynamický vyvažovací přístroj B2013:*



Obrázek 12. Dynamický vyvažovací přístroj B2013 [6]

Každý kotouč byl před experimentem vyvážen , aby bylo zamezeno kmitání, které má za následek zhoršení jakosti broušené plochy.

- Bruska BR 20.03.F

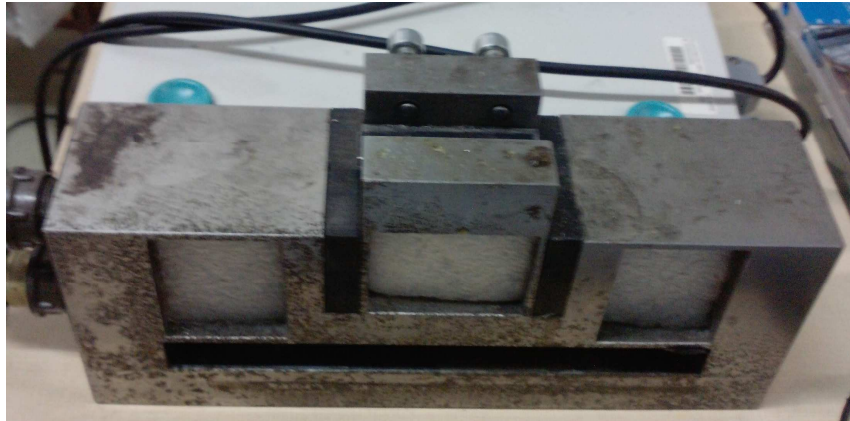


Obrázek 13. Bruska BRH 20.03 F [6]

Pracovní plocha stolu	200 x 630 mm
Rozměry brousícího kotouče	250 x 20 – 50 x 76 mm
Rychlost stolu regulovatelná	1 – 30 m.min ⁻¹
Otáčky brousícího vřetena	2550 min ⁻¹

Tabulka 40. Základní parametry brusky [7]

- *Dynamometr, měřící rozsah 0-500N*



Obrázek 14. Dynamometr, měřící rozsah 0-500N [6]

Na pracovní stůl brusky BRH 20.03.F byl magneticky upevněn dvousložkový tenzometrický dynamometr, ve kterém byl upnut použitý materiál (Ocel 14 109).

- *Měřící aparatura Spider 8 (Hotlinger Baldwin Messtechnik)*



Obrázek 15. Spider 8 [8]

Pomocí měřícího přístroje Spider 8, který byl připojen k dynamometru a softwaru v PC bylo možno zobrazit řezné síly F_p a F_c .

- *Efektivní výkon lze získat pomocí přístroje Wattreg nebo z rovnice:*

$$P_{ef} = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3} \quad [\text{kW}] \quad (43)$$

4.2.5 Postup

- Při broušení byla rychlost posuvu v_f konstantních 21 m/min
- Řezná rychlost v_c měla konstantní hodnotu 32 m/s
- Radiální záběry měly hodnoty; 0,005, 0,01, 0,02 a 0,04mm

Těmto technologickým podmínkách byly podrobeny všechny čtyři testované kotouče. Pomocí rovnice (43) byly vypočteny hodnoty P_{ef} . Naměřené hodnoty F_p a F_c byly zaznamenány pomocí měřicího přístroje Spider 8 a softwaru v PC. Dále byly tyto hodnoty statisticky zpracovány v programu Excel. V tomto programu byly následně vyhodnoceny a graficky zpracovány závislosti efektivního výkonu P_{ef} a tečné síly F_c na radiálním záběru a_e .

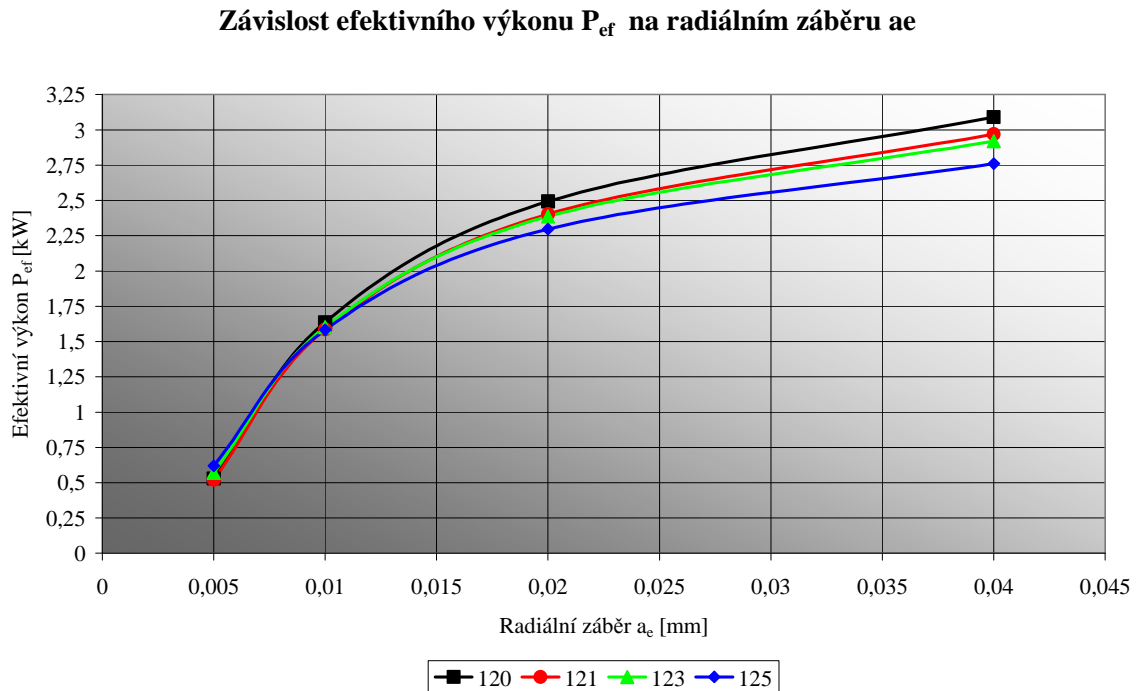
Pracovní číslo zkoušky	Číslo kotouče	BK 250x20x76 mm	Hloubka řezu [mm]	Řezná síla F_p [N]	Řezná síla F_c [N]	Efektivní výkon P_{ef} [kW]
1	120	A99B 80I 12VS keramické pojivo	0,005	31,5	16,6	0,53
2	zrno bílý		0,01	86,67	51,41	1,64
3	korund		0,02	141,84	78,21	2,49
4	0%		0,04	197	97	3,1
5	121 zrno AG92 10%	AG92/99 80I 12 VS mikrokystalický bílý korund keramické pojivo	0,005	32,2	16,3	0,52
6			0,01	85,44	49,8	1,59
7			0,02	138,67	75,3	2,4
8			0,04	191,9	92,8	2,97
9	123 zrno AG92 30%		0,005	34,3	17,7	0,57
10			0,01	86,27	50,57	1,6
11			0,02	138,24	75,43	2,39
12			0,04	190,2	91,3	2,92
13	125 zrno AG92 50%	0,005	40,3	19,3	0,62	
14		0,01	91,8	49,67	1,58	
15		0,02	143,3	72,04	2,3	
16		0,04	194,8	86,4	2,76	

Tabulka 41. Naměřené hodnoty

4.2.6 Grafické vyjádření

V následujících grafech jsou porovnávána chování všech čtyřech testovaných kotoučů, které byly vystaveny stejným technologickým podmínkám.

Závislost efektivního výkonu P_{ef} na radiálním záběru a_e

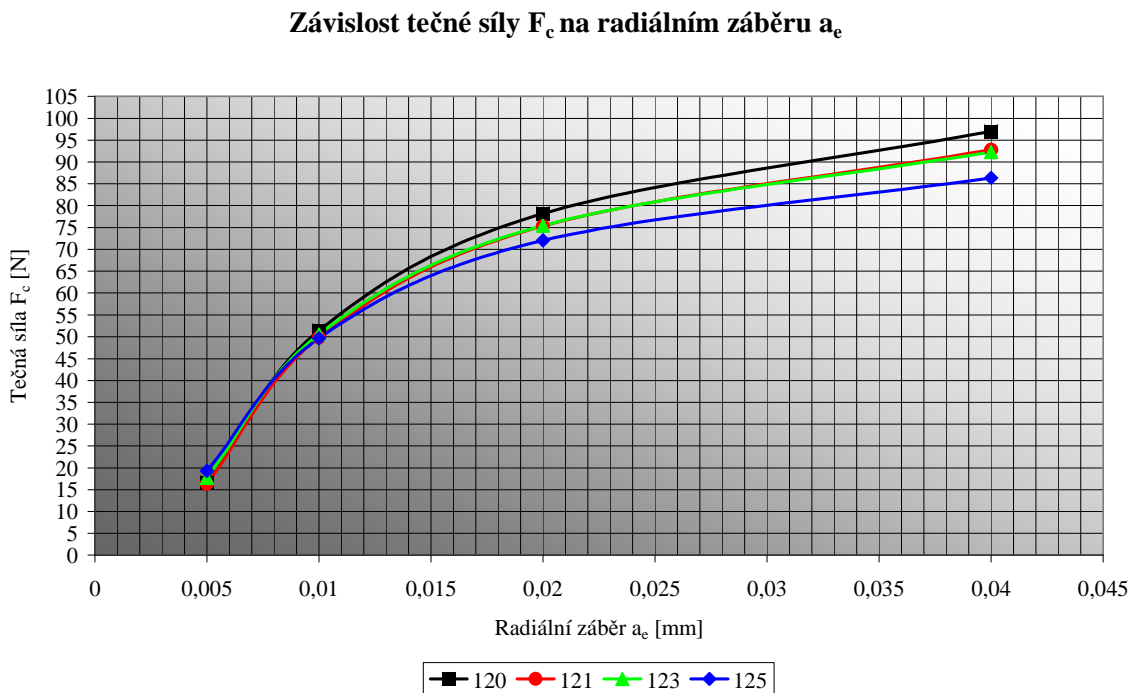


Obrázek 16. Graf závislost efektivního výkonu P_{ef} na radiálním záběru a_e

Materiál. ČSN 14 109.4		Závislost $P_{ef} = f(a_e)$	
Číslo kotouče	Brousící kotouč	Sinterkorund	$v_f = 21,0 \text{ m/min}, v_c = 32,0 \text{ m/min}$
120	A99B 80L 12VS	0%	$a_e = 0,005 \text{ mm} \quad P_{ef} = 1,2316 \text{Ln}(a_e) + 7,1823$
121	AG92/99 80I 12VS	10%	$a_e = 0,005 \text{ mm} \quad P_{ef} = 1,1782 \text{Ln}(a_e) + 6,8872$
123	AG92/99 80I 12VS	30%	$a_e = 0,005 \text{ mm} \quad P_{ef} = 1,1301 \text{Ln}(a_e) + 6,6824$
125	AG92/99 80I 12VS	50%	$a_e = 0,005 \text{ mm} \quad P_{ef} = 1,0291 \text{Ln}(a_e) + 6,1975$

Tabulka 42. Analytická formulace závislosti na obrázku 16.

Závislost tečné síly F_c na radiálním záběru a_e :



Obrázek 17. Graf závislost tečné síly F_c na radiálním záběru a_e

Materiál. ČSN 14 109.4			Závislost $F_c = f(a_e)$
Číslo kotouče	Brousící kotouč	Sinterkorund	$v_f = 21,0 \text{ m/min}, v_c = 32,0 \text{ m/min}$
120	A99B 80L 12VS	0%	$a_e = 0,005\text{mm} \quad F_c = 38,664\text{Ln } a_e + 225,46$
121	AG92/99 80I 12VS	10%	$a_e = 0,005\text{mm} \quad F_c = 36,789\text{Ln}(a_e) + 215,22$
123	AG92/99 80I 12VS	30%	$a_e = 0,005\text{mm} \quad F_c = 35,875\text{Ln}(a_e) + 211,78$
125	AG92/99 80I 12VS	50%	$a_e = 0,005\text{mm} \quad F_c = 32,268\text{Ln}(a_e) + 194,27$

Tabulka 43. Analytická formulace závislosti na obrázku 17

4.2.7 Kvantifikace efektivity procesu broušení

Měrná energie broušení:

$$e_c = \frac{F_c \cdot v_c}{Q_w} \quad [\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}] \quad (44)$$

veličina	popis	jednotky
v_c	obvodová rychlost BK na max. průměru	$[\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
Q_w	objemový výkon	$[\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$

Tabulka 44. Veličiny pro výpočet měrné energie broušení

Objemový výkon:

$$Q_w = a_e \cdot b_D \cdot 10^3 \cdot v_w \quad [\text{mm}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (45)$$

veličina	popis	jednotky
b_D	šířka broušení	[mm]
v_w	rychlost obrobku	[m/min]

Tabulka 45. Veličiny pro výpočet objemového výkonu

Ekvivalentní tloušťka broušení:

$$h_{eq} = \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot a_e \quad (46)$$

Součinitel řezivosti BK:

$$\xi = \frac{F_p}{F_c} \quad (47)$$

Součinitel broušení BK:

$$\mu = \frac{F_c}{F_p} \quad (47)$$

Mat. ČSN 14 109.4		Sintrovaný korund			
		BK			
Veličina	Symbol	0% A99B 80L 12VS	10% AG92/99 80I 12VS	30% AG92/99 80I 12VS	50% AG92/99 80I 12VS
Radiální záběr	a_e [mm]	0,005	0,005	0,005	0,005
Efektivní výkon	P_{ef} [kW]	0,53	0,52	0,57	0,62
Pasivní složka řezné síly	F_p [N]	31,5	32,2	34,3	40,3
Tangenciální složka řezné síly	F_c [N]	16,6	16,3	17,7	19,3
Měrná energie broušení	e_c [J/s.m ²]	0,34	0,33	0,36	0,39
Objemový výkon	Q_w [mm ³ /min ⁻¹]	1575	1575	1575	1575
Ekvivalentní tloušťka broušení	h_{eq} [mm]	5,47E-05	5,47E-05	5,47E-05	5,47E-05
Součinitel řezivosti BK	ξ	1,90	1,98	1,94	2,09
Součinitel broušení BK	μ	0,53	0,51	0,52	0,48

Tabulka 46. Vypočtené hodnoty pro $a_e = 0,005\text{mm}$

Mat. ČSN 14 109.4		Sintrovaný korund			
		BK			
Veličina	Symbol	0% A99B 80L 12VS	10% AG92/99 80I 12VS	30% AG92/99 80I 12VS	50% AG92/99 80I 12VS
Radiální záběr	a_e [mm]	0,04	0,04	0,04	0,04
Efektivní výkon	P_{ef} [kW]	3,09	2,97	2,92	2,76
Pasivní složka řezné síly	F_p [N]	197,00	191,94	190,20	194,80
Tangenciální složka řezné síly	F_c [N]	97,00	92,80	91,30	86,40
Měrná energie broušení	e_c [J/s.m ²]	0,25	0,24	0,23	0,22
Objemový výkon	Q_w [mm ³ /min ⁻¹]	12600	12600	12600	12600
Ekvivalentní tloušťka broušení	h_{eq} [mm]	4,38E-04	4,38E-04	4,38E-04	4,38E-04
Součinitel řezivosti BK	ξ	2,03	2,07	2,06	2,25
Součinitel broušení BK	μ	0,49	0,48	0,49	0,44

Tabulka 47. Vypočtené hodnoty pro $a_e = 0,04\text{mm}$

4.2.8 Analýza termodynamických jevů

Množství tepla vznikajícího při procesu broušení přeměnou mechanické energie je 98% z P_{ef} :

$$Q = F_c \cdot v_c \cdot 0,98 \quad [\text{J} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (48)$$

Teplo odváděné třískami:

$$Q_t = F_c \cdot v_c \cdot 0,98 \cdot \frac{q_t}{10^2} \cdot 60 \quad [\text{J} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (49)$$

Teplota třísek:

$$t_t = \frac{F_c \cdot v_c \cdot \frac{q_t}{10^2} \cdot 60}{m_t \cdot c} + t_0 \quad (50)$$

Nominální plocha řezu:

$$A_D = f_a \cdot h_{eq} \quad [\text{mm}^2] \quad (51)$$

Hustota tepelného toku:

$$\varphi_w = \frac{P_c \cdot q_w}{A_D} \cdot 10^7 \quad [\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (52)$$

Množství tepla přecházejícího do obrobku:

$$Q_w = P_c \cdot q_w \cdot 10 \quad [\text{J} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (53)$$

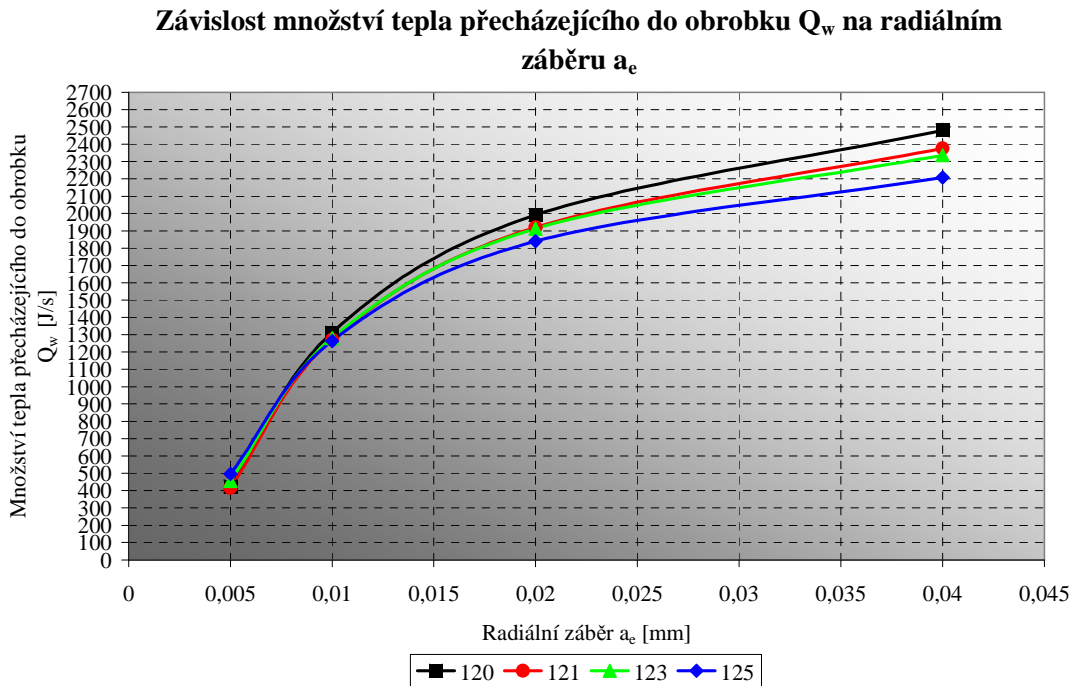
Mat. ČSN 14 109.4		Sintrovaný korund			
		BK			
Veličina	Symbol	0% A99B 80L 12VS	10% AG92/99 80I 12VS	30% AG92/99 80I 12VS	50% AG92/99 80I 12VS
Radiální záběr	a_e [mm]	0,005	0,005	0,005	0,005
Efektivní výkon	P_{ef} [kW]	0,53	0,52	0,57	0,62
Pasivní složka řezné síly	F_p [N]	31,5	32,2	34,3	40,3
Tangenciální složka řezné síly	F_c [N]	16,6	16,3	17,7	19,3
Podíl tepla přecházejícího do třísky	q_t [%]	20	20	20	20
Podíl tepla přecházejícího do obrobku	q_w [%]	80	80	80	80
Měrná tepelná kapacita	c [J.kg.°K]	452	452	452	452
Množství tepla	Q [J.s ⁻¹]	519,40	509,60	558,60	607,60
Teplo odváděné třískami	Q_t [J.min ⁻¹]	103,88	101,92	111,72	121,52
Teplota třísek	t_t [°]	1739,84	1708,75	1853,80	2019,57
Nominální plocha řezu	A_D [mm ²]	3,64E-04	3,64E-04	3,64E-04	3,64E-04
Hustota tepelného toku	φ_w [J.s ⁻¹ .m ⁻²]	1,09E+10	1,07E+10	1,17E+10	1,28E+10
Množství tepla přecházejícího do obrobku	Q_w [J.s ⁻¹]	424,00	416,00	456,00	496,00

Tabulka 48. Vypočtené hodnoty pro $a_e = 0,005\text{mm}$

Mat. ČSN 14 109.4		Sintrovaný korund			
		BK			
Veličina	Symbol	0% A99B 80L 12VS	10% AG92/99 80I 12VS	30% AG92/99 80I 12VS	50% AG92/99 80I 12VS
Radiální záběr	a_e [mm]	0,04	0,04	0,04	0,04
Efektivní výkon	P_{ef} [kW]	3,1	2,97	2,92	2,76
Pasivní složka řezné síly	F_p [N]	31,5	32,2	34,3	40,3
Tangenciální složka řezné síly	F_c [N]	97	92,8	91,3	86,4
Podíl tepla přecházejícího do třísky	q_t [%]	20	20	20	20
Podíl tepla přecházejícího do obrobku	q_w [%]	80	80	80	80
Měrná tepelná kapacita	c [J.kg.°K]	452	452	452	452
Množství tepla	Q [J.s ⁻¹]	3038,00	2910,60	2861,60	2704,80
Teplo odváděné třískami	Q_t [J.min ⁻¹]	607,60	582,12	572,32	540,96
Teplota třísek	t_t [°]	10069,64	9634,50	9479,10	8971,44
Nominální plocha řezu	A_D [mm ²]	2,92E-03	2,92E-03	2,92E-03	2,92E-03
Hustota tepelného toku	φ_w [J.s ⁻¹ .m ⁻²]	7,98E+09	7,64E+09	7,51E+09	7,10E+09
Množství tepla přecházejícího do obrobku	Q_w [J.s ⁻¹]	2480,00	2376,00	2336,00	2208,00

Tabulka 49. Vypočtené hodnoty pro $a_e = 0,04\text{mm}$

Graf závislosti množství tepla přecházejícího do obrobku na radiálním záběru



Obrázek 18. Graf závislosti množství tepla přecházejícího do obrobku na radiálním záběru

Materiál. ČSN 14 109.4		Závislost $F_c = f(a_e)$	
Číslo kotouče	Brousící kotouč	Sinterkorund	$v_f = 21,0 \text{ m/min}, v_c = 32,0 \text{ m/min}$
120	A99B 80L 12VS	0%	$a_e = 0,005 \text{ mm} \quad Q_w = 987,96 \text{Ln}(a_e) + 5759,3$
121	AG92/99 80I	10%	$a_e = 0,005 \text{ mm} \quad Q_w = 941,79 \text{Ln}(a_e) + 5506,7$
123	AG92/99 80I	30%	$a_e = 0,005 \text{ mm} \quad Q_w = 904,86 \text{Ln}(a_e) + 5349,4$
125	AG92/99 80I	50%	$a_e = 0,005 \text{ mm} \quad Q_w = 824,07 \text{Ln}(a_e) + 4961,4$

Tabulka 50. Analytická formulace závislosti na obrázku 18

5 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZJIŠTĚNÝCH PARAMETRŮ

5.1 Vstupní a výsledné parametry pro radiální záběr 0,005mm

Mat. ČSN 14 109.4		Sintrovaný korund			
		BK			
Veličina	Symbol	0% A99B 80L 12VS	10% AG92/99 80I 12VS	30% AG92/99 80I 12VS	50% AG92/99 80I 12VS
Radiální záběr	a_c [mm]	0,005	0,005	0,005	0,005
Efektivní výkon	P_{ef} [kW]	0,53	0,52	0,57	0,62
Pasivní složka řezné síly	F_p [N]	31,5	32,2	34,3	40,3
Tangenciální složka řezné síly	F_c [N]	16,6	16,3	17,7	19,3
Měrná energie broušení	e_c [J/s.m ²]	0,34	0,33	0,36	0,39
Objemový výkon	Q_w [mm ³ /min ⁻¹]	1575	1575	1575	1575
Ekvivalentní tloušťka broušení	h_{eq} [mm]	5,47E-05	5,47E-05	5,47E-05	5,47E-05
Součinitel řezivosti BK	ξ	1,90	1,98	1,94	2,09
Součinitel broušení BK	μ	0,53	0,51	0,52	0,48
Podíl tepla přecházejícího do třísky	q_t [%]	20	20	20	20
Podíl tepla přecházejícího do obrobku	q_w [%]	80	80	80	80
Měrná tepelná kapacita	c [J.kg.°K]	452	452	452	452
Množství tepla	Q [J.s ⁻¹]	519,40	509,60	558,60	607,60
Teplo odváděné třískami	Q_t [J.min ⁻¹]	103,88	101,92	111,72	121,52
Teplota třísek	t_t [°]	1739,84	1708,75	1853,80	2019,57
Nominální plocha řezu	A_D [mm ²]	3,64E-04	3,64E-04	3,64E-04	3,64E-04
Hustota tepelného toku	ϕ_w [J.s ⁻¹ .m ⁻²]	1,09E+10	1,07E+10	1,17E+10	1,28E+10
Množství tepla přecházejícího do obrobku	Q_w [J.s ⁻¹]	424,00	416,00	456,00	496,00

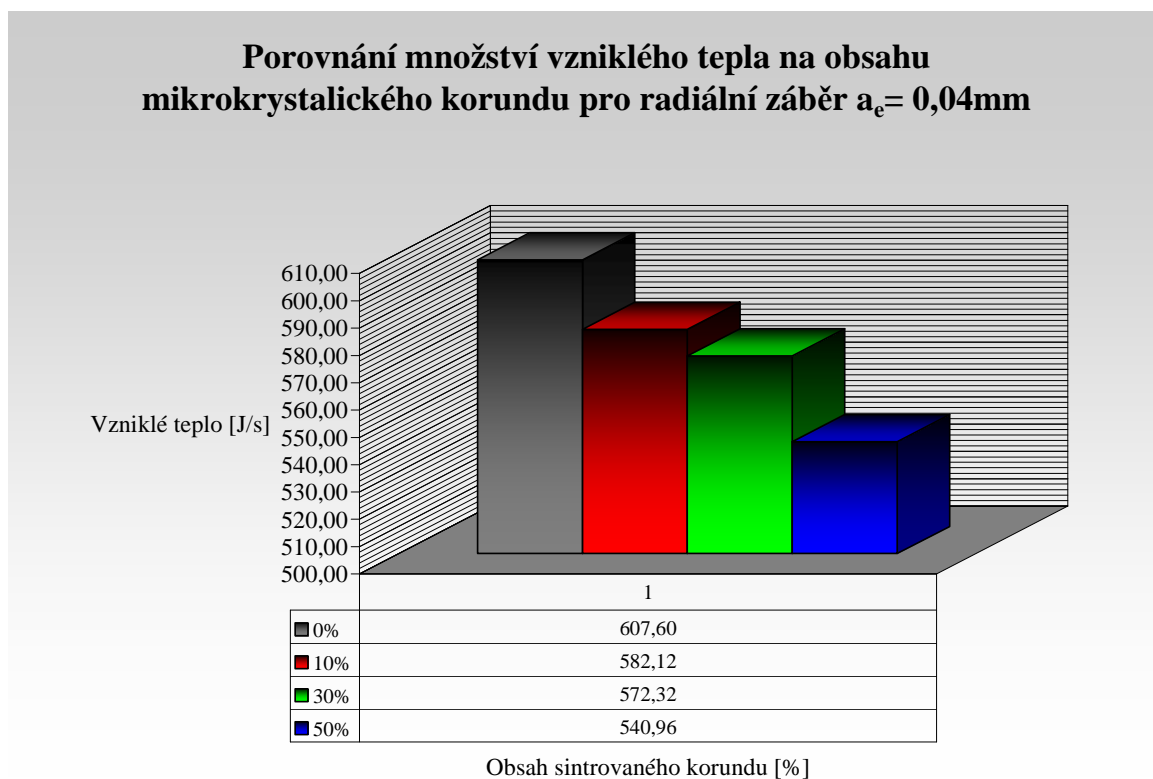
Tabulka 51. Vstupní a výsledné parametry pro radiální záběr 0,005mm

5.2 Vstupní a výsledné parametry pro radiální záběr 0,04mm

Mat. ČSN 14 109.4		Sintrovaný korund			
		BK			
Veličina	Symbol	0% A99B 80L 12VS	10% AG92/99 80I 12VS	30% AG92/99 80I 12VS	50% AG92/99 80I 12VS
Radiální záběr	a_e [mm]	0,04	0,04	0,04	0,04
Efektivní výkon	P_{ef} [kW]	3,09	2,97	2,92	2,76
Pasivní složka řezné síly	F_p [N]	197,00	191,94	190,20	194,80
Tangenciální složka řezné síly	F_c [N]	97,00	92,80	91,30	86,40
Měrná energie broušení	e_c [J/s.m ²]	0,25	0,24	0,23	0,22
Objemový výkon	Q_w [mm ³ /min ⁻¹]	12600	12600	12600	12600
Ekvivalentní tloušťka broušení	h_{eq} [mm]	4,38E-04	4,38E-04	4,38E-04	4,38E-04
Součinitel řezivosti BK	ξ	2,03	2,07	2,06	2,25
Součinitel broušení BK	μ	0,49	0,48	0,49	0,44
Podíl tepla přecházejícího do třísky	q_t [%]	20	20	20	20
Podíl tepla přecházejícího do obrobku	q_w [%]	80	80	80	80
Měrná tepelná kapacita	c [J.kg.°K]	452	452	452	452
Množství tepla	Q [J.s ⁻¹]	3038,00	2910,60	2861,60	2704,80
Teplo odváděné třískami	Q_t [J.min ⁻¹]	607,60	582,12	572,32	540,96
Teplota třísek	t_t [°]	10069,64	9634,50	9479,10	8971,44
Nominální plocha řezu	A_D [mm ²]	2,92E-03	2,92E-03	2,92E-03	2,92E-03
Hustota tepelného toku	φ_w [J.s ⁻¹ .m ⁻²]	7,98E+09	7,64E+09	7,51E+09	7,10E+09
Množství tepla přecházejícího do obrobku	Q_w [J.s ⁻¹]	2480,00	2376,00	2336,00	2208,00

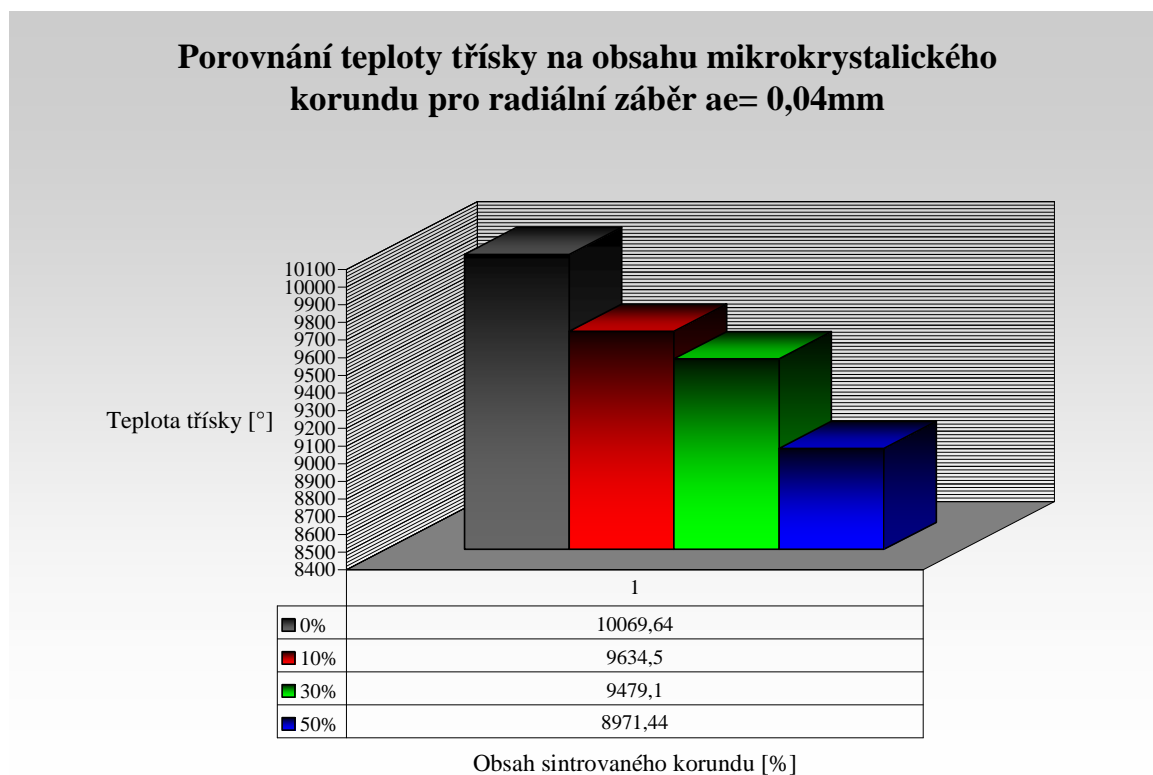
Tabulka 52. Vstupní a výsledné parametry pro radiální záběr 0,04mm

5.3 Porovnání množství vzniklého tepla na obsahu mikrokrystalického korundu pro radiální záběr $a_e = 0,4\text{mm}$



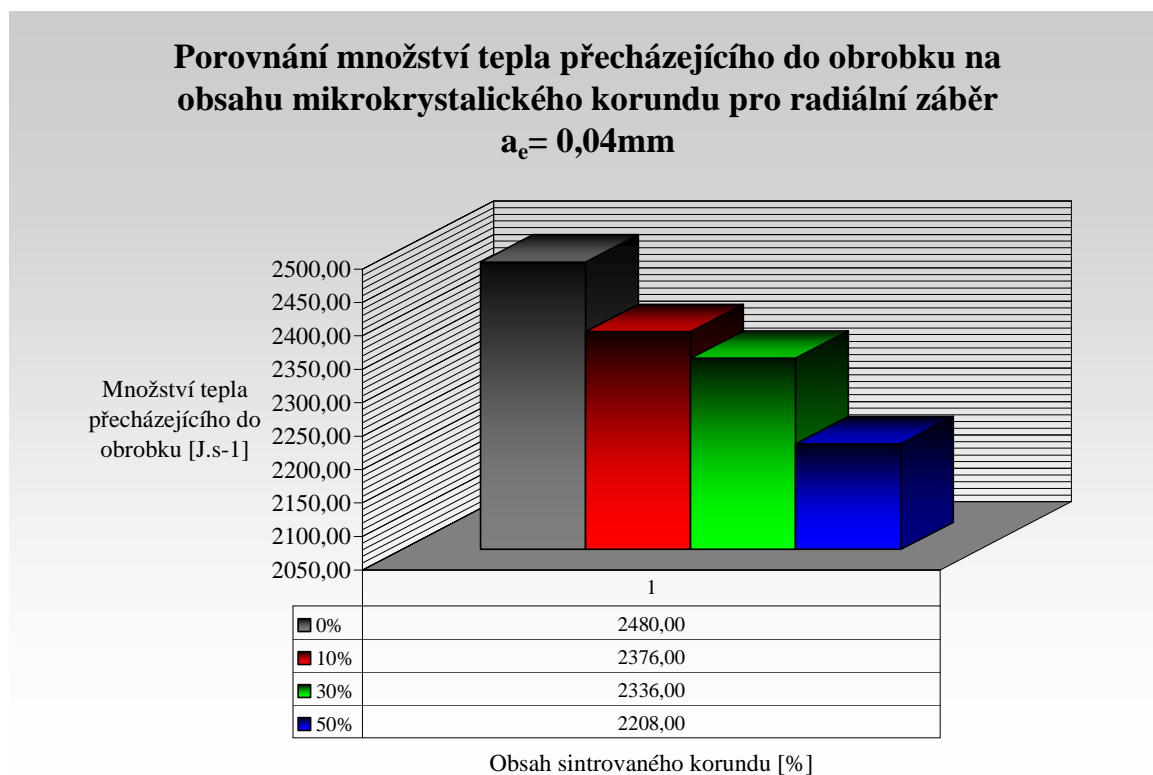
Obrázek 19. Porovnání množství vzniklého tepla na obsahu mikrokrystalického korundu pro radiální záběr $a_e = 0,04\text{mm}$

5.4 Porovnání teploty třísky na obsahu mikrokrystalického korundu pro radiální záběr $a_e = 0,4\text{mm}$



Obrázek 20. Porovnání teploty třísky na obsahu mikrokrystalického korundu pro radiální záběr $a_e = 0,4\text{mm}$

5.5 Porovnání množství tepla přecházejícího do obrobku na obsahu mikrokrystalického korundu pro radiální záběr $a_e = 0,4\text{mm}$



Obrázek 21. Porovnání množství tepla přecházejícího do obrobku na obsahu mikrokrystalického korundu pro radiální záběr $a_e = 0,4\text{mm}$

ZÁVĚR

Na základě teoretického studia a provedených experimentů lze stanovit následující obecné závěry. Kvalita povrchové vrstvy závisí hlavně na množství tepla přeneseného do obrobku a množství generovaného tepla je přímo úměrné efektivnímu výkonu, ze kterého se při procesu broušení přeměňuje 98% na teplo.

Na materiálu ČSN 14109.4 bylo sledováno chování brousících kotoučů AG92/99 80I (Gs) 12 VS s rozdílným obsahem mikrokrytalického korundu (10%, 30% a 50%) oproti kotouči A99 80L 12 V:

- Z grafu závislosti vzniklého tepla na obsahu mikrokrytalického korundu pro radiální záběr 0,04mm je zřetelně znát, že mezi kotoučem s tradiční vazbou a kotoučem s 10% obsahem mikrokrytalického korundu (dále jen MK) je znatelný rozdíl, který se s rostoucím obsahem MK dále zvětšuje. U kotoučů s obsahem MK klesala hodnota vzniklého tepla o 4,19% (obsah MK = 10%), až o 10,97% (Obsah MK = 50%)
- Z grafu závislosti teploty třísky na obsahu mikrokrytalického korundu pro radiální záběr 0,04mm je zřetelně znát, že hodnoty teploty třísky kotoučů s obsahem MK klesají oproti tradičnímu BK o 4,32% (obsah MK = 10%) až o 10,91% (obsah MK = 50%)
- Z grafu závislosti množství tepla přecházejícího do obrobku na obsahu mikrokrytalického korundu pro radiální záběr 0,04mm je zřetelně znát, že hodnoty teploty třísky kotoučů s obsahem MK klesají oproti tradičnímu BK o 4,32% (obsah MK = 10%) až o 10,91% (obsah MK = 50%)
- Se zvyšujícím obsahem MK klesá efektivní výkon i měrná energie broušení.

Brousící kotouče na bázi mikrokrytalického korundu AG92/99 80I (Gs) 12 VS mají ve sledovaných parametrech lepší výsledky než brousící kotouč s tradiční vazbou A99 80L 12 V, které se zlepšují s rostoucí hodnotou obsahu mikrokrytalického korundu.

Seřazení testovaných kotoučů od nejlepšího:

1. 125 - AG92/99 80I (Gs) 12 VS (obsah mikrokrystalického korundu = 50%)
2. 123 - AG92/99 80I (Gs) 12 VS (obsah mikrokrystalického korundu = 30%)
3. 121 - AG92/99 80I (Gs) 12 VS (obsah mikrokrystalického korundu = 10%)
4. 120 - A99 80L 12 V (obsah mikrokrystalického korundu = 0%)

Znalost závislostí výsledných parametrů lze využít pro optimalizaci procesu výroby.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOCMAN, Karel; PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. , 2005. 270 s.
- [2] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno : AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o. , 2011. 330 s.
- [3] MASLOV, J. N. . *Teorie broušení kovů*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury , 1979. 248 s.
- [4] VASILKO, K.; BOKUČAVA, G. *Brúsenie kovových materiálov*. Bratislava : Alfa, 1988. 240 s.
- [5] HLUCHÝ, Miroslav; KOLOUCH, Jan. *STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE 1 - 1.díl : Nauka o materiálu*. Praha : Scientia, spol. s. r. o., pedagogické nakladatelství, 2002. 266 s.
- [6] *Vlastní obrázky*
- [7] *BRH 20.03F*, Rovinná bruska. Návod k použití.
- [8] *HBM Test and Measurement*. [online]. 2011 [cit. 2011-05-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.hbm.com/de/menu/produkte/messelektroniken/universelle-systeme-fuer-die-messdatenerfassung/einzelgeraete-fuer-die-messdatenerfassung/single/categorie/daq-standalone/product/spider8/backPID/standalone-daq-devices/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	průřez odebírané vrstvy	[mm ²]
A _D	nominální plocha řezu	[mm ²]
A _{Dc}	plocha průřezu třísky	[mm ²]
a	vrstva proměnlivé tloušťky odřezávané vrstvy	[mm]
a _e	šířka frézování	[mm]
a _{max}	maximální tloušťka třísky	[mm]
B _D	šířka BK	[mm]
c	měrná tepelná kapacita	[K.Kg ⁻¹ .°C ⁻¹]
d _w	průměr obrobku	[mm]
∅ d _s	průměr BK	[mm]
e _c	měrná energie broušení	[J.mm ³]
F	celková síla	[N]
F _c	tangenciální složka řezné síly	[N]
F _f	posuvová složka řezné síly	[N]
F _p	pasivní složka řezné síly	[N]
f _a	šířka broušené plochy (axiální posuv)	[mm.ot ⁻¹]
φ _{max}	úhel otočení kotouče	[°]
fφ _{max}	posuv stolu za f _{max}	[mm/ fφ _{max}]
f ₀	posuv stolu za 1 otáčku BK	[mm/ot.BK]
G	brusný poměr	[-]
h _{eq}	ekvivalentní tloušťka třísky	[mm]
k _c	měrná řezná síla	[MPa]
L	délka dráhy obvodu BK za minutu	[mm]
m _t	hmotnost obroušeného kovu (třísek)	[kg.min ⁻¹]

n_s	frekvence otáčení BK	$[\text{ot.s}^{-1}]$
n_w	frekvence otáčení obrobku	$[\text{ot.s}^{-1}]$
P_{ef}	efektivní výkon	$[\text{kW}]$
Q_e	teplo odvedené do obrobku	$[\text{J.s}^{-1}]$
Q	teplo	$[\text{J.s}^{-1}]$
Q_k	teplo přestupující do kotouče	$[\text{J.s}^{-1}]$
Q_t	objem obroušeného materiálu	$[\text{mm}^3]$
Q_t	teplo odcházející třískami	$[\text{J.s}^{-1}]$
Q_{ch}	teplo odebírané řeznou kapalinou	$[\text{J.s}^{-1}]$
Q_v	teplo vyzářené do okolí	$[\text{J.s}^{-1}]$
Q_w	teplo přecházejícího do obrobku	$[\text{mm}^3.\text{s}^{-1}]$
q_w	podíl tepla přecházejícího do obrobku	$[\%]$
t_t	teplota třísky	$[\text{°C}]$
U_t	objemový výkon	$[\text{mm}^3.\text{s}^{-1}]$
V_m	objem obroušeného materiálu v čase t	$[\text{mm}^3]$
V_t	objem obroušeného materiálu	$[\text{mm}^3.\text{min}^{-1}]$
ΔV_w	odebraný materiál za časový interval	$[\text{kg/min}]$
v_c	řezná rychlost	$[\text{m.min}^{-1}]$
v_f	posuvová rychlost	$[\text{mm.min}^{-1}]$
v_{ft}	tangenciální rychlost posuvu stolu	$[\text{mm.min}^{-1}]$
v_{fr}	radiální rychlost posuvu stolu	$[\text{m.min}^{-1}]$
v_s	tangenciální rychlost BK ve zvoleném bodě	$[\text{m.s}^{-1}]$
v_t	rychlost třísky	$[\text{m.min}^{-1}]$
v_w	obvodová rychlost obrobku	$[\text{m.min}^{-1}]$
W	objemový součinitel třísek	$[-]$

α_n	normálový úhel hřbetu	[rad]
β_1	mez plastické deformace	[°]
γ_n	normálový úhel čela	[rad]
r_n	poloměr zaoblení ostří	[mm]
η	součinitel účinnosti broušení	[mm ³ .J ⁻¹]
ρ	hustota broušeného kovu	[kg/dm ³]
ξ	součinitel řezivosti BK	[-]
μ	součinitel broušení BK	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. základní veličiny při broušení [2].....	16
Obrázek 2. maximální tloušťka třísky	17
Obrázek 3. Upínání brousících kotoučů [1].....	20
Obrázek 4. Schématické znázornění stavby BK – řezné části a spojovací části.....	20
Obrázek 5. Přestup tepla při broušení tvrdých a křehkých materiálů	27
Obrázek 6. fáze broušení [4].....	30
Obrázek 7. Model záběru brousícího zrna [1]	31
Obrázek 8. Model tvorby třísky při broušení [4]	32
Obrázek 9. Rozložení řezných sil při obvodovém axiálním broušení do kulata [1].....	35
Obrázek 10. Obvodovém radiálním broušení do kulata	38
Obrázek 11. Rovinné obvodové tangenciální broušení	39
Obrázek 12. Dynamický vyvažovací přístroj B2013 [6].....	42
Obrázek 13. Bruska BRH 20.03 F [6].....	43
Obrázek 14. Dynamometr, měřící rozsah 0-500N [6]	44
Obrázek 15. Spider 8 [8].....	44
Obrázek 16. Graf závislost efektivního výkonu P_{ef} na radiálním záběru a_e	46
Obrázek 17. Graf závislost tečné síly F_c na radiálním záběru a_e	47
Obrázek 18. Graf závislosti množství tepla přecházejícího do obrobku na radiálním záběru	51
Obrázek 19. Porovnání množství vzniklého tepla na obsahu mikrokrystalického korundu pro radiální záběr $a_e = 0,04\text{mm}$	54
Obrázek 20. Porovnání teploty třísky na obsahu mikrokrystalického korundu pro radiální záběr $a_e = 0,4\text{mm}$	55
Obrázek 21. Porovnání množství tepla přecházejícího do obrobku na obsahu mikrokrystalického korundu pro radiální záběr $a_e = 0,4\text{mm}$	56

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. obvodové broušení [1]	13
Tabulka 2. čelní broušení [1]	14
Tabulka 3. Legenda k tabulkám 1a 2	14
Tabulka 4. dosahované parametry přesností obrobených ploch pro abrazivní	15
Tabulka 5. základní veličiny při broušení [2]	16
Tabulka 6. maximální tloušťka třísky	17
Tabulka 7. posuv stolu	18
Tabulka 8. frekvence otáčení kotouče BK	18
Tabulka 9. délka dráhy obvodu BK	18
Tabulka 10. Označování tvarů a rozměrů BK – výběr [1]	19
Tabulka 11. Označení jakosti brousícího kotouče [2]	21
Tabulka 12. Druhy standardních brousících materiálů [2]	22
Tabulka 13. Zrnitost [2]	22
Tabulka 14. Tvrdost	23
Tabulka 15. Struktura	23
Tabulka 16. Druhy pojiva	24
Tabulka 17. veličiny pro výpočet měrné energie	25
Tabulka 18. veličiny pro výpočet objemového výkonu [2]	25
Tabulka 19. veličiny pro výpočet hustoty tepelného toku	26
Tabulka 20. veličiny pro výpočet teploty třísek [2]	26
Tabulka 21. veličiny pro výpočet množství tepla	29
Tabulka 22. veličiny pro výpočet tepla odváděného třískami	29
Tabulka 23. veličiny pro výpočet tepla přecházejícího do obrobku [2]	29
Tabulka 24. Legenda k obrázku 5	31
Tabulka 25. Veličiny pro výpočet řezné rychlosti	32
Tabulka 26. Veličiny pro výpočet obvodové rychlosti [1]	32
Tabulka 27. Legenda k obrázku 6	32
Tabulka 28. Veličiny pro výpočet součinitele přechování třísky	33
Tabulka 29. Veličiny pro výpočet objemového součinitele třísek W.	34
Tabulka 30. Objemový součinitel dle druhu třísek [1]	34
Tabulka 31. Legenda k obrázku 7	35

Tabulka 32. Veličiny pro orientační výpočet řezné síly.....	36
Tabulka 33. Veličiny pro výpočet řezné síly v závislosti na odebírané vrstvě	36
Tabulka 34. Veličiny pro výpočet průřezu odebírané vrstvy (axiální broušení).....	37
Tabulka 35. Veličiny pro výpočet průřezu odebírané vrstvy (tangenciální broušení)	37
Tabulka 36. Veličiny k výpočtu h_{eq} [1]	37
Tabulka 37. Veličiny pro výpočet rychlosti odebrání materiálu	38
Tabulka 38. Veličiny pro výpočet h_{eq}	39
Tabulka 39. Použité brousící kotouče	42
Tabulka 40. Základní parametry brusky [7].....	43
Tabulka 41. Naměřené hodnoty	45
Tabulka 42. Analytická formulace závislosti na obrázku 16.....	46
Tabulka 43. Analytická formulace závislosti na obrázku 17	47
Tabulka 44. Veličiny pro výpočet měrné energie broušení	47
Tabulka 45. Veličiny pro výpočet objemového výkonu	48
Tabulka 46. Vypočtené hodnoty pro $a_e = 0,005\text{mm}$	48
Tabulka 47. Vypočtené hodnoty pro $a_e = 0,04\text{mm}$	49
Tabulka 48. Vypočtené hodnoty pro $a_e = 0,005\text{mm}$	50
Tabulka 49. Vypočtené hodnoty pro $a_e = 0,04\text{mm}$	50
Tabulka 50. Analytická formulace závislosti na obrázku 18.....	51
Tabulka 51. Vstupní a výsledné parametry pro radiální záběr $0,005\text{mm}$	52
Tabulka 52. Vstupní a výsledné parametry pro radiální záběr $0,04\text{mm}$	53

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY