

Analýza termodynamických jevů při aplikaci brousících kotoučů na bázi sintrovaných korundů

Bc. Silvie Vrbová

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Silvie Vrbová**

Osobní číslo: **T12516**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Řízení jakosti**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Analýza termodynamických jevů při aplikaci
brousících kotoučů na bázi sintrovaných korundů**

Zásady pro vypracování:

Teoretická studie procesu broušení se zaměřením na materiál ČSN 414 109.4, DIN 100Cr6, kvantifikace základních vazeb s orientací na energetické aspekty brousících procesů včetně metody statistických charakteristik výsledků a vyhodnocení získaných hodnot.

- 1) Vymezení základních veličin při broušení
- 2) Kvantifikace závislosti energetických faktorů broušení
- 3) Ekvivalentní tloušťka třisky
- 4) Analýza teplotních polí brousícího kotouče a broušeného povrchu
- 5) Výsledky a vyhodnocení zjištěných parametrů

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

- [1] AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s r.o. Příručka obrábění. Přel. M. Kudela., 1. vydání Praha: Scientia, s r.o., 1997, s. 857, ISBN 91-97-22 99-4
- [2] KOCMAN, K.: Technologické procesy obrábění. 1. vyd. Brno. Akademické nakladatelství CERM s r.o. Brno, 2011, s. 330, ISBN 978-80-7204-722-2
- [3] KOCMAN, K.: Analysis of development grinding wheels on the basic of microcrystalline corundum. In Manufacturing Technology, journal for science and production, December 2010, vol. X, s. 2 - 10. ISSN 1213-2489
- [4] MASLOV, J.N.: Teorie broušení kovů. 1. vyd. Praha SNTL 1980, s. 246
- [5] Metals Handbook Volume 16, Machining. Edith Joseph R. Davis. 1 ed London, 1997, ISBN 0-02-328621-0

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: ... Vrbová Silvie, Bc. Obor: ... Řízení jakosti

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



.....

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 nevyjádřeně 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 nahlédnutí 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).

⁴⁾ 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, § 90 Školní díla:

(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 chybného projevu jeho vůle u soudu. Ústanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenc, 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 vynaložil, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídá k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na analýzu termodynamických jevů při broušení kotouči s obsahem sintrovaného korundu. Teoretická část popisuje vymezení základních veličin při broušení, kvantifikaci závislostí energetických faktorů a ekvivalentní tloušťku třísky. Experimentální část vyhodnocuje sledované hodnoty parametrů broušení.

Klíčová slova:

Termodynamické jevy, broušení, sintrovaný korund

ABSTRACT

This diploma work focused on analysis of thermodynamic phenomena during grinding discs containing sintered corundum. The theoretical part describes the definition of basic parameters for grinding; quantify the dependence of energy factors and equivalent chip thickness. The experimental section evaluates the monitored parameter values grinding.

Keywords:

Thermodynamic Effect, Grinding, Sintered Corundum

Poděkování

Touto cestou děkuji panu prof. Ing. Karlu Kocmanovi, DrSc., za cenné rady, vstřícnost a čas věnovaný konzultacím při vedení této diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH VELIČIN PŘI BROUŠENÍ	13
1.1 VÝZNAM BROUŠENÍ A HODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU V TRŽNÍM PROSTŘEDÍ.....	14
1.2 CHARAKTERISTIKA ZÁKLADNÍCH VELIČIN U PROCESU BROUŠENÍ.....	15
1.3 KINEMATIKA BROUŠENÍ.....	17
1.4 TERMINOLOGIE ZÁKLADNÍCH METOD BROUŠENÍ.....	18
1.4.1 Broušící nástroje.....	20
1.4.2 Označení broušících kotoučů.....	21
1.4.3 Velikost broušících kotoučů.....	25
1.4.4 Tvar broušícího kotouče.....	25
1.4.5 Upínání broušících kotoučů.....	25
1.5 APLIKOVANÁ BRUSIVA.....	26
1.5.1 Přírodní brusiva.....	26
1.5.2 Uměle vyrobená brusiva.....	27
2 KVANTIFIKACE ZÁVISLOSTÍ ENERGETICKÝCH FAKTORŮ BROUŠENÍ	31
2.1 CHARAKTERISTIKA TERMODYNAMIKY A TERMODYNAMICKÝCH JEVŮ PŘI BROUŠENÍ.....	31
2.2 ŘEZNÉ SÍLY.....	31
2.3 ENERGETICKÉ ASPEKTY.....	33
3 EKVIVALENTNÍ TLOUŠŤKA TŘÍSKY	38
3.1 VZNIK TŘÍSKY.....	39
II PRAKTICKÁ ČÁST	41
4 ANALÝZA TEPLOTNÍCH POLÍ BROUSICÍHO KOTOUČE A BROUŠENÉHO POVRCHU	42
4.1 CÍL A METODIKA DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	42
4.2 METODIKA EXPERIMENTU.....	42
4.2.1 Technologické podmínky měření.....	42
4.2.2 Testované broušící kotouče.....	43
4.2.3 Charakteristika materiálu pro testování.....	44
4.2.4 Charakteristické veličiny procesu broušení v experimentu.....	44
4.3 DOPROVODNÉ TERMODYNAMICKÉ JEVI PŘI BROUŠENÍ.....	44
4.4 KVANTIFIKACE BROUSICÍHO PROCESU.....	46
4.4.1 Ekvivalentní tloušťka třísky h_{eq}	47
4.4.2 Měrná energie broušení e_c	47
4.4.3 Objemový výkon U_t	47
4.4.4 Poměrný objemový obrus, (brusný poměr), G	47
4.4.5 Součinitel účinnosti broušení η	48
4.4.6 Součinitel broušení BK μ	48
4.4.7 Hustota tepelného toku ϕ_w	48
4.4.8 Vzniklé teplo Q	48

4.4.9	Teplota třísek t_t	48
4.4.10	Součinitel řezivosti BK ξ	49
4.4.11	Součinitel broušení.....	49
4.4.12	Pasivní síla F_p	49
4.5	STANOVENÍ TEPLoty V POVRCHOVÝCH VRSTVÁCH OBROBKU	49
4.5.1	Výsledky hodnot sledovaných charakteristik pro radiální záběr a_e 0,005.....	51
4.5.2	Výsledky hodnot sledovaných charakteristik pro radiální záběr a_e 0,04 mm.....	52
4.6	GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ZÁVISLOSTI	53
4.6.1	Závislost efektivního výkonu při broušení materiálu ČSN 14 109.4.....	53
4.6.2	Závislost teploty obrobku na vzdálenosti od kontaktu brousícího kotouče s broušenou plochou u materiálu ČSN 14 109.4	54
4.6.2.1	Testovaný brousící kotouč A99 80I 12VS.....	55
5	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZJIŠTĚNÝCH PARAMETRŮ	56
5.1	VSTUPNÍ HODNOTY A VÝSLEDEK MĚŘENÍ PRO MATERIÁL ČSN 14 109.4 PŘI RADIÁLNÍM ZÁBĚRU a_E 0,005 MM.....	56
5.2	VSTUPNÍ HODNOTY A VÝSLEDEK MĚŘENÍ PRO MATERIÁL ČSN 14 109.4 PŘI RADIÁLNÍM ZÁBĚRU a_E 0,04 MM	57
6	GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDNÝCH CHARAKTERISTIK.....	58

6.1	MNOŽSTVÍ VZNIKU TEPLA PŘI RADIÁLNÍM ZÁBĚRU A_E 0,005 MM PRO.....	58
	MATERIÁL ČSN 14 109.4 PODLE OBSAHU MIKROKRYSALICKÉHO KORUNDU.....	58
6.2	MNOŽSTVÍ VZNIKU TEPLA PŘI RADIÁLNÍM ZÁBĚRU A_E 0,04 MM PRO MATERIÁL ČSN 14 109.4 PODLE OBSAHU MIKROKRYSALICKÉHO KORUNDU.....	58
6.3	TEPLOTA TRÍSEK PŘI RADIÁLNÍM ZÁBĚRU A_E 0,005 MM PRO MATERIÁL.....	59
	ČSN 14 109.4 PODLE OBSAHU MIKROKRYSALICKÉHO KORUNDU.....	59
6.4	TEPLOTA TRÍSEK PŘI RADIÁLNÍM ZÁBĚRU A_E 0,04 MM PRO MATERIÁL.....	59
	ČSN 14 109.4 PODLE OBSAHU MIKROKRYSALICKÉHO KORUNDU.....	59
6.5	MNOŽSTVÍ TEPLA PŘECHÁZEJÍCÍ DO OBROBKU PŘI RADIÁLNÍM ZÁBĚRU.....	60
	A_E 0,005 MM PRO MATERIÁL ČSN 14 109.4 PODLE OBSAHU.....	60
	MIKROKRYSALICKÉHO KORUNDU	60
6.6	MNOŽSTVÍ TEPLA PŘECHÁZEJÍCÍ DO OBROBKU PŘI RADIÁLNÍM ZÁBĚRU	60
	A_E 0,04 MM PRO MATERIÁL ČSN 14 109.4 PODLE OBSAHU.....	60
	MIKROKRYSALICKÉHO KORUNDU	60
6.7	MĚRNÁ ENERGIE BROUŠENÍ PŘI RADIÁLNÍM ZÁBĚRU A_E 0,005 MM PRO	61
	MATERIÁL ČSN 14 109.4 PODLE OBSAHU MIKROKRYSALICKÉHO KORUNDU.....	61
6.8	MĚRNÁ ENERGIE BROUŠENÍ PŘI RADIÁLNÍM ZÁBĚRU A_E 0,04 MM PRO	61
	MATERIÁL ČSN 14 109.4 PODLE OBSAHU MIKROKRYSALICKÉHO KORUNDU.....	61
6.9	STŘEDNÍ ARITMETICKÁ DRSNOST POVRCHU PRO RADIÁLNÍ ZÁBĚR A_E 0,005 MM PRO MATERIÁL ČSN 14 109.4 PODLE OBSAHU MIKROKRYSALICKÉHO	62
	KORUNDU 62	
6.10	STŘEDNÍ ARITMETICKÁ DRSNOST POVRCHU PRO RADIÁLNÍ ZÁBĚR A_E 0,04 MM PRO MATERIÁL ČSN 14 109.4 PODLE OBSAHU MIKROKRYSALICKÉHO	62
	KORUNDU	62
	ZÁVĚR	63
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK.....	70

ÚVOD

V naší minulosti je seznámení s broušením definováno jako opracování povrchových vrstev. Rozmach této technologie prošel mnoha různými etapami, nejvýznamnější lze označit počátek 19. století, kdy zaznamenáváme požadavky na přesnou výrobu součástí a zavedení hromadné výroby. V současnosti je tendencí výrobních podniků snaha dosahovat co nejlepší jakosti svých produktů. Úsilí o perfektní vlastnosti, efektivní produktivitu a minimalizace nákladů na výrobu je spojeno s vývojem nových technologií pro obrábění. Nízké náklady znamenají vyšší zisk a větší konkurenceschopnost podniku, která je v dnešní době významná.

Základní a také jedna z nejdůležitějších dokončovacích metod obrábění je broušení. Patří k nejvýznamnější části technologie výroby dnešní moderní doby, která umožňuje využití automatizace. Důležitým faktorem je přesnost a vysoká kvalita povrchu. Tato abrazivní metoda umožňuje zhotovení rovinné, ale i tvarové plochy. Mezi přednosti této metody je schopnost obrábění tenkých vrstev materiálu v mikrometrech. Odlišuje se od jiných metod třískového obrábění tím, že geometrie břitu zde není pevně definována. Nejčastěji používaným nástrojem je brousící kotouč. U procesu broušení vzájemné působení v místě dotyku nástroje a obráběného materiálu ovlivňuje kvalitu povrchu a také opotřebení a životnost brousícího kotouče. Mezi nejmladší typy brusných materiálů patří sintrovaný mikrostalický korund. Nedochozí téměř k otupení zrn, protože odlamováním mikrokryсталů dochází k jejich ostření. Toto brusivo je vhodné jak pro standardní použití, tak i při aplikaci broušení velmi tvrdých a houževnatých materiálů.

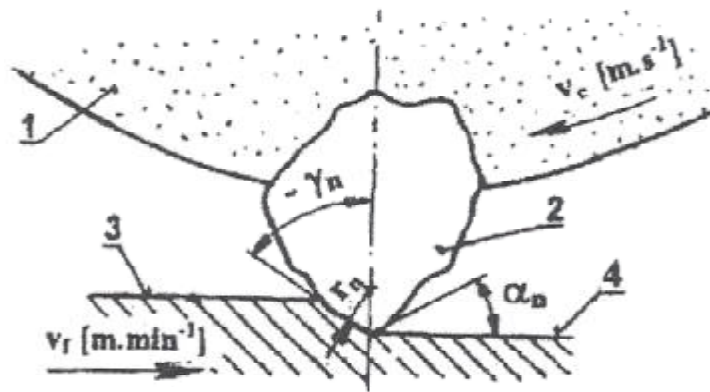
K abrazivním dokončovacím metodám patří také honování, při kterém se jakost obroběných povrchů zvyšuje řezným účinkem jemného brusiva. Další metodou je lapování, která dosahuje nejvyšší rozměrové přesnosti a nejmenší drsnosti povrchu. Produktivní metodou dokončovacího obrábění je superfinišování, zvláštní metoda, při které se odřezávají vrcholky nerovnosti pomocí velmi jemných zrn brousícího nástroje. Největší využití nachází tyto dokončovací metody v automobilovém průmyslu.

V této diplomové práci je cílem teoretická studie procesu broušení, zaměřena na materiál ČSN 14 109.4, DIN 100Cr6. Na základě dostupných poznatků bude prováděna analýza pro objasnění rozhodujících vlivů parametrů broušení, která poskytne důležité informace pro použití v praxi.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH VELIČIN PŘI BROUŠENÍ

Broušení je abrazivní metodou obrábění. Je charakteristická použitím nástrojů s nedefinovanou geometrií břitu. Abrazivní metody obrábění představují nejvíce využitě aplikace při obrábění strojírenských součástí. Používají se u součástí, na které jsou kladeny vysoké nároky na přesnost součásti a jakost povrchu. Do skupiny abrazivních metod obrábění patří broušení, honování, lapování a superfinišování. Z pohledu technologického výstupu jsou významné zejména dosažené parametry přesnosti obroběných ploch.[3]



Obrázek 1 Model záběru broušícího zrna

1 – broušící kotouč; 2 – brusné zrno; 3 - obráběná plocha; 4 – povrch po broušení;

v_c – řezná rychlost; v_f - posuvová rychlost; γ_n – normálový úhel čela; α_n – normálový úhel hřbetu; [3]

Tato metoda je dokončovací operace, vyznačující se velkou přesností, správností geometrického tvaru a zejména velmi dobrou jakostí povrchu. V dnešní době ji řadíme mezi nejvýznamnější části technologie výroby, vzhledem k dalším možnostem se rozšiřuje z dokončovacího obrábění do oblasti hrubování. Uplatnění nachází u obráběných materiálů, které nelze obrobit použitím jiných metod, například kalená ocel či keramika nebo kde je tato metoda hospodárným přínosem. Dále můžeme broušení zařadit mezi mechanické úpravy povrchu, které vytváří požadované podmínky zlepšení mechanických vzhledových požadavků. [3,12]

Aktivní částí broušícího nástroje jsou brusná zrna, rozptýlená v mazadlech a tekutinách, ve formě volných zrn, nanesená a přilepená k pružnému podkladu nebo jsou spojena pojivem v tuhá tělesa požadovaného tvaru. Pro broušení je charakteristické nepravidelné rozložení

zrn na celém povrchu brusného kotouče. Tato zrna odebírají velké množství malých třísek. Od jiných metod třískového obrábění se liší tím, že zde není pevně definována geometrie bříty. Brusná zrna jsou vyrobena z nejtvrdějších nerostů či umělých materiálů. Materiál je odebírán bříty na zrnech brusiva, které mají většinou záporný úhel čela a poměrně velký úhel hřbetu. Řezná rychlost při této metodě obrábění je mnohonásobně vyšší než prostřednictvím ostatních způsobů obrábění např. frézování či soustružení. Negativní úhly řezu jednotlivých brousicích elementů a relativně vysoká řezná rychlost vedou ke vzniku vyššího množství tepla, které může produkovat značná reziduální napětí v tenké povrchové vrstvě několika mikrometrů. Tento aspekt rozhodující měrou značně ovlivňuje životnost dynamicky a cyklicky namáhaných povrchů. Právě při této technologii může v relativně tenké povrchové vrstvě docházet k výraznému ovlivnění vlastností, zatímco v převažující části objemu součásti se změny neprojeví. V oblasti dokončování funkčních ploch je vývoj nových technologií směřován na výrobu progresivních brousicích materiálů zaručující zvýšení výkonů a snížení teploty broušeného povrchu s brousicím kotoučem. Předpokládaným výsledkem je především zvýšení kvality broušených ploch.[2,7,11]

1.1 Význam broušení a hodnocení současného stavu v tržním prostředí

Dnešní tržní prostředí vyžaduje výkonné technologie, ale také moderní progresivní materiály. Napříč celým strojírenstvím, ale i v dalších příbuzných oborech se dotýká problematika broušení a kvality nově vytvářeného obrobeného povrchu. Zaměřena je především na kvalitativní hodnocení jakosti povrchu a povrchové vrstvy. Dokončovacími metodami lze dosáhnout velké přesnosti, správného geometrického tvaru, nejvyšší rozměrové přesnosti a nejmenší drsnosti povrchu. Rozhodujícím faktorem pro úspěšnou výrobu a hlavně pro dnešní dobu velmi důležitou konkurenceschopnost podniku je nedílnou součástí oblast ekonomická. Neustálé snižování výrobních nákladů, avšak při stejné nebo vyšší kvalitě. Tato problematika má přímou souvislost se snížením strojních časů, časů na ostření, výměnu a dalších časů, které patří k výrobě součástí. Pro nároky dnešní doby jako je zvyšování řezných rychlostí, redukce procesních kapalin, použití CNC strojů, obráběcích center s vysokým výkonem a produktivitou, nezbytný výzkum kvality povrchu z hlediska odolnosti a únosnosti proti nepříznivým stavům. V důsledku konkurence přechází průmysl na nanotechnologii. Nanotechnologie ovlivňuje vývoj nových výrobků a materiálů. V budoucnu bude hlavní ekonomickou silou rozvoje moderní výroby technologický a obchodní přínos. Inženýrská nanotechnologie, nacházející své uplatnění v moderní výrobě popisuje

a zabezpečuje konstrukční části a jejich výrobu v rozsahu 100 až 0,1 μ m. Tyto nezbytnosti znamenají lepší funkční vlastnosti, které se promítnou do zlepšení životnosti a spolehlivosti, správnosti geometrických tvarů (kruhovitost i pod 0,2 μ m) a malá drsnost obrobene plochy ($R_a = 0,8$ až 0,2 μ m). Dnes se z hlediska výroby uplatňují nanočástice při výrobě prášků slinutých karbidů a brousicích materiálů, které jsou označovány jako sol-gely korundy a sintrované korundy.[2,7,11]

Vývoj nových technologií v oblasti dokončovacích metod je orientován na výrobu nových progresivních brousicích materiálů, zaručující zvýšení výkonů a snížení teploty kontaktu broušeného povrchu s brousicím kotoučem. Žádaným výsledkem je zvýšení kvality broušených ploch bez snížení jakosti obráběných povrchů. Sintrovaný korund ve výrobě brousicích kotoučů je výsledkem dlouholetého vývoje. Je to uměle vytvořený typ mikrokrystalického korundu. Drtí se na extrémně malou velikost krystalů se stejnými reznými vlastnostmi, jsou průměrně až 50krát menší oproti ušlechtilému korundu. V současné době se používají jako kombinace s brousicími zrny v hmotnostních poměrech 10 %, 30 %, 50 až 60 %. Jejich jemná struktura rovnoměrně rozložená, pozitivně ovlivňuje rychlost opotřebení brousicího zrna během brousicího procesu. Tato zrna jsou charakteristická vynikající houževnatostí, odolností vůči opotřebení a odolností působení vysokých teplot. Lze tedy zvolit jako jednu z možných cest k řešení tohoto problému použití vysoceporézních brousicích materiálů, sintrovaných korundů. Jsou faktorem, který v budoucnosti bude přínosem nejen v oblasti vysokých nároků na požadavky jakosti povrchu, ale také v oblasti ekonomické.

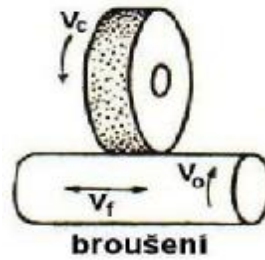
1.2 Charakteristika základních veličin u procesu broušení

Řezná část je označována funkční část nástroje, obsahující prvky, které tvoří třísku. Patří sem ostří, čelo a hřbet. V případě vícebřitého (u broušení) nástroje má každý břit svou reznou část.

Řezná rychlost v_c je vyjádřena jako okamžitá rychlost hlavního rezného pohybu uvažovaného bodu ostří vzhledem k obrobku.

Posuvová rychlost v_f je určena jako okamžitá rychlost posuvového pohybu v uvažovaném bodě ostří vzhledem k obrobku.

Úhel posuvového pohybu φ lze vyjádřit jako úhel mezi směry současného posuvového pohybu a hlavního rezného pohybu v pracovní rovině boční P_{fe} . [2]



Obrázek 2 Hlavní a posuvový pohyb u procesu broušení [2]

Základní veličiny:

- h_{eq} ekvivalentní tloušťka třísky broušení [mm]
- h_D tloušťka třísky [mm]
- φ_{max} úhel otočení kotouče [°]
- v_s tangenciální rychlost brousícího kotouče [$m \cdot s^{-1}$]
- a_e hloubka broušení [mm]
- d_s průměr kotouče [mm]
- 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} tangenciální rychlost posuvu stolu [$m \cdot min^{-1}$] [3,9]

Maximální tloušťka třísky a_{max} :

- lze vypočítat jako násobek míry posuvu stolu za určitý úhel pootočení brousícího kotouče a sinu tohoto úhlu

Ekvivalentní tloušťka třísky:

- je to ukazatel, který při broušení nahrazuje proměnlivou hloubku třísky a_e

$$h_{eq} = \frac{v_w \cdot a_e}{60 \cdot v_c} \quad [mm] \quad [3]$$

1

a_eradiální záběr [mm]

b_Dšířka broušení (šířka BK) [mm]

v_wrychlost obrobku [$m \cdot min^{-1}$]

v_cřezná rychlost [$m \cdot s^{-1}$]

h_{eq}ekvivalentní tloušťka broušení [mm]

tčas broušení

Šířka třísky:

- odebíraná jedním zrnem, je určena tvarem brusného zrna;
- je úměrná okamžité hodnotě tloušťky třísky;

Posuv:

Posuv stolu připadající na otočení brousícího kotouče o určitý úhel $f\varphi_{\max}$

- hlavní pohyb – plynulý posuv s největší rychlostí při broušení;

Rychlost posuvu stolu v_{ft}

- otáčivý pohyb – rotace obrobku okolo osy ve vztahu k stolu při broušení; [8]

1.3 Kinematika broušení

Pohyby a jejich rychlosti při broušení jsou definovány na základě charakteristik jednotlivých způsobů broušení. Příkladem může být obvodové vnější broušení do kulata axiálním nebo radiálním způsobem.

Řezná rychlost v_s

- tangenciální rychlost brousícího kotouče ve zvoleném bodě.....[m.s⁻¹];
- Řezná rychlost při běžném broušení dosahuje hodnot 30 až 35 m s⁻¹ .

Frekvence otáčení n_s

- počet otáček brousícího kotouče za jednotku času.....[s⁻¹];

Obvodová rychlost brousícího kotouče

Závisí na použití zvoleného nástroje a možnostech obráběcího stroje.

- tangenciální rychlost na maximálním průměru brousícího kotouče;

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_{\max} \cdot n_s}{60 \cdot 10^3} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

2

D_{\max} maximální průměr brousícího kotouče.....[mm];

n_s frekvence otáčení brousícího kotouče..... [ot. min.⁻¹];

v_c je v rozmezí od cca 30 – 35 m.s⁻¹;

u rychlostního broušení 80÷100m.s⁻¹.....[m.s⁻¹];

Obvodová rychlost obrobku v_w při rotačním broušení

$$V_W = \frac{\pi \cdot D_w \cdot v_w}{10^3} \text{ [m} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}$$

3

D_wprůměr obrobku;

N_w ... frekvence otáčení obrobku;

Tato obvodová rychlost v_w případně tangenciální rychlost posuvu v_{ft} je menší než řezná rychlost v_s a ovlivňuje:

- odběr třísky a rychlost deformace;
- kvalitu a drsnost obrobenej plochy;
- velikost řezné síly;
- opotřebení brousicího kotouče; [3]

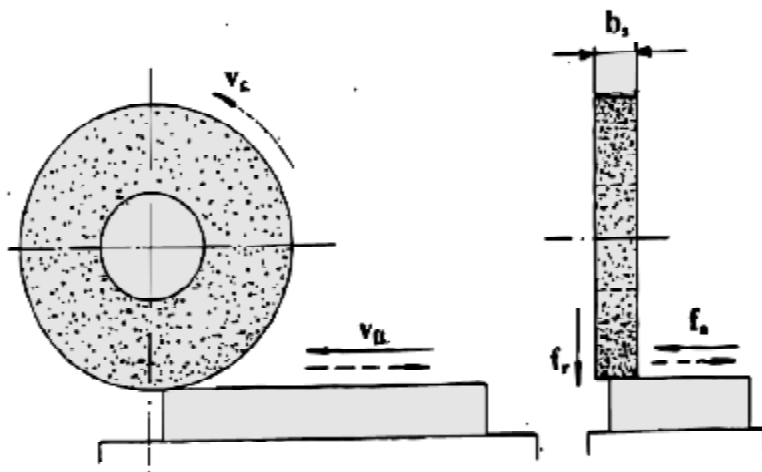
1.4 Terminologie základních metod broušení

Brousicí proces lze provést různými metodami.

Tyto základní metody rozlišujeme podle:

a) *tvaru a způsobu vytváření obrobenej povrchu*

- rovinné broušení (rovinná plocha);

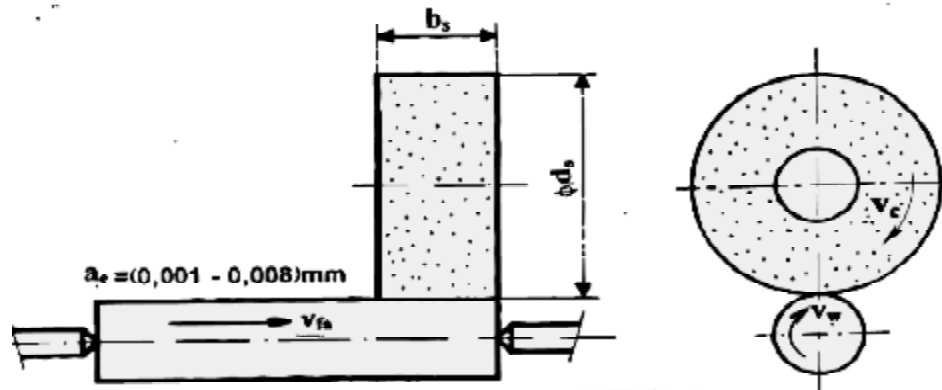


Obrázek 3 Rovinné broušení, přímočarý pohyb stolu[3]

- broušení dokulata (rotační povrch);
- tvarové broušení (broušení závitů, ozubených ploch);
- broušení na otáčivém stole (broušení s rotačním posuvem);
- kopírovací broušení (broušení s řízenou změnou posuvu; NC stroje);
- broušení tvarovými brousícími kotouči (profil brousícího kotouče určuje výsledný profil obrobku);

b) *specifikace aktivní části brousícího kotouče:*

- obvodové broušení (obvodem kotouče);
- čelní broušení (čelem kotouče);



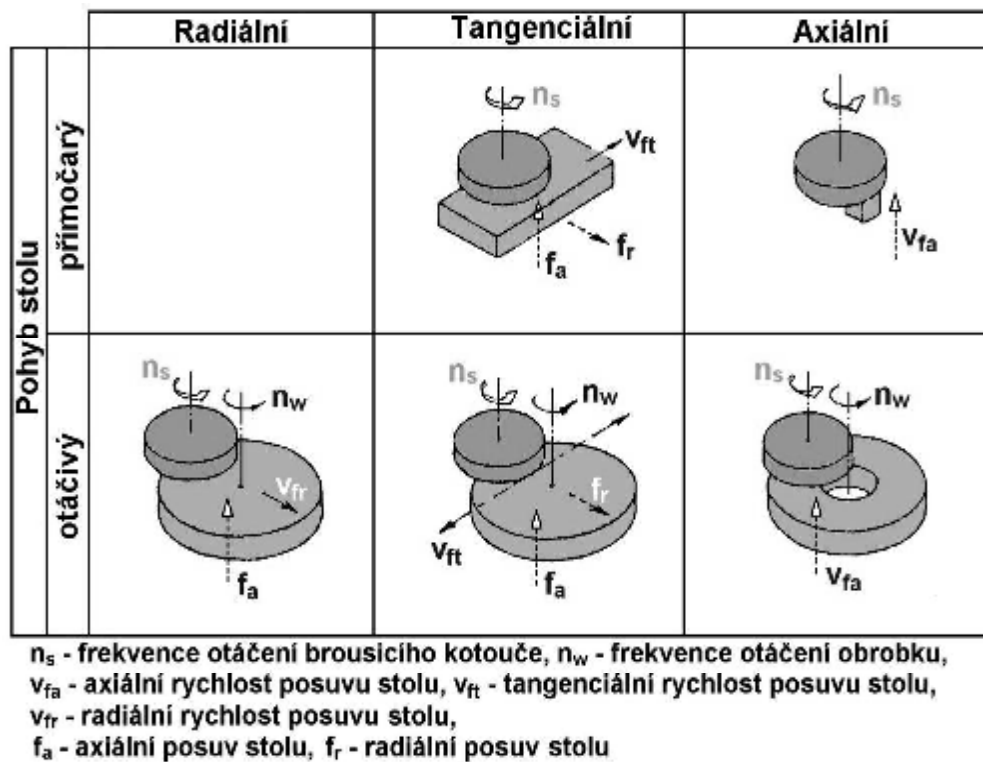
Obrázek 4 Obvodové broušení s axiálním posuvem[3]

c) *vzájemné polohy brousícího kotouče a obrobku:*

- vnější broušení;
- vnitřní broušení;

d) *hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k brousícímu kotouči:*

- axiální broušení (s osou kotouče je hlavní posuv stolu rovnoběžný);
- tangenciální broušení (hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě D);
- radiální broušení (brousící kotouč je radiální k hlavnímu posuvu stolu ve zvoleném bodě D);
- obvodové zapichovací broušení (posuv stolu je plynulý radiální);
- čelní zapichovací broušení (posuv stolu je plynulý axiální); [4,8]



Obrázek 5 Broušení dle pohybu stolu [2]

1.4.1 Brousící nástroje

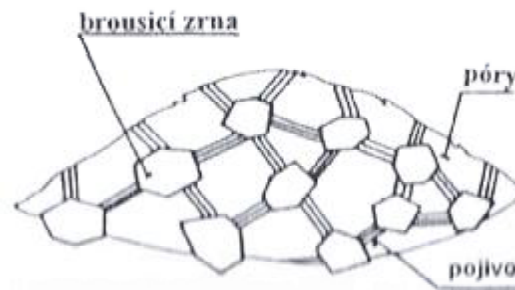
U obrábění kde dochází ke vzniku třísky, je řezným materiálem břit nástroje. Podstatná část brousících materiálů je tvořena brousícími zrn, která se používají ve formě volných zrn, nanesených nebo přilepených k pružnému podkladu (leštící a brousící plátna nebo papíry), zrn rozptýlených v mazadlech a tekutinách (pasty pro broušení a leštění), dále ve formě zrn tvořící řezné klíny, spojená pojivy v pevná tělesa různých tvarů, které obsahují póry s funkcí zubových mezer pro hromadění třísky. [4,6]

Tuhá tělesa geometrického tvaru:

- brousící kotouče;
- segmenty;
- kameny;

Zrnité brusivo se smíchá s pojivem z umělé pryskyřice nebo keramiky, vytvaruje se na brusný kotouč a vytvrzuje. Ideální brusné zrno si udržuje svou ostrost a postupný úbytek po co možná nejdelší možnou dobu. Každý typ brusného zrna má svou charakteristickou krystalickou strukturu, která umožňuje jeho různé štěpení. To je nejdůležitější faktor, dle

kterého je zrno vybíráno pro danou broušící operaci. Pro technickou praxi se používají standardní broušící materiály, které jsou na bázi karbidu křemíku SiC a na bázi kysličníku hlinitého Al_2O_3 , dále jsou to broušící materiály diamantové a z kubického nitridu bóru. Mezi technologicky nejrozšířenější patří standardní broušící materiály typu Al_2O_3 (umělý korund, elektrit) a typu SiC (karbidsilicium, karborundum). Volba broušícího materiálu se odvíjí od materiálu obrobku. Čím vyšší požadovaná jakost povrchu, tím menší zrno. Vhodný pro broušení šedé litiny, slinutých karbidů, mosazi, lehkých kovů a jejich slitin, mědi, skla, keramiky a kamene je právě karbid křemíku. Umělým korundem se brousí ocel, ocel na odlitky, tvrdé bronzы a temperované litiny.[2,3,6]



Obrázek 6 Schéma řezné a spojovací části broušícího kotouče [3]

1.4.2 Označení broušících kotoučů

Určení typů broušících kotoučů se provádí pomocí značky dle ČSN ISO 525(22 4503). Specifikuje složení broušícího materiálu, který charakterizuje druh, strukturu, tvrdost, zrnitost, druh pojiva, určuje tvar a rozměr. Dosud používané označení kotoučů podle ČSN 22 4501 mění nová norma označení takto: specifikace kotouče obsahuje sedm symbolů, z těch jsou čtyři povinné, ostatní údaje (0,4,6) jsou závislé na vůli výrobce.

Symboly jsou v tomto pořadí:

- 0 – typ broušícího materiálu (původ nebo typ brusiva);
- 1 – druh broušícího materiálu;
- 2 – zrnitost kotouče;
- 3 – tvrdost kotouče;
- 4 – struktura;
- 5 – druh pojiva;
- 6 – typ pojiva;

Volba se provádí z normalizovaných symbolů 1 až 5.

Symboly 0 a 6 jsou zvoleny dle potřeby výrobcem.[6]

DRUH BROUSICÍHO MATERIÁLU	ZRNITOST TVRDOST	STRUKTURA	POJIVO	DOPLŇUJÍCÍ TECHNOLOG. ZNAK/MAX. OBVODOVÁ RYCHLOST
A	36K	9	V	00/50 m.s⁻¹

Obrázek 7 Názorný příklad označení brousicího kotouče [6]

Druh brousicího materiálu**BROUSICÍ MATERIÁL OZNAČENÍ STARÉ (ČSN) NOVÉ (ISO)**

Elektrokorund bílý	A99B	A
Elektrokorund bílý – barvený červeně	A99	A
Elektrokorund - barvený modře	A99M	A
Elektrokorund růžový	A98	A
Elektrokorund hnědý	A96	A
Karbid křemíku černý	C48	C
Karbid křemíku zelený	C49	C
Monokrystalický korund	90MA	
Polokřehký korund	97A	A
Zirkonový korund	80A	A
Kubický nitrid bóru	CBN	NENÍ
Mikrokrystalický korund	AG92	
Slinutý korund	K	NENÍ

[6]

Obecná volba je obvykle orientována pro *elektrokorund* na ocel, ocel na odlitky, temperované litiny, tvrdé bronzy.

Pro *karbid křemíku* na obrábění šedé litiny, mosazi, mědi, lehkých kovů a jejich slitin, slinutých karbidů, skla a keramiky.[2]

Zrnitost brousicího materiálu

Volba zrnitosti se odvíjí dle požadované drsnosti broušeného povrchu. Zde všeobecně platí, že čím vyšší jsou požadavky na drsnost povrchu, tím je zrnitost jemnější. Hrubší zrnitost se volí pro větší úběr materiálu a u broušení mosazi, mědi a hliníku.

Podstatná změna proti značení dle ČSN 22 4501, kde zrnitost vyjadřuje rozměr brusných zrn (11 číslo zrnitosti = rozměr zrna v μm), je podle ČSN ISO 525 čím větší je údaj zrnitosti, tím je zrno jemnější.[2,3]

Tabulka 1 Znázornění rozlišení zrnitosti [6]

Zrnitost	ČSN	ISO
<i>Velmi hrubá</i>	250, 200, 160	není
<i>Hrubá</i>	125, 100, 80, 63	4,5,6,7,8,10,12,14,16,20,22,24
<i>střední</i>	50, 40, 32, 25	30,36,40,46,54,60
<i>Jemná</i>	20, 16, 12,10	70,80,90,100,120,150,180
<i>Velmi jemná</i>	8, 6,6	220,240,280,320,360,400,500,600,800,1000,1200
<i>Zvlášť jemná</i>	4, 3, M32, M22, M15	není

Tvrдость brousicího materiálu

Je identifikací soudržnosti hmoty brousicího nástroje a volí se podle způsobu broušení a druhu broušeného materiálu. Platí, že čím tvrdší je broušený materiál a čím je větší styčná plocha brousicího kotouče se součástí, tím měkčí volíme brusný kotouč. Měkký kotouč je používán pro broušení mědi, mosazi, hliníku a materiálů citlivých na teplotní změny. Broušení přerušovaných ploch naopak vyžaduje tvrdší kotouč. [10]

Struktura brousicího materiálu

Struktura (sloh hutný) je vyjádřením vzdálenosti mezi brousicími zrny i hutnosti brousicího nástroje. Vyšší číslo vyjadřuje větší vzdálenost mezi zrny. Hutné brousicí nástroje jsou vhodné pro broušení křehkých a tvrdých materiálů. Pórovité kotouče jsou vhodné zejména pro broušení houževnatých materiálů. Pro součásti, u kterých nesmí dojít k zahřívání při broušení, slouží zvlášť pórovité kotouče.[4]

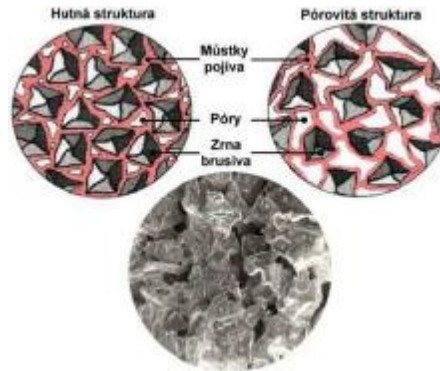
Struktura - rozsah označení:

- *velmi hutná 1-2;*
- *hutná 3-4;*
- *střední 5-6;*
- *otevřená 7-8;*
- *velmi otevřená 9-10;*
- *zvlášť pórovitá 11-18;*
- *vysoceporézní 10VS-18VS;*

Pro volbu struktury všeobecně platí:

Čím je:

- ✓ tvrdší a křehčí materiál, tím je kotouč hutnější;
- ✓ větší dotyková plocha, tím musí být kotouč pórovitější;
- ✓ objemnější množství odebraného materiálu, tím musí být nástroj pórovitější, aby se nezanášel;



Obrázek 8 Druhy struktury brousícího kotouče [2]

Pojivo brousícího materiálu

Pro brousící nástroje je podstatné použití pojiva. Vytváří můstky mezi brusnými zrny a jeho vlastnosti zásadně ovlivňují tzv. *samoostření* brousícího nástroje.

Druh pojiva a jeho označení:

- Keramické – V
- Magnezitové – Mg
- Pryžové – R
- Umělá pryskyřice – B [3]

U keramického pojiva jsou nástroje křehčí, citlivější vůči nárazu a bočnímu tlaku. Jejich použití je aplikováno pro jemný výbrus bez ovlivnění součásti teplem. Brousící kotouče s pojivem z umělé pryskyřice jsou odolnější vůči nárazům a bočním tlakům, avšak nevýhodou je nepříznivá změna vlastností ovlivněná stárnutím. Slouží k broušení rovinných ploch, vnějších a vnitřních válcových ploch, hrubování, řezání kovů, kamene a keramiky. Kotouče s pryžovým pojivem se používají pro jemné ostření nástrojů, broušení válcových ploch, u bezhrotého broušení jako podávací kotouče, jako tenké řezací kotouče a elastické nástroje pro čištění a leštění. Pro jemné broušení a leštění jsou určeny kotouče s polyuretanovým pojivem, nástroje s šelakovým pojivem jsou používány pro leštění kamene.[2,6,8]

1.4.3 Velikost brousicích kotoučů

Výběr rozměru brousicího kotouče nebo tělesa je dána typem stroje a závisí na druhu prováděné činnosti. Při větším je průměru brousicího kotouče, je tím méně následkem delší ochlazovací dráhy brusné zrna namáhané, to přináší příznivé podmínky pro delší životnost kotouče. Pokud zvětšíme podstatně průměr brousicího kotouče při jeho stálé obvodové rychlosti, sníží se tak drsnost obráběného povrchu, protože se prodlužuje stykový oblouk kotouče a obrobku, dochází ke zmenšení tloušťky třísky odebírané jedním zrnem. Při zvětšení průměru kotouče nepodstatně, nedojde ke zlepšení kvality broušené plochy. [6,9]

1.4.4 Tvar brousicího kotouče

Tvary brousicích kotoučů jsou normalizované a jsou zvoleny na základě typu prováděné operace.

Mezi základní tvary brusného kotouče lze zařadit:

- Obvodové kotouče
- Čelní kotouče
- Talířové kotouče
- Úhlové kotouče
- Miskové kotouče [10]

1.4.5 Upínání brousicích kotoučů

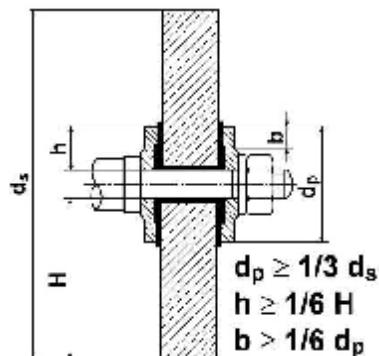
Brusné kotouče se upínají na vřeteno brousicího stroje pomocí přírub, nejčastěji upevněny mechanickým sevřením. Je nutné brousicí kotouč orovnat, to znamená jemné obrobení povrchu kotouče pro dosažení požadovaného tvaru, odstranění nerovností a očištění kotouče od třísek. Pro orovnávaní se používají:

- 1) Orovňavací kolečka;
- 2) Orovňavací kameny z keramiky;
- 3) Orovňavací kladky;
- 4) Diamantové orovnávače;

Před upnutím kotouče do stroje je potřeba pro zaručení klidného chodu vřetene bez vynucených kmitů, které jsou příčinou zhoršené broušené plochy, vyvážit brusné kotouče a to staticky nebo dynamicky. [2,9]

Brousící stroje – brusky:

- Hrotové brusky;
- Bezhruté brusky;
- Brusky na díry;
- Vodorovné rovinné brusky;
- Svislé rovinné brusky;
- Speciální brusky; [2]



Obrázek 9 Upínání brousícího kotouče pomocí přírub [2]

1.5 Aplikovaná brusiva

Výběr je orientován v závislosti na vlastnostech obrobku.

Symbol na brousících kotoučích:

A - brusné materiály na základě oxidu hlinitého Al_2O_3 korundy se používají pro broušení železa, oceli;

(A-korund, 38A-bílý korund, 86A-rubínový korund, 32A monokrystalický korund).

C- brusné materiály na základě karbidu křemíku se používají na broušení neželezných kovů, nekovových materiálů, keramiky, skla nebo lehkých kovů.

(37C-černý karbid křemíku, 39C-zelený karbid křemíku). [2,3]

1.5.1 Přírodní brusiva

- **Přírodní diamant**

– je modifikací uhlíku s krystalickou strukturou, která zpravidla obsahuje menší množství příměsí různých chemických prvků. Diamantové krystaly jsou různých tvarů, spíše blíží se geometricky pravidelnému tvaru; [2]

- **Korund**

- minerál, který je složen zejména z krystalického oxidu hlinitého (80 až 90% Al_2O_3) s příměsí dalších minerálů. Jedná se o velmi tvrdý, nepříliš křehký materiál. V přírodě se nachází velké množství druhů korundu. Přírodní korund krystalizuje v hexagonální krystalové soustavě, má tvar protáhlých dipyramidálních hranolovitých, klencových a pinakonálních krystalů;

- **Smírek**

- minerál na bázi krystalického oxidu hlinitého, neobsahuje víc než 60% Al_2O_3 . V porovnání s korundem snižují jeho brusné vlastnosti různé vedlejší příměsi;

- **Křemen**

- je minerál, který obsahuje hlavně oxid křemičitý (až 97% SiO_2) a příměsi minerálů;

[16]

1.5.2 Uměle vyrobená brusiva

Přírodní brusiva s úspěšností nahrazují umělá brusiva - umělý diamant, kubický nitrid boru, umělý korund – oxid hlinitý Al_2O_3 , elektrit, elektrokorund, karbid boru, karbid křemíku a jejich různé směsi.

- **Umělý diamant**

– pomocí katalyzátoru se získává z materiálu obsahující uhlík. Výchozím materiálem je pro výrobu umělého diamantu grafit (méně často saze nebo dřevěné uhlí); katalyzátorem může být kov (chrom, nikl, železo, kobalt atd.). Katalyzátor se za vysokého tlaku a teploty taví a atomy uhlíku mění svou hexagonální strukturu charakteristickou pro grafit na krychlovou, typickou pro diamant. Přitom dochází k podstatně změně vlastností materiálu a z měkkého grafitu vzniká velmi tvrdý materiál; [16]

- **Umělý korund**

– je to krystalický oxid hlinitý (Al_2O_3), získává se vytavením látek bohatých na tento oxid (bauxit, čistý oxid hlinitý) v elektrických pecích. Dle obsahu oxidu hlinitého je různé barvy, struktury a vlastností. Je nejpoužívanější brusivo na broušení ocelí, ocelí na odlitky a temperované litiny; [16]

❖ *Umělý bílý korund A99*

Jeho výroba se provádí tavbou bauxitu v obloukových pecích při teplotě 2000°C. Bílý korund má vyšší tvrdost než hnědý korund a o něco nižší houževnatost. Umělý bílý korund obsahuje minimální množství volného železa (toho se dosáhne odmagnetizováním), je vhodný pro broušení, tryskání nerezové oceli. Umělý bílý korund obsahuje až 99 % Al_2O_3 . Jedná se materiál vysoké kvality, který je určen pro výrobu brousících nástrojů, keramický průmysl a výrobu žáruvzdorných tvárnic. [16]



Obrázek 10 Umělý bílý korund [13]

❖ *Umělý růžový korund A98*

Korund, legovaný chrómem, je určen pro výrobu keramicky pojených brousících nástrojů, jako jsou kotouče, segmenty, montované kotouče, apod., pro opracování tvrdých kovů a slitin, nesnášejících zvýšené teploty při opracování. Korund je vyráběn tavením oxidu aluminia společně s kyslíčnky chrómu v elektrických obloukových pecích. Proti bílému korundu má růžový korund legovaný chrómem významně vyšší tvrdost. Korund legovaný chrómem se vyznačuje podélným tvarem zrn s ostrými hranami a stabilní měrnou hmotností. Díky dokonalému vyprání ve vodě jsou zrna čistá, mají jasnou růžovou barvu a dobrou smáčivost. [16]



Obrázek 11 Umělý růžový korund[13]

❖ *Umělý hnědý korund*

Umělý hnědý korund je vyráběn z disulfidické strusky - kusoviny, získané z obloukových pecí, při kontrolované tavbě bauxitu o teplotě nad 1800°C a následném pomalém ochlazení. Dobře rostlé krystaly dávají tomuto materiálu houževnatost a pevnost. Zrno má kubický tvar a stabilní sypanou hmotnost. Povrchová prašnost je odstraněna práním zrn ve vodě. Tím je dosaženo čistého povrchu jednotlivých zrn, dobré smáčivosti a také dobrých pracovních podmínek při zpracování. Slitky surového kysličníku hlinitého se pak lámou, drobí, drtí a třídí do skupin podle velikosti zrn. Umělý hnědý korund je vhodný pro všechny druhy výrobků s pojivem pryskyřičným nebo gumovým, pro volné broušení a tryskání. V řezacích a brousících kotoučích je vhodný pro opracování nástrojových, legovaných i běžných ocelí, litiny aj. materiálů.[16]



Obrázek 12 Umělý hnědý korund [13]

❖ *Monokrystalický korund*

Monokrystalický korund vzniká krystalizací z oxi-sulfidické taveniny. Za speciální tavy bauxitů dochází za pomoci přídavku pyritu k redukci nečistot a další přísady vedou ke krystalizaci každého jednotlivého krystalu monokorundu, které se získají po hydrolýze z drcené oxisulfidické strusky (kusoviny). Zrna se vyznačují šedě-bílou barvou a mají mnoho přesných řezných hrotů. Při srovnání s hnědým korundem má lepší tvrdost a houževnatost, tedy lepší abrazivní vlastnosti. Monokrystalický korund je vhodný především pro vysoké rychlosti broušení a při výrazně nižší teplotní námaze obrobku. Monokrystalický korund je určen zejména pro keramicky pojené nástroje při obrábění kalené nástrojové oceli okolo 62 HRC, rychlořezné, ložiskové, legované, nerezové, vanadiové oceli a velmi tvrdých a houževnatých materiálech. Rovněž je tento korund aplikovatelný v pryskyřičných kotoučích při velkých řezných rychlostech a současné nutnosti chladného řezu či výbrusu, např. u velmi tenkých řezacích kotoučů.[8,11,16]

❖ *Karbid křemíku*

Jedná se o sloučeninu křemíku s uhlíkem (SiC), která se vyrábí v elektrických pecích za teploty 2100 až 2200°C. Základní surovina je křemenný písek a látky, které obsahují uhlík – koks a antracit. Výrobní proces spočívá v přeměně křemíku uhlíkových částic párami kyseliny křemičité. Technický karbid křemíku je dvojího druhu. Zelený karbid křemíku (KZ) s obsahem alespoň 97% SiC je tvrdší, zato méně houževnatý; používá se zejména k ostření nástrojů ze slinutých karbidů. Černý karbid křemíku (KČ) je charakteristický černou nebo tmavě modrou barvou a kovovým leskem. Obsahuje neméně 95% SiC. Používá se často k broušení kovů s malou pevností v tahu, jako je např. šedá a bílá litina, měď, mosaz nebo křehké druhy bronzu; [8,16]



Obrázek 13 Karbid křemíku [13]

❖ *Karbid boru*

obsahuje krystalický karbid boru (do 94% B₄C) a malé množství příměsí. Vyrábí se v elektrických pecích z technické kyseliny borité (B₂O₃) a uhlíčitého materiálu s menším obsahem popela ropného koksu. Je označován jako jeden z nejtvrdších umělých materiálů, tvrdost má 9,36 Mohs. Karbid boru je neutrální při styku s kyselinami a zásadami. Karbid boru se používá v jaderném průmyslu, zbrojařském průmyslu, dále pro broušení, lapování, leštění karbidu wolframu a dalších velice tvrdých materiálů jako například skla, keramiky či nerostů; [8,16]

2 KVANTIFIKACE ZÁVISLOSTÍ ENERGETICKÝCH FAKTORŮ BROUŠENÍ

2.1 Charakteristika termodynamiky a termodynamických jevů při broušení

Termodynamika je rozsáhlý vědní obor, tvořící důležitou součást materiálových disciplín. Vychází z poznatků fyziky a chemie, statistické mechaniky a obecné termodynamiky. V obecné rovině se zabývá vzájemnými vztahy a přeměnami různých druhů energie (např. mechanická, tepelná) při termodynamických dějích. Podává teoretické vysvětlení vlastností látek a jevů.

Zkoumá vymezenou část prostoru s látkovou náplní, kterou nazýváme termodynamická soustava. Soustava je od okolí oddělena skutečnými nebo pomyslnými hranicemi, jejich vlastnosti určuje charakter soustavy. Tedy schopnost propustit látku a energii ve formě mechanické práce a tepla ze soustavy do okolí a naopak. [14]

Soustavy z hlediska propustnosti látky:

- Otevřenou soustavu;
- Uzavřenou soustavu;

Soustavy z hlediska propustnosti energie:

- Neizolovanou soustavu;
- Izolovanou soustavu; [14]

U teoretické analýzy broušení vytváří termodynamickou soustavu obrobek, brousící kotouč a odbroušené elementy kovu. Stav soustavy charakterizují veličiny – práce řezání, teplo, teplota, řezné prostředí a hmotnost. U broušení se vytváří velké množství tepla, které vzniká přeměnou mechanické energie. Při interakci soustavy s okolím dochází ke stavovým změnám. Z nestabilního počátečního stavu soustava přechází do stavu konečného. [3]

2.2 Řezné síly

Celková řezná síla F působící v obecném směru mezi brousícím kotoučem a obrobkem se rozkládá do tří vzájemně kolmých směrů.

Má tři složky:

- 1) *Tangenciální síla* F_c - ve směru řezné rychlosti leží řezná síla;
- 2) *Radiální síla* F_p je kolmá k broušené ploše;
- 3) *axiální síla* F_f , pasivní- působí ve směru podélného posuvu tzn. kolmo na rovinu otáčení kotouče.; [3,6]

Řeznou sílu můžeme určit:

- Z experimentální rovnice

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

4

- Za pomoci měrné řezné síly

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

5

- Nepřímo – z naměřeného řezného příkonu P_c brusného vřeteníku

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

6

Při broušení platí, že:

$$F_p > F_c > F_f \text{ a } F_p \cong (1,2 \div 3)F_c$$

7

Výpočet řezné síly pro rovinné broušení:

$$F_c = k_c \cdot f_a \cdot \frac{v^{ft}}{60 \cdot v_s} \cdot a_e \quad [\text{N}]$$

8

Výpočet řezné síly pro rotační broušení:

$$F_c = k_c \cdot f_c \cdot \frac{v_w}{60 \cdot v_s} \cdot a_e \quad [\text{N}]$$

9

V_{ft} - tangenciální rychlost stolu [m/min]

V_w - obvodová rychlost obrobku [m.min⁻¹]

f_a - axiální posuv stolu na otáčku obrobku [mm]

a_e - pracovní (radiální) záběr [mm] [4,8]

Měrná řezná síla nabývá hodnot: pro ocel $k_c=10\,000\div 35\,000$ MPa

pro litinu $k_c=4\,000\div 12\,000$ MPa

(vyšší hodnoty platí pro broušení na čisto a jemné broušení)

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 vrůst řezná síla až několikanásobně. [4,8]

Kvalitativní parametry

Dosahované kvalitativní parametry při standardním broušení rotačních a rovinných ploch

Tabulka 2 Kvalitativní parametry [3]

	IT[-]přesnost rozměru	Ra[μm] – drsnost povrchu
HRUBOVÁNÍ	9 - 11	0,8 – 6,3
BROUŠENÍ NA ČISTO	5 - 7	0,2 – 1,6
JEMNÉ BROUŠENÍ	3 - 4	0,025 – 0,4

2.3 Energetické aspekty

Teplota, teplota

Při broušení dochází v povrchové vrstvě obrobku vytváření velkého počtu míst s vysokými teplotami, jejich působeními se povrchová vrstva intenzivně zahřívá. V povrchové vrstvě obrobku se tepelný proces vyznačuje vysokou rychlostí místního ohřevu, má krátkou prodlevu na této teplotě a rychlé ochlazení, zejména u použití řezné kapaliny.

Při broušení se veškerá mechanická práce mění v teplo a jen malá část se spotřebuje na přeměnu krystalické mřížky obráběného materiálu. Vzniklé teplo přechází do kotouče, třísky, obrobku a řezné kapaliny. [5,8]

Teplo:

- Přestupující do kotouče Q_k ;
- Přecházející do obrobku Q_o ;
- Odcházející s třískou Q_t ;
- Odebrané řeznou kapalinou Q_{ch} ;
- Vyzářené Q_v ;

Lze vyjádřit rovnicí:

$$F_{cvc} = Q_o + Q_k + Q_t + Q_{ch} + Q_v$$

10

Při broušení přechází největší množství tepla do obrobku a nepatrná část se vyzáří do okolí. Při vysokých teplotách může dojít k různým defektům povrchové vrstvy obrobku, jako jsou trhlinky nebo opal a tím jej znehodnotit. Tepelný vliv je označován jako základní činitel broušení.

Při procesu broušení rozeznáváme:

- 1) *Okamžitou teplotu*, ta se vyvíjí přímo v místě záběru zrna brusiva, za krátkou dobu dosahuje vysokých teplot;
- 2) *Stykovou teplotu*, v místě styku obrobku a kotouče, vyhodnocuje její průměrnou hodnotu v rozmezí šířky kotouče;
- 3) *Střední teplotu*, ustálená teplota na povrchu obrobku, nelze ji experimentálně změřit, ale lze ji určit podle strukturálních změn na okrajových vrstvách obrobku;

Vznik a rozdělení tepla u broušení se odvíjí od podmínek:

- volby typu kotouče;
- mechanických a fyzikálních vlastností obráběného materiálu;
- řezných podmínek;
- řezné kapaliny aj.;

Jednotlivé činitele (řezná rychlost, apod.) ovlivňují tepelné jevy komplikovaně. Pokud se zvýší řezná rychlost, zmenší se tloušťka odebrané vrstvy, tím se zvýší množství tepelných impulzů, ale zároveň se zkracuje doba jejich působení a změní se podmínky tření zrn brusiva po obráběné ploše. Důsledkem tohoto vzájemného působení se teplota obrobku zvyšuje při zvýšení řezné rychlosti. [8,14]

Teplotu lze snížit zmenšením intenzity působení zdrojů tepla a jeho intenzivním odváděním těmito způsoby:

- 1) *technologicky* – výběr optimálního způsobu broušení, typem kotouče, řezných podmínek, řezné kapaliny, atd.;
- 2) *konstrukčně* – vhodná konstrukce kotoučů pro dané podmínky obrábění, zlepšení čistících a chladících zařízení pro řeznou kapalinu; [8]

Množství tepla Q , vzniklé u broušení – řezná síla a řezná rychlost

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

11

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

$$Q = k_c \cdot A_D \cdot v_c$$

12

Teplu Q je odváděno obrobkem, brousícím kotoučem, třískami a chladicí kapalinou. Na deformaci mřížky a vytvoření nových povrchů jsou spotřebována 2% z celkové práce řezání, 98% práce se přemění v teplo.

Teplo odváděné třískami:

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

13

Teplota třísek:

při nižší teplotě třísek je kvalita broušení zpravidla vyšší.

$$t_t = \frac{F_c \cdot v_c \cdot \frac{q_t}{10^2} \cdot 60}{m_t \cdot c} + t_0 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

14

F_c - řezná síla ve směru hlavního řezného pohybu [N]

v_c - řezná rychlost [m.s⁻¹]

q_t - podíl tepla přecházejícího do třísek [%]

m_t - hmotnost třísek [kg.min⁻¹]

c - měrná tepelná kapacita brouš. kovu [J. kg⁻¹.K⁻¹]

t_0 - teplota okolí [^{\circ}\text{C}]

Hustota tepelného toku φ_w popisuje množství tepla přecházející plochou 1 m² obrobku v čase jedné sekundy. [3]

$$\varphi_w = \frac{Q \cdot \frac{q_w}{10^2}}{\frac{A_D}{10^6}} = \frac{F_c \cdot v_c \cdot q_w}{A_D} \cdot 10^4 = \frac{10^3 \cdot P_c \cdot q_w}{A_D} \cdot 10^4 = \frac{P_c \cdot q_w}{A_D} \cdot 10^7 \quad [\text{J.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$$

15

Množství tepla přecházející do obrobku:

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

16

Kde:

Qteplo vznikajícího při broušení [$\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$]

Q_wteplo přecházející do obrobku [$\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$]

q_wmnožství tepla přecházejícího do obrobku [%]

A_D ...jmenovitá plocha řezu [mm^2]

f_aaxiální posuv [$\text{mm} \cdot \text{zdvih}^{-1}$] [$\text{mm} \cdot \text{ot}^{-1} \cdot \text{obrobku}$]

a_ehloubka broušené plochy [mm]

v_cřezná rychlost na obvodu kotouče [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

k_cměrná řezná síla [MPa] [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]

φ hustota tepelného toku [$\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$]

h_{eq}ekvivalentní tloušťka třísky [mm]

P_ccelkový příkon hlavního vřeteníku [kW] [3,8,9]

3 EKVIVALENTNÍ TLOUŠŤKA TŘÍSKY

U broušení při správné volbě řezných parametrů dochází k tzv. samoostření, tedy k vylamování otupených zrn a uvolnění novým, ostrým zrnům v brousícím kotouči. Tento proces je možné regulovat řeznými podmínkami a ovlivňovat řezné síly, které působí na jednotlivá zrna a tím také na intenzitu vylamování otupených zrn. Platí zde, že řezná síla je úměrná tloušťce třísky, odebírané zrnem. Fyzikální podstata úběru třísek je velmi dobře vyjádřena ekvivalentní (střední) tloušťkou třísky " h_{eq} ". Pokud známe hodnotu ekvivalentní tloušťky třísky, je možné vypočítat energetické a dynamické parametry brousícího procesu. Jestli se odbrousí materiál v čase t , při radiálním záběru a_e , šířky b_D a délky t . v_w a poté se tento objem rozvine rovnoměrně po povrchu brousícího kotouče o tloušťce h_{eq} tak, že oba tyto objemy jsou stejné, pak platí:

$$a_e \cdot b_D \cdot v_w \cdot t = 60 \cdot v_c \cdot h_{eq} \cdot b_D \cdot t$$

17

ekvivalentní tloušťka třísky:

$$h_{eq} = \frac{v_w \cdot a_e}{60 \cdot v_c} \quad [\text{mm}]$$

18

a_e - radiální záběr [mm]

b_D - šířka broušení [mm]

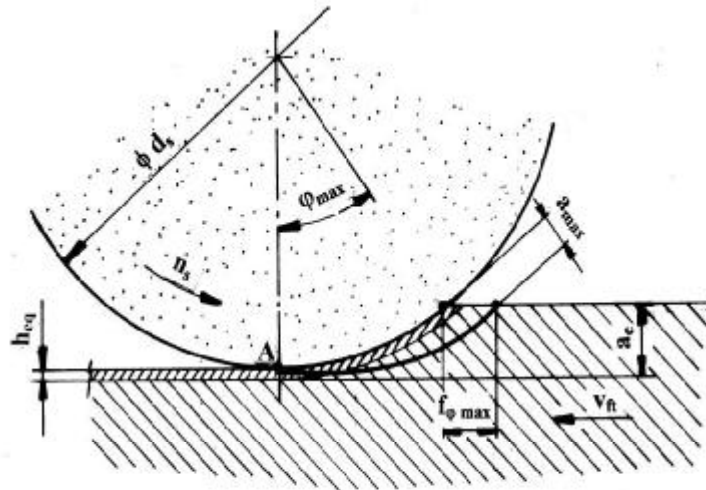
v_w - rychlost obrobku [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

v_c - řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

h_{eq} - ekvivalentní tloušťka broušení [mm]

t - čas broušení [min]

- Ekvivalentní tloušťka broušení \rightarrow tloušťka třísky ve tvaru plynulé pásy odcházející podél brousícího kotouče při řezné rychlosti v_c o objemu rovnému objemu odebíraného materiálu V_m za stejný čas
- Ekvivalentní tloušťka broušení je vztažena na jednotku aktivní šířky brousícího kotouče a vyjádří se pro příslušnou kinematiku broušení. [3,8,9]



Obrázek 14 Znáornění ekvivalentní tloušťky třísky[3]

3.1 Vznik třísky

Na proces tvoření třísky při broušení mají vliv topografie broušícího kotouče, změna velikosti a geometrie broušících zrn, proměnlivá hloubka odřezávané vrstvy a teplota obráběného materiálu v místě broušení.

Každé zrno, které odřezává materiál při pohybu v kontaktní zóně, prochází třemi stádii:

- plastická deformace povrchu;
- pružná deformace povrchu;
- odebrání třísky; [3,8]

Spolehlivou informaci o procesu tvoření třísky při broušení lze získat zkoumáním právě těchto jednotlivých oblastí. To je možné pouze pomocí experimentálních metod. Oddělování třísky je velmi složitý proces, jeho průběh je závislý na různých činitelích, především na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu a jejich závislosti na podmínkách plastické deformace.

Charakteristika třísky:

- Vysoké lokální smykové napětí, řádově až 10^5 MPa;
- Vysoká rychlost smykových deformací, řádově až 10^5 s⁻¹;
- Interakce nástroje po právě vytvořeném povrchu, který je chemicky aktivní;
- Vysoký počet parametrů a jeho geometrie, které mohou výrazně změnit proces řezání;
- Velké množství strukturně metalurgických parametrů obráběného povrchu, ty mohou ovlivnit jeho chování vůči materiálu řezného nástroje;

Druh třísky určuje:

- poměr meze pevnosti v tahu R_m ;
- meze kluzu ve smyku R_{es} ;
- meze pevnosti ve smyku R_{ms} ;
- a. *tvářená tříška soudržná* vzniká plastickým kluzem;
- b. *částečně tvářená tříška*, elementární;
- c. *netvářená*, vzniká štěpením bez předchozího tváření;

Třísky jsou výstupní produkty z řezného procesu, které vzhledem k následné manipulaci po bezprostředním opuštění prostoru jejich vzniku, mají splňovat určité podmínky rozměrů a tvarů. [2,4,8]

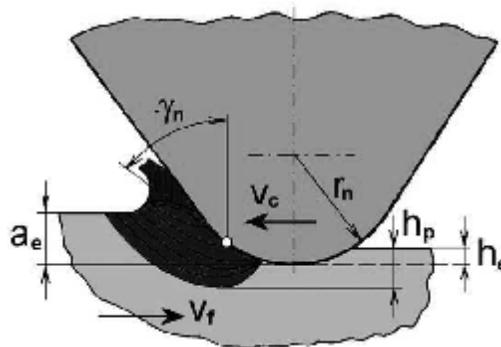
Ke kvantifikaci stupně plnění těchto požadavků se používá "*objemový součinitel třísek - W* ", který je vyjádřen závislostí:

$$W = \frac{V_t}{V_m}$$

19

V_t - Objem volně ložených třísek;

V_m - Objem odebraného materiálu korespondující s V_t ; [3]



Obrázek 15 Úhly jednotlivých zrn brusiva [2]

Dynamické působení síly, které doprovází oddělování třísek, způsobuje plastickou deformaci vrstvy kovu obrobeného povrchu. Při zvyšující síle F se pod zrnem povrchová vrstva zpočátku pružně a plasticky deformuje a poté nastává odebrání třísky. Mechanismus oddělování a vznik třísky se liší u krystalických a nekrystalických látek.[2]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 ANALÝZA TEPLOTNÍCH POLÍ BROUSICÍHO KOTOUČE A BROUŠENÉHO POVRCHU

4.1 Cíl a metodika diplomové práce

V teoretické části diplomové práce jsou charakterizovány základní veličiny při broušení, kvantifikace závislosti energetických faktorů broušení a ekvivalentní tloušťka třísky. Její experimentální část je orientována na vliv použitých brousicích kotoučů na teplo vzniklé při obrábění. Jedním z hlavních kritérií volby řezných parametrů při broušení jako dokončovací metody, je teplota styku brousicího kotouče s broušeným povrchem. Řešení s využitím metod regresní analýzy je zaměřeno především na zjištění závislosti teploty broušeného povrchu na vzdálenosti od kontaktu s brousicími kotouči. Při experimentu byly testovány brousicí kotouče s různým obsahem sintrovaného korundu, uměle vytvořeného typu mikrokrytalického korundu, který má extrémně malou velikost krystalů se stejnými řeznými vlastnostmi. Experimenty byly realizovány na rovinné brusce BRH 20.03F, testování brousicích kotoučů bylo provedeno na materiálu ČSN EU 14 109.4. - DIN 1,3505, WNR 100Cr6. Řezné podmínky pro všechny kombinace brousicích kotoučů a materiálu byly nastaveny stejně. Cílem je ověření parametrů ovlivňujících kvalitativní a ekonomické výsledky broušení.

4.2 Metodika experimentu

4.2.1 Technologické podmínky měření

Pro experimentální měření byla použita tato zařízení:

- **Rovinná bruska BRH 20.03F;**
 - Řezná rychlost $v_c = 32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;
 - Posuvová rychlost $v_f = 21 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$;
 - Radiální záběr $a_e = 0,005 \text{ mm}$;
 $a_e = 0,04 \text{ mm}$;

Základní parametry brusky BRH 20.03F:

Pracovní plocha stolu: 200x630 mm;

Rozměry brousicího kotouče: 250 x 20 – 50 x 76 mm;

Rychlost stolu regulovatelná: 1 – 30 m.min⁻¹;

Otáčky brousicího vřetená: 2550 min⁻¹;

- **Dynamický vyvažovací přístroj B2013;**

Před vlastním experimentem je nutné brousicí kotouč vyvážit, pro předcházení jeho nežádoucího kmitání a tím ke zhoršení kvality broušené plochy.

- **Měřicí aparatura Spider 8**(Hotlinger Baldwin Messtechnik);

Umožňuje zobrazit řezné síly F_p a F_c .

- **Wattreg I** – měření příkonu brousicího vřeteníku;

Pomocí tohoto přístroje lze získat efektivní výkon P_{ef} .

- **Dynamometr**, měřicí rozsah 0 – 500N;

Pro měření tangenciální řezné síly F_c a radiální řezné síly F_p

4.2.2 Testované brousicí kotouče

Pro zkoušky byly použity vysoce pórovité brousicí kotouče s keramickým pojivem, rozměr 250 mm x 20 mm x 76 mm.

Tabulka 3 Testované brousicí kotouče [17]

Číslo kotouče	Materiál brusiva	typ	struktura
9	Bílý korund	A99B 80I	12VS
11	Mikrokrytalický bílý korund 10%	AG92/99 80I	12VS
13	Mikrokrytalický bílý korund 30%	AG92/99 80I	12VS
15	Mikrokrytalický bílý korund 50%	AG92/99 80I	12VS

4.2.3 Charakteristika materiálu pro testování

Pro testování brousících kotoučů byla vybrána ocel ČSN 14 109. Patří mezi nejvíce používané slitinové oceli třídy 14. Vyznačuje se vlastnostmi jako je velká tvrdost, odolnost proti opotřebení, pevnost v tlaku a metalurgická čistota. Používá se zejména pro výrobu valivých ložisek.

Tabulka 4 Chemické složení materiálu ČSN 14 109. [14]

Chemické složení materiálu ČSN 14109	
Uhlík	0.98 - 1.10%
Chrom	1.30 - 1.60%
Mangan	0.25 - 0.45%
Křemík	0.15 - 0.35%
Síra	0.025% maximum
Fosfor	0.025% maximum

4.2.4 Charakteristické veličiny procesu broušení v experimentu

Při experimentu byly sledovány a následně hodnoceny tyto hodnoty:

teplota broušeného povrchu T ; výkon brousícího vřeteníku P_c , složky řezné síly F_c a F_p , měrná energie broušení e_c , hustota tepelného toku ϕ_w , vzniklé teplo Q , hmotnost odbroušeného kovu m_t a objemového výkonu U_t , střední aritmetická drsnost profilu R_a , poměrný obrus G , nominální plocha řezu A_D , ekvivalentní hloubka broušení h_{eq} , koeficient účinnosti η , součinitel řezivosti ζ a součinitel broušení μ ;

4.3 Doprovodné termodynamické jevy při broušení

Brousící kotouč, obrobek a odbroušené elementy kovu tvoří v teoretické analýze procesu broušení termodynamickou soustavu. Veličiny charakterizující stav soustavy jsou:

práce řezání, teplo, teplota, hmotnost a řezné prostředí.

Celková kinetická energie a celková energie potencionální tvoří součet vnitřní energie soustavy. Při změně stavu tělesa dodáním práce dochází ke zvětšení teploty soustavy a její vnitřní energie. Znalost velikosti dodávané práce umožňuje určit i teplotu jednotlivých komponentů.

Dodávaná práce E_c je v procesu broušení kvantifikována použitými reznými parametry a její velikost potřebná pro broušení v čase „t“ je obecně dána:

$$E_c \int_0^t F_c \cdot v_c \cdot dt$$

20

Přeměnou dodávané práce v teplo a podíl tepla přecházející do obrobku je dán:

$$Q_w = \varphi_w \frac{A_D}{10^6} \quad [\text{J} \cdot \text{s}^{-1}]$$

21

kde φ_w je hustota proudění tepelného toku:

$$\varphi_w = \frac{Q \cdot q_w}{A_D \cdot 10^{-6} \cdot 10^2} = \frac{F_c \cdot v_c \cdot q_w \cdot 10^7}{A_D} = \frac{P_{ef} \cdot 10^3 \cdot q_w \cdot 10^7}{A_D} \quad [\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$$

22

φ_w hustota proudění tepelného toku $[\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$

P_{ef} příkon brousícího vřeteníku $[\text{kW}]$

Q množství tepla vzniklého přeměnou práce broušení $[\text{J} \cdot \text{s}^{-1}]$

q_w podíl tepla přecházejícího do obrobku $[\%]$

A_Dnominální plocha řezu $[\text{mm}^2]$

Podle *Fourierova zákona*:

$$Q_w = \lambda \cdot A_D \cdot \frac{d\theta}{dl}$$

23

Kde $\frac{d\theta}{dl}$ je teplotní gradient, který je možné s přibližností určit jako:

$$\frac{d\theta}{dl} = K(T_{def} - T_w)$$

24

T_{def}střední teplota deformační zóny $[\text{°C}]$

T_w střední teplota obrobku v dané hloubce $[\text{°C}]$

4.4 Kvantifikace brousicího procesu

Konkrétní hodnoty řezných parametrů a zjištěných efektivních příkonů a jednotlivých řezných sil jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 5 Použití brousicích kotoučů, stanovené řezné parametry a výsledky experimentů pro materiál ČSN 14 109.4 [17]

Číslo zkoušky	Číslo kotouče	BK 250 x 20 x 76 mm	Hloubka řezu [mm]	Řezná síla F_p [N]	Řezná síla F_c [N]	Efektivní výkon P_{ef} [kW]
		vf = 21,0 m/min, vc = 32,0 m/s Materiál: ČSN 14 109.4				
1	80	A99 80I 8V	0,005	33,3	18,6	0,60
2	zrno bílý korund	keramické pojivo	0,040	143,8	105,9	3,39
3	81		0,005	48,6	24,7	0,79
4	zrno AG92 10%		0,040	245,4	115,6	3,70
5	83	AG92/99 80I 8V	0,005	39,4	20,2	0,65
6	zrno AG92 30%	mikrokrystalický bílý korund	0,040	224,5	107,4	3,44
7	85	keramické pojivo	0,005	44,4	21,9	0,70
8	zrno AG92 50%		0,040	220,2	103,1	3,30
9	120	A99B 80I 12VS	0,005	31,5	16,6	0,53
10	zrno bílý korund	keramické pojivo, porotvorné	0,040	197,0	97	3,10
11	121		0,005	32,2	16,3	0,52
12	zrno AG92 10%	AG92/99 80I 12VS	0,040	191,9	92,8	2,97
13	123	mikrokrystalický bílý korund	0,005	34,3	17,7	0,57
14	zrno AG92 30%	keramické pojivo	0,040	190,2	91,3	2,92
15	125	porotvorné látky	0,005	40,3	19,3	0,62
16	zrno AG92 50%		0,040	194,8	86,4	2,76

Ke komplexnímu hodnocení brousicích kotoučů byly aplikovány požadované charakteristické veličiny v procesu broušení, kvantifikované podle následujících kritérií:

4.4.1 Ekvivalentní tloušťka třísky h_{eq}

ukazatel, který při broušení nahrazuje proměnlivou hloubku třísky a_e , je formulován z předpokladu, že objemy odbroušeného materiálu a materiálu rozvinutého rovnoměrně po povrchu brousicího kotouče o tloušťce h_{eq} při stejných řezných parametrech jsou stejné.

$$h_{eq} \frac{v_w}{60 \cdot v_c} \cdot a_e \text{ [mm]}$$

25

4.4.2 Měrná energie broušení e_c

účinnost energetické stránky procesu broušení, energie spotřebovaná na odbroušení 1 mm^3 materiálu kovu za časovou jednotku. U hodnocení řezivosti brousicích kotoučů platí, že: *čím menší je hodnota měrné energie e_c , tím lepší je řezivost brousicího kotouče.*

$$\frac{F_c \cdot v_c}{Q_t} \text{ [J} \cdot \text{mm}^{-3}]$$

26

4.4.3 Objemový výkon U_t

je definován jako úběr materiálů za jednu sekundu, *se zvyšující se hodnotou U_t se zvyšuje i řezivost brousicího kotouče.*

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

27

4.4.4 Poměrný objemový obrus, (brusný poměr), G

určuje se z objemu odebraného materiálu, které připadá na jednotku objemu spotřebovaného zrna. *Čím větší je hodnota G , tím lepší je řezivost brousicího kotouče.*

$$G = \frac{V_m}{V_s} \text{ [-]}$$

28

4.4.5 Součinitel účinnosti broušení η

je ukazatel, který hodnotí komplexně vliv řezné kapaliny, kvalitu broušícího kotouče, broušeného materiálu, popř. dalších parametrů při ostatních konstantních podmínkách. Udává množství energie, spotřebované na úběr 1 mm^3 broušeného materiálu. ***Čím větší je hodnota součinitele účinnosti, tím lepší je řezivost broušícího kotouče.***

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

29

4.4.6 Součinitel broušení BK μ

vyjadřuje poměr mezi pasivní a řeznou silou při broušení.

$$\mu = F_p / F_c$$

30

4.4.7 Hustota tepelného toku φ_w

hodnotící množství tepla přecházející plochou 1 m^2 obrobku v čase jedné sekundy.

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

31

4.4.8 Vzniklé teplo Q

které se zvyšuje při zvětšení řezné rychlosti a složek řezných sil.

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

32

4.4.9 Teplota třísek t_t

při menší teplotě třísek je kvalita broušení zpravidla vyšší.

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

33

4.4.10 Součinitel řezivosti BK ξ

je určen poměrem pasivní a řezné složky síly při broušení.

$$\xi = F_p / F_c$$

34

4.4.11 Součinitel broušení

$$\mu = F_c / F_p$$

35

4.4.12 Pasivní síla F_p

limituje tuhost soustavy při broušení a se zvyšující se silou F_p klesá tuhost soustavy.

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

36

4.5 Stanovení teploty v povrchových vrstvách obrobku

Experimentální měření bylo zaměřeno na pozorování vlivu testovaných brousicích kotoučů na teplo vznikající při obrábění. Teplota v místě řezání při rozdílných hloubkách byla vypočtena z příkonu brousicího vřetene. Podle strukturních změn ve velmi tenkých okrajových vrstvách obrobku, lze nepřímo určit okamžitou teplotu popř. formulování závislosti:

$$T = f(h).$$

37

Ve většině případů byla optimální závislost exponenciální, kritériem pro volbu závislosti byla hodnota spolehlivosti.

Obecný tvar exponenciální funkce:

$$t_h = a \cdot e^{-(b \cdot h)}$$

38

Odhady potřebných parametrů byly stanoveny při aplikaci regresní analýzy z podmínky, že součet čtverců diference naměřených a teoretických hodnot bude minimální.

$$\ln t_h = \ln a - b \cdot h \cdot (\ln .e)$$

39

Součet čtverců odchylek naměřených (skutečných) a vypočtených hodnot:

$$S = \sum (\ln .t_h - \ln a + b \cdot h)^2$$

40

a odhady parametrů „a“ a „b“ jsou dány:

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0$$

41

$$\frac{\partial S}{\partial \ln a} = 0$$

42

Po provedení parciálních derivací a úpravě jsou hodnoty konstanty „a“ a exponentu „b“:

$$a = \exp \frac{\sum h \cdot \sum (h \cdot \ln t_h) - \sum \ln t_h \cdot \sum h^2}{(\sum h)^2 - n \cdot \sum h^2}$$

43

$$b = \frac{n \cdot \sum h \cdot \ln t_h - \sum \ln t_h \cdot \sum h}{(\sum h)^2 - n \cdot \sum h^2}$$

44

S pomocí metody konečných prvků a uvedených rovnic vedení tepla v pevných látkách je možné kvantifikovat teplotu v místě kontaktu broušícího kotouče s broušeným povrchem včetně výpočtu maximální teploty obrobku ve stanovené hloubce pod povrchem. Při výpočtu je předpoklad lineárního šíření tepla v homogenním materiálu obrobku z oceli. Aplikací diferenciálních rovnic vedení tepla v pevných látkách je možné provést jeho si-

mulaci šíření v obrobku:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau}$$

45

λ - koeficient tepelné vodivosti broušeného materiálu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] [3,17]

4.5.1 Výsledky hodnot sledovaných charakteristik pro radiální záběr a_e 0,005Tabulka 6 Výsledné parametry testování pro materiál 14 109.4, $a_e = 0,005$ mm[17]

Materiál 14 109.4		Obsah sintrovaného korundu			
AG92/99 80l(Gs)12VS	Symbol	0%	10%	30%	50%
A99 80L(Gs)12VS					
Měřená veličina	Symbol				
radiální záběr	a_e [mm]	0,005	0,005	0,005	0,005
Efektivní výkon broušení	P_c [kW]	0,608	0,55	0,47	0,384
Pasivní složka řezné síly	F_p [N]	42,8	38,7	33,0	27,0
Tangenciální složka řezné síly	F_c [N]	19,0	17,2	14,7	12,0
Objemový výkon	U_t [mm ³ /s]	17,5	17,5	17,5	17,5
Měrná energie broušení	e_c [J/mm ³]	34,7	31,4	26,9	21,9
Ekvivalentní tloušťka broušení	h_{eq} [mm]	5,469E-05	5,469E-05	5,469E-05	5,469E-05
poměrný obrus	G	10,96	11,33	11,94	12,15
množství tepla přecházející do obrobku	Q_w [J/s]	486,4	440,0	376,0	307,2
hustota tepelného toku	φ_w [J/s.m ²]	8,89E+11	8,05E+11	6,88E+11	5,62+11
množství tepla odváděné třískou	Q_t [J/s]	121,6	110,0	94,0	76,8
vzniklé teplo	Q [J/s]	608	550	470	384
teplota třísek	t_t [°]	1991	1803	1544	1265
součinitel řezivosti	$\xi = F_p/F_c$	2,250	2,250	2,250	2,250
součinitel broušení	$\mu = F_c/F_p$	0,444	0,444	0,444	0,444

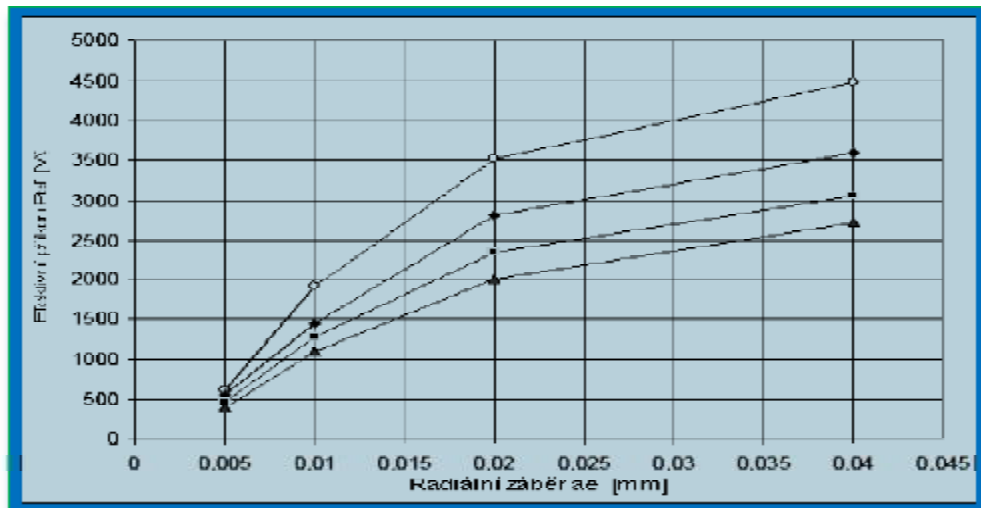
4.5.2 Výsledky hodnot sledovaných charakteristik pro radiální záběr a_e 0,04 mmTabulka 7 Výsledné parametry testování pro materiál 14 109.4, $a_e = 0,04$ mm [17]

Materiál 14 109.4		Obsah sintrovaného korundu			
Označení brousicího kotouče AG92/99 80l(Gs)12VS A99 80L(Gs)12VS	Symbol	0%	10%	30%	50%
Měřená veličina					
radiální záběr	a_e [mm]	0,04	0,04	0,04	0,04
Efektivní výkon broušení	P_c [kW]	4,48	3,58	3,04	2,72
Pasivní složka řezné síly	F_p [N]	280	224	190	170
Tangenciální složka řezné síly	F_c [N]	140,0	111,9	95,0	85,0
Objemový výkon	U_t [mm ³ /s]	140,0	140,0	140,0	140,0
Měrná energie broušení	e_c [J/mm ³]	32,0	25,6	21,7	19,4
Ekvivalentní tloušťka broušení	h_{eq} [mm]	4,38E-04	4,38E-04	4,38E-04	4,38E-04
poměrný obrus	G	70,37	73,76	79,82	83,56
množství tepla přecházející do obrobku	Q_w [J/s]	3584,00	2864,00	2432,00	2176,00
hustota tepelného toku	φ_w [J/s.m ²]	8,19E+11	6,55E+11	5,56E+11	4,97E+11
množství tepla odváděné třískou	Q_t [J/s]	896,0	716,0	608,0	544,0
vzniklé teplo	Q [J/s]	4480	3580	3040	2720
teplota třísek	t_t [°]	1835	1471	1252	1102
součinitel řezivosti	$\xi = F_p/F_c$	2,000	2,000	2,000	2,000
součinitel broušení	$\mu = F_c/F_p$	0,5	0,5	0,5	0,5

4.6 Grafické znázornění závislosti

Výsledky chování testovaných brousicích kotoučů, při stejných řezných podmínkách jsou znázorněny v následujících grafech.

4.6.1 Závislost efektivního výkonu při broušení materiálu ČSN 14 109.4

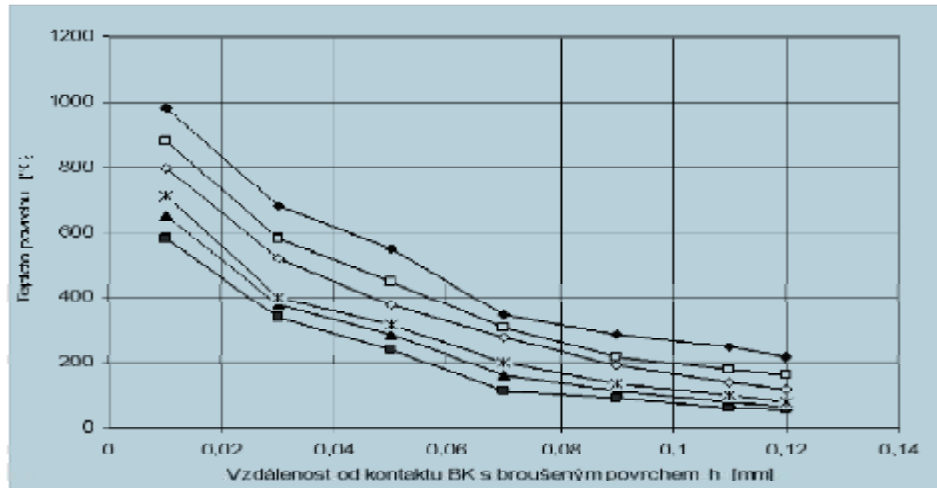


Obrázek 16 Graf závislosti efektivního výkonu u broušení na radiálním záběru [17]

Tabulka 8 Legenda ke grafu závislosti efektivního výkonu u broušení na radiálním Záběru [17]

Materiál: ČSN 14 109.4		Závislost $P_{ef} = f(a_e)$
radiální záběr $a_e = 0,005$		
Brousicí kotouč	sintrovaný korund	$v_f = 21,0 \text{ m/min}$, $v_c = 32,0 \text{ m/s}$
A99B 80L (GS) 12VS	0%	○ $P_{ef} = 1906 \cdot \text{Ln}.a_e + 10752$
AG92/99 80I (GS)12VS	10%	● $P_{ef} = 1506 \cdot \text{Ln}.a_e + 8508$
AG92/99 80I (GS)12VS	30%	■ $P_{ef} = 1264 \cdot \text{Ln}.a_e + 7167$
AG92/99 80I (GS)12VS	50%	▲ $P_{ef} = 1143 \cdot \text{Ln}.a_e + 6427$

4.6.2 Závislost teploty obrobku na vzdálenosti od kontaktu brousicího kotouče s broušenou plochou u materiálu ČSN 14 109.4



Obrázek 17 Graf závislosti teploty obrobku u broušení materiálu ČSN 14 109.4[17]

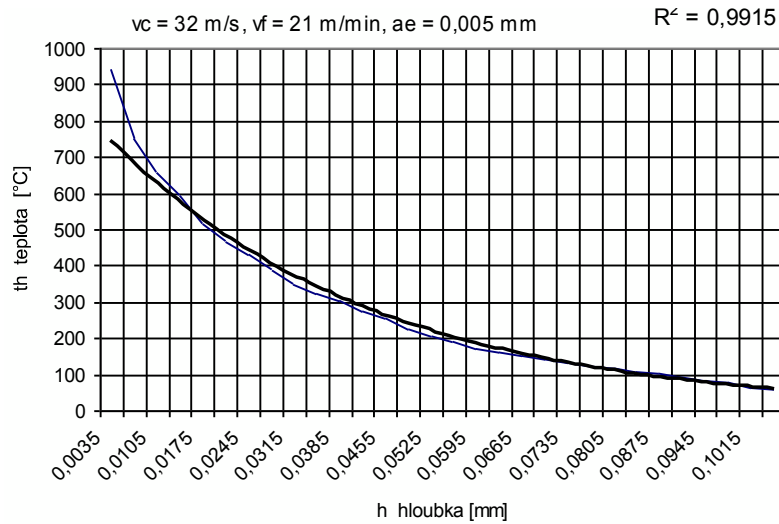
Tabulka 9 Legenda ke grafu č 2 Analytická formulace závislosti teploty obrobku na vzdálenosti od kontaktu brousicího kotouče s broušenou plochou [17]

Materiál ČSN 14 109.4		Závislost $T = f(h)$	
Brousicí kotouč	Sintr.korund	$v_f = 21,0 \text{ m/min}, v_c = 32,0 \text{ m/min}$	
A99 B80L (Gs) 12VS	0%	◆ $a_e = 0,04 \text{ mm}$	$T = 1044,1 \cdot e^{(-13,5 \cdot h)}$
AG92/9980L(Gs)12VS	10%	□ $a_e = 0,04 \text{ mm}$	$T = 961,4 \cdot e^{(-15,4 \cdot h)}$
AG92/9980L(Gs)12VS	30%	◇ $a_e = 0,04 \text{ mm}$	$T = 905,3 \cdot e^{(-17,0 \cdot h)}$
AG92/9980L(Gs)12VS	50%	⊙ $a_e = 0,04 \text{ mm}$	$T = 794,7 \cdot e^{(-19,2 \cdot h)}$
AG92/9980L(Gs)12VS	50%	■ $a_e = 0,02 \text{ mm}$	$T = 792,2 \cdot e^{(-18,8 \cdot h)}$
AG92/9980L(Gs)12VS	50%	▲ $a_e = 0,005 \text{ mm}$	$T = 665,9 \cdot e^{(-21,8 \cdot h)}$

4.6.2.1 Testovaný brousicí kotouč A99 80I 12VS

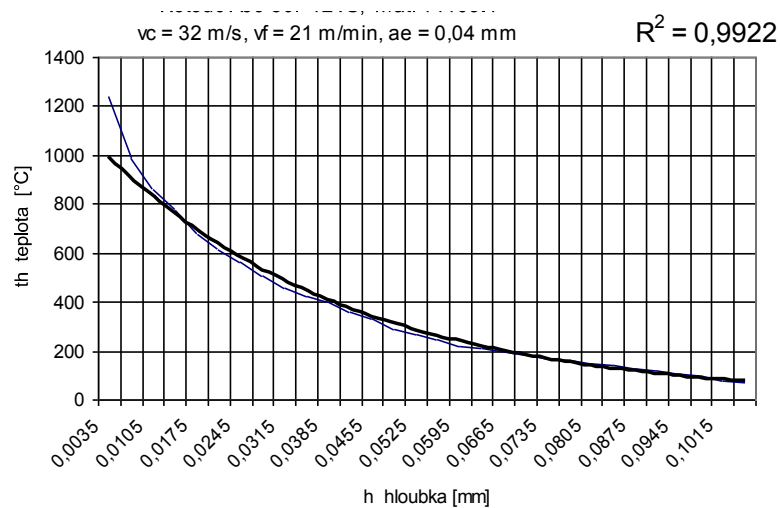
Příklad grafického znázornění závislosti teploty obrobku na vzdálenosti od kontaktu brousicího kotouče s broušenou plochou při broušení mat. ČSN 14109.4 pro etalonový brousicí kotouč s radiálním záběrem

a) $a_e = 0,005 \text{ mm}$



Obrázek 18 Graf závislosti teploty na vzdálenosti od broušené plochy $t_h = f(h)$

b) $a_e = 0,04 \text{ mm}$



Obrázek 19 Graf závislosti teploty na vzdálenosti od broušené plochy $t_h = f(h)$

5 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZJIŠTĚNÝCH PARAMETRŮ

5.1 Vstupní hodnoty a výsledek měření pro materiál ČSN 14 109.4 při radiálním záběru a_e 0,005 mm

Tabulka 10 Výsledky měření pro a_e 0,005 mm [17]

Mat. ČSN 14 109.4					
BK AG 92/99 80L (Gs) 12VS		Sintrovaný korund			
BK A99 80L (Gs) 12VS,	Symbol	0%	10%	30%	50%
Radiální záběr	a_e [mm]	0,005	0,005	0,005	0,005
Efektivní výkon broušení	P_c [kW]	0,608	0,55	0,47	0,384
Pasivní složka řezné síly	F_p [N]	42,8	38,7	33	27
Tangenciální složka řezné síly	F_c [N]	19	17,2	14,7	12
Střední aritmetická drsnost povrchu	R_a [μ m]	0,42	0,39	0,38	0,35
Měrná energie broušení	e_c [J/mm ³]	34,70	31,40	26,90	21,90
Hustota tepelného toku	ϕ_w [J/s.m ²]	8,89E+11	8,05E+11	6,88E+11	5,62E+11
Vzniklé teplo	$Q =$ [J/s]	608,0	550,0	470,0	384,0
Hmotnost odbroušeného kovu	m_t [kg/min]	0,0082	0,0082	0,0082	0,0082
Objemový výkon	U_t [mm ³ /s]	17,50	17,50	17,50	17,50
Ekvivalentní hloubka broušení	h_{eq} [mm]	5,47E-05	5,47E-05	5,47E-05	5,47E-05
Nominální plocha řezu	A_D [mm ²]	5,47E-04	5,47E-04	5,47E-04	5,47E-04
Objemové opotřebení BK	V_s [mm ³ /min]	95,70	92,70	88,00	86,40
Poměrný obrus (brusný poměr)	G	11,0	11,3	11,9	12,2
Koeficient účinnosti	η [mm ³ /J]	0,32	0,36	0,44	0,55
Součinitel řezivosti BK	ζ	2,25	2,25	2,25	2,25

5.2 Vstupní hodnoty a výsledek měření pro materiál ČSN 14 109.4 při radiálním záběru a_e 0,04 mm

Tabulka 11 Výsledky měření pro a_e 0,04 mm [17]

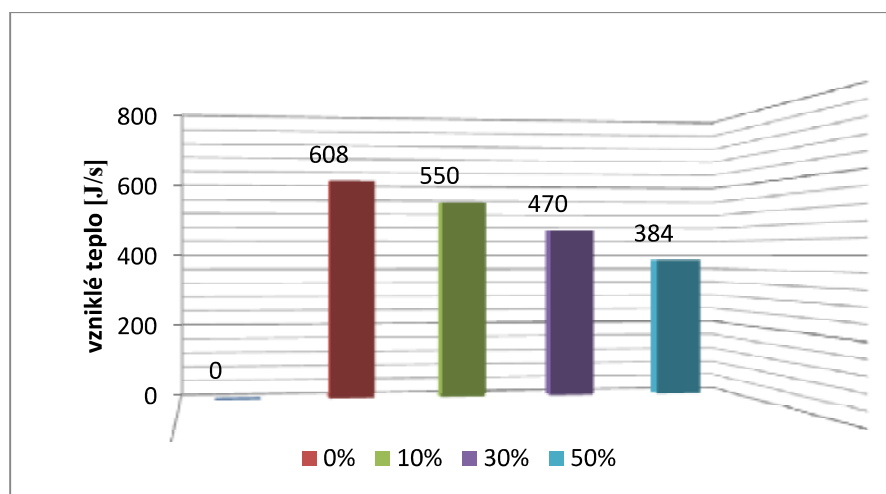
Mat. ČSN 14 109.4					
BK AG 92/99 80L (Gs) 12VS		Sintrovaný korund			
BK A99 80L (Gs) 12VS,	Symbol	0%	10%	30%	50%
Radiální záběr	a_e [mm]	0,04	0,04	0,04	0,04
Efektivní výkon broušení	P_c [kW]	4,48	3,58	3,04	2,72
Pasivní složka řezné síly	F_p [N]	280	224	190	170
Tangenciální složka řezné síly	F_c [N]	140	112	95	85
Střední aritmetická drsnost povrchu	R_a [μm]	0,64	0,60	0,61	0,58
Měrná energie broušení	e_c [J/mm ³]	32,00	25,60	21,70	19,40
Hustota tepelného toku	φ_w [J/s.m ²]	8,19E+11	6,55E+11	5,56E+11	4,97E+11
Vzniklé teplo	$Q =$ [J/s]	4480,0	3580,0	3040,0	2720,0
Hmotnost odbroušeného kovu	m_t [kg/min]	0,0655	0,0655	0,0655	0,0655
Objemový výkon	U_t [mm ³ /s]	0,00	0,00	0,00	0,00
Ekvivalentní hloubka broušení	h_{eq} [mm]	4,38E-0,4	4,38E-0,4	4,38E-0,4	4,38E-0,4
Nominální plocha řezu	A_D [mm ²]	4,38E-03	4,38E-03	4,38E-03	4,38E-03
Objemové opotřebení BK	V_s [mm ³ /min]	119,40	113,90	105,20	100,50
Poměrný obrus (brusný poměr)	G	70,4	73,8	79,8	83,6
Koeficient účinnosti	η [mm ³ /J]	2,20	2,89	3,68	4,30
Součinitel řezivosti BK	ζ	2,00	2,00	2,00	2,00

6 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDNÝCH CHARAKTERISTIK

Následující grafy zobrazují výsledky hodnot sledovaných charakteristik při použití brousících kotoučů s různým obsahem mikrokrytalického korundu proti standardnímu kotouči.

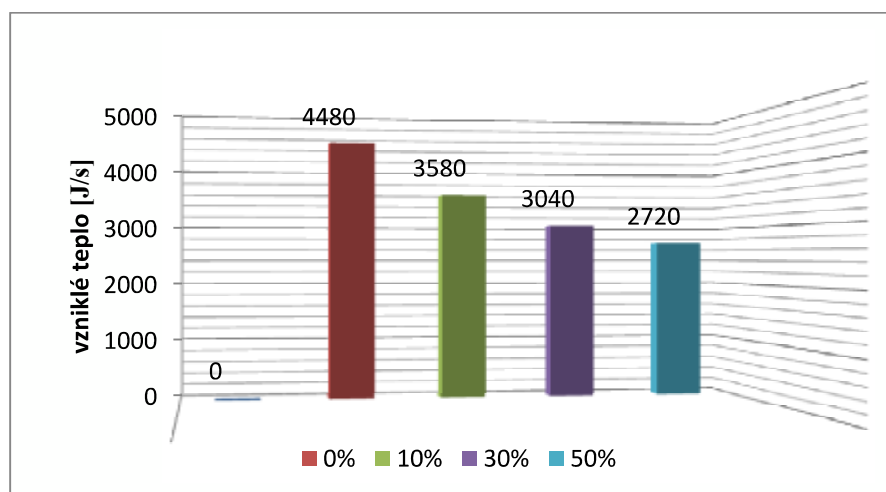
6.1 Množství vzniku tepla při radiálním záběru a_e 0,005 mm pro

materiál ČSN 14 109.4 podle obsahu mikrokrytalického korundu



Obrázek 20 Graf množství tepla pro radiální záběr a_e 0,005 mm [17]

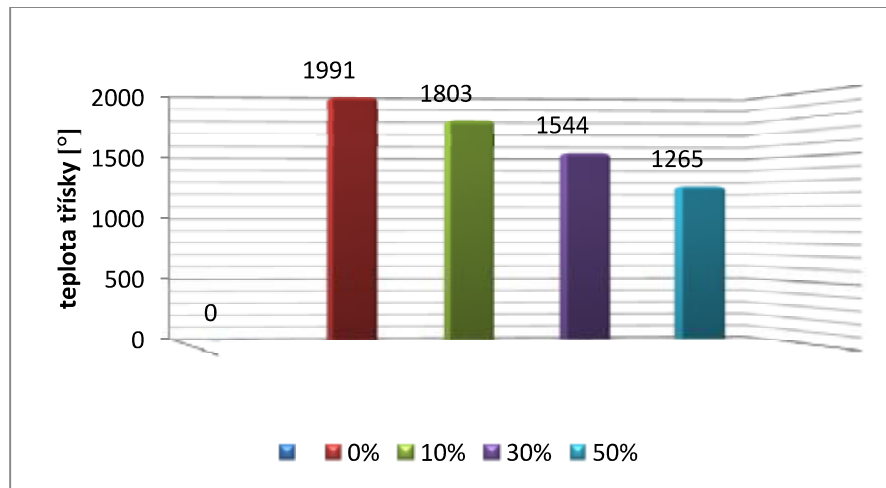
6.2 Množství vzniku tepla při radiálním záběru a_e 0,04 mm pro materiál ČSN 14 109.4 podle obsahu mikrokrytalického korundu



Obrázek 21 Graf množství tepla pro radiální záběr a_e 0,04 mm [17]

6.3 Teplota třísek při radiálním záběru a_e 0,005 mm pro materiál

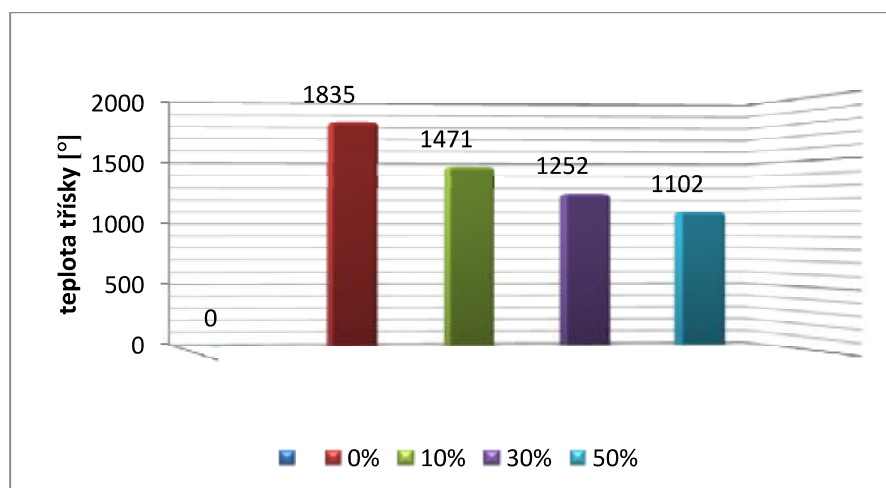
ČSN 14 109.4 podle obsahu mikrokrystalického korundu



Obrázek 22 Graf teplota třísky pro a_e 0,005 mm[17]

6.4 Teplota třísek při radiálním záběru a_e 0,04 mm pro materiál

ČSN 14 109.4 podle obsahu mikrokrystalického korundu

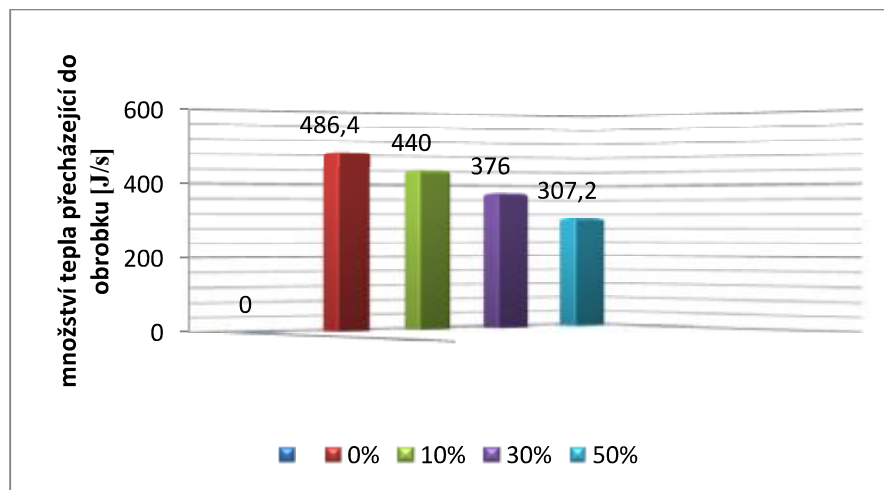


Obrázek 23 Graf teplota třísky pro a_e 0,04 mm[17]

6.5 Množství tepla přecházející do obrobku při radiálním záběru

a_e 0,005 mm pro materiál ČSN 14 109.4 podle obsahu

mikrokrytalického korundu

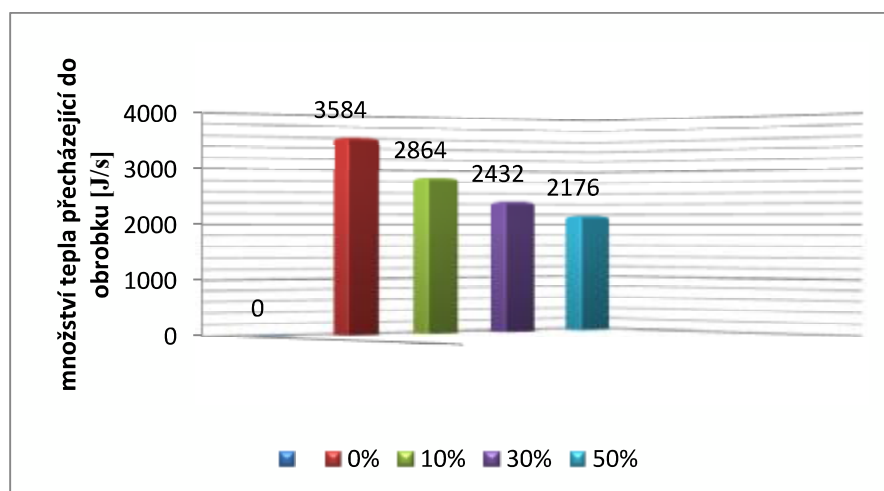


Obrázek 24 Graf množství tepla přecházející do obrobku při a_e 0,005 mm[17]

6.6 Množství tepla přecházející do obrobku při radiálním záběru

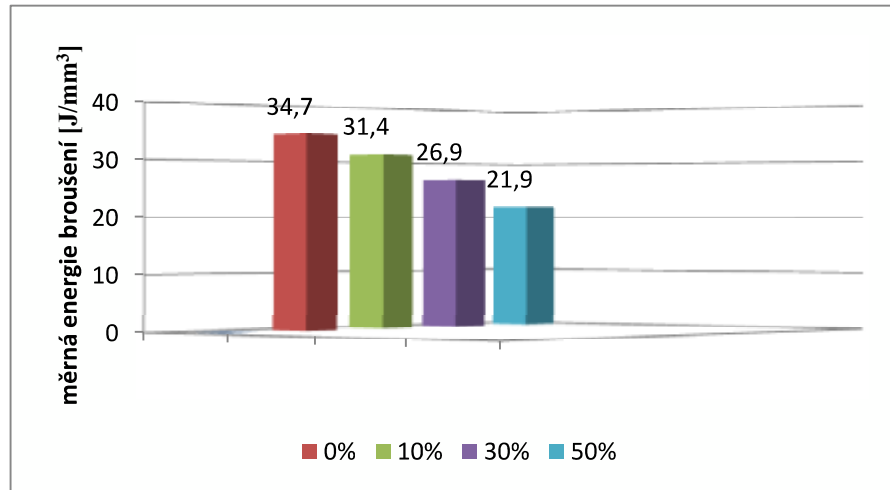
a_e 0,04 mm pro materiál ČSN 14 109.4 podle obsahu

mikrokrytalického korundu



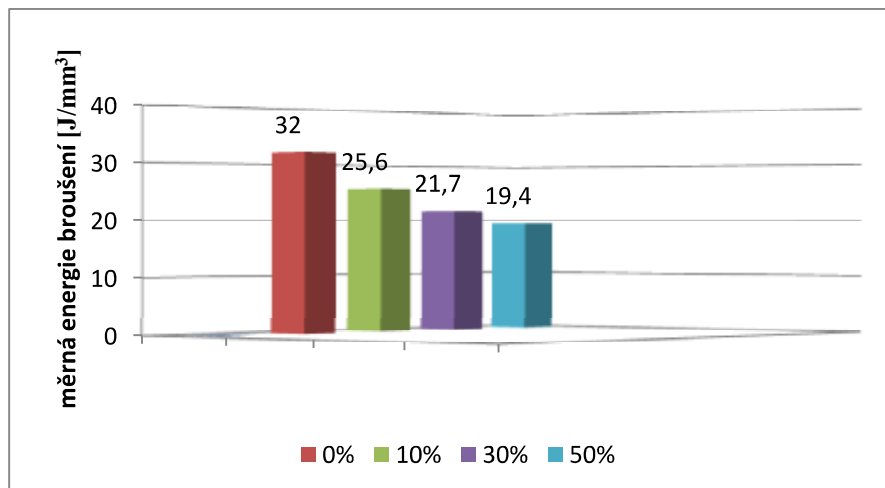
Obrázek 25 Graf množství tepla přecházející do obrobku při a_e 0,04 mm[17]

6.7 Měrná energie broušení při radiálním záběru a_e 0,005 mm pro materiál ČSN 14 109.4 podle obsahu mikrokrystalického korundu



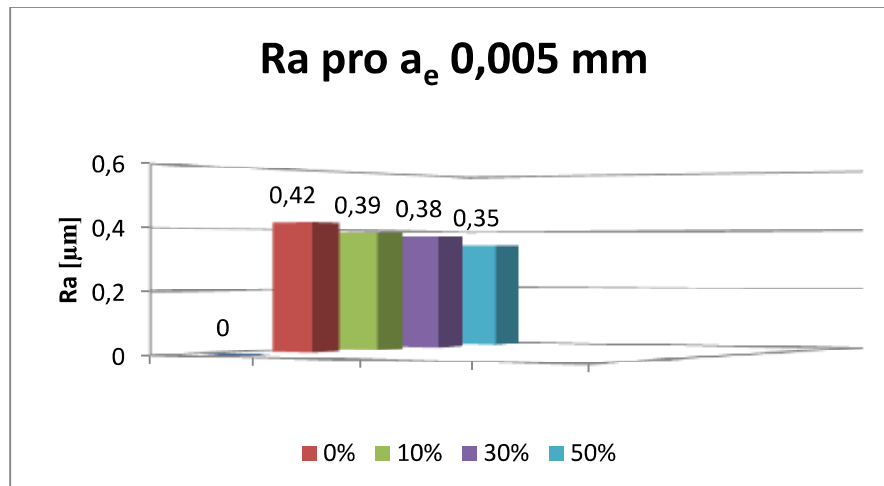
Obrázek 26 Graf měrná energie broušení pro a_e 0,005mm [17]

6.8 Měrná energie broušení při radiálním záběru a_e 0,04 mm pro materiál ČSN 14 109.4 podle obsahu mikrokrystalického korundu



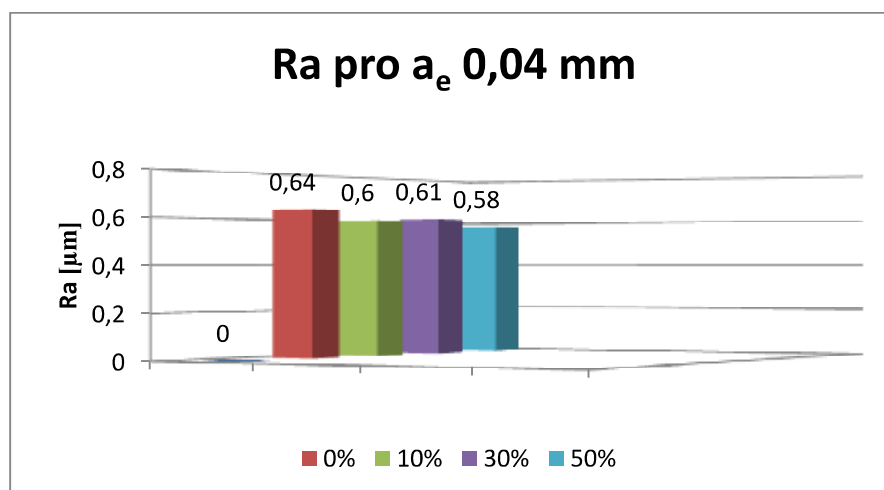
Obrázek 27 Graf měrná energie broušení pro a_e 0,04 mm [17]

6.9 Střední aritmetická drsnost povrchu pro radiální záběr a_e 0,005 mm pro materiál ČSN 14 109.4 podle obsahu mikrokrystalického korundu



Obrázek 28 Graf drsnosti obrobeneho povrchu pro a_e 0,005 mm[17]

6.10 Střední aritmetická drsnost povrchu pro radiální záběr a_e 0,04 mm pro materiál ČSN 14 109.4 podle obsahu mikrokrystalického korundu



Obrázek 29 Graf drsnosti obrobeneho povrchu pro a_e 0,04 mm[17]

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo provedení analýzy termodynamických jevů při aplikaci brousicích kotoučů s různým obsahem sintrovaného korundu. Na základě provedených experimentů a teoretického studia je možné stanovit některé obecné závěry. Stav povrchové vrstvy je z velké části ovlivněn množstvím tepla přeneseného do obrobku, velikost vzniklého reziduálního napětí je v přímé úměrnosti k teplu generovanému během broušení. V povrchové vrstvě broušené součásti dochází k elastické a plastické deformaci a také ke strukturálním změnám. Podle velikosti vzniklých objemových změn v jednotlivých vrstvách poté dochází k vytváření tahového nebo tlakového reziduálního napětí. Tlakové napětí je považováno za pozitivní, protože způsobuje zvýšení únavové pevnosti a zlepšuje odolnost povrchu proti otěru. Tahové napětí je negativním faktorem, který snižuje únavovou pevnost a podporuje poškození dynamicky namáhaných povrchů.

V rámci experimentu bylo na broušeném materiálu ČSN 14109.4 sledováno chování brousicích kotoučů AG92/99 80I(Gs) 12 VS s rozdílným obsahem mikrokrytalického korundu (10%, 30% a 50%) proti kotouči A99 80L 12 V. Zejména jejich vliv na teplo vzniklé při broušení. Z naměřených výsledků lze konstatovat skutečnost, že kotouče se zvyšujícím procentuálním podílem sintrovaného korundu vykazují lepší výsledky než standardní kotouč. Tato skutečnost je v uvedených příkladech velmi dobře viditelná v grafickém vyjádření. Ze získaných výsledků sledovaných parametrů lze stanovit tyto závěry:

Při aplikaci brousicích kotoučů s rostoucím obsahem sintrovaného korundu dochází k poklesu hodnot proti standardnímu kotouči u:

- efektivního výkonu P_c pro hloubku broušení a_e 0,005 mm 90,46 % (10% sintrovaného korundu, dále jen SK), 77,30% (30% SK) až na 63,16% (50%SK);
pro a_e 0,04 mm na 60,71%, pasivní složky řezné síly F_p 63,08% a 60,70%, tangenciální F_c až na 63,15% a 60,71%;
- měrné energie e_c pro a_e 0,005 mm 90,48% (10%SK), 77,52% (30% SK) na 63,11 % (50%SK);
u a_e 0,04 mm 80% (10%SK), 67,81% (30% SK), 60,62% (50%SK);
hustota tepelného toku φ_w až 63,21% a 60,68%;
- vzniklého tepla a množství tepla přecházející do obrobku u a_e 0,005 mm 90,46%(10%SK), 77,30%(30% SK), 63,15% (50%SK);
pro a_e 0,04 mm 79,91% (10%SK),67,85% (30% SK), 60,71% (50%SK);

- teploty třísky t_t pro a_e 0,005 mm na 90,55% (10%SK), 77,54% (30% SK), 63,53% (50%SK), pro a_e 0,04 mm 80,76% (10%SK), 62,22% (30% SK) 60,05% (50%SK);
- střední aritmetické drsnosti povrchu R_a pro a_e 0,005 mm na 92,85% (10%SK), 90,47% (30% SK), 83,33% (50%SK);
 a_e 0,04 mm 93,75% (10%SK), 95,31% (30%SK), 90,62% (50%SK);
- hodnoty u objemového výkonu U_t a součinitele řezivosti ζ zůstaly nezměněny;
- poměrného obrusu G , což je poměr materiálu odebraného z obrobku k objemu opotřebení broušícího kotouče, který byl porovnán z hlediska trvanlivosti nástroje až na 110,90% a 118,75%;

Výsledek experimentu dokazuje možnost realizace broušení za vyšších podmínek integrity povrchu tepelným zatížením, menších řezných sil a el. příkonu. Ze zjištěných výsledných charakteristik povrchové vrstvy obrobku na určitých parametrech lze konstatovat, že použití broušících kotoučům bázi sintrovaných korundů ve výrobním procesu je v oblasti ekonomické velkým přínosem. Použití těchto kotoučů vede ke snížení teploty povrchu a tím k eliminaci nežádoucího tahového pnutí ovlivněného přísunem a teplotou, které poškozují povrchovou vrstvu. Lepší výsledné parametry vedou k vyšší produktivitě, větší trvanlivosti kotouče, vyšší požadované kvalitě povrchu a tím ke snížení nákladů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s r.o. *Příručka obrábění*. přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s r.o., 1997, s. 857, ISBN 91-97-22 99-4
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M. aj. *Nové směry v progresivním obrábění*. 1. vyd. Ediční středisko VŠB – TUO, 2007, s. 251, ISBN 978-80-248-1505-3
- [3] KOČMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. 1. vyd. Brno. Akademické nakladatelství CERM s r.o. Brno, 2011, s. 330, ISBN 978-80-7204-722-2
- [4] KOČMAN, K.; PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2001, s. 270, ISBN 80-214-1996-2
- [5] KOČMAN, K. *Analysis of development grinding Wheel on the basis of microcrystalline corundum*. In Manufacturing Technology, journal for science and production, December 2010, vol. X, s. 2-10. ISSN 1213-2489
- [6] KRÍŽ, R.; VÁVRA, P. *Strojírenská příručka 7. svazek*. 1. vyd. Praha: Scientia, s r.o., 1996, s. 212, ISBN 80-7183-024-0
- [7] LUKOVICS, I.; SÝKOROVÁ, L.: *Stanovení řezivosti brousicích kotoučů pro vysokovýkonné broušení*. In.: *Sborník Mezinárodní conference Nástroje 99: Zlín, ČR, 1999*, s. 96 – 102
- [8] MASLOV, J. N.: *Teorie broušení kovů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980, s. 246
- [9] MÁDL, J.; BARCAL, J.: *Základy technologie II*, vydalo nakladatelství ČVUT, Praha, 2002, s. 55, ISBN 80-01-02610-8
- [10] MIKOVEC, M. *Obrábění materiálů s velkou pevností a tvrdostí*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1982, s. 200
- [11] NANOTECHNOLOGIE <http://www.nanotechnology.cz/storage/Nano02.pdf>
- [12] NOVOTNÝ, J.; ŠANOVEC, J.; BEDNÁŘ, B., aj. *Technologie I*. 2. vyd. nakladatelství ČVUT Praha, 2006, s. 227
- [13] OBRÁZKY UMĚLÝCH BRUSIV dostupné na:
<http://www.abranova.cz/editor/filestore/Image/Brusne%20materialy>
- [14] PTÁČEK, L. a kol.: *Nauka o materiálu I*. Akademické nakladatelství CERM s r.o. Brno, 2001, s. 505, ISBN 80-7204-193-2
- [15] ŘASA, J.; HANĚK, V.; KAFKA, J.: *Strojírenská technologie 4*. 1. vyd. Praha: Scientia, s r.o., 2003, s. 505, ISBN 80-7183-284-7

[16]SPECIÁLNÍ BRUSNÁ ZRNA, dostupné na: <http://www.abranova.cz/brusne-materialy/specialni-brusne-zrna/htm>

[17]ZDROJ VLASTNÍ

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_D	[mm ²]	nominální plocha řezu
A	[mm ²]	průřez odebírané vrstvy
a	[mm]	odhad parametru, konstanty
a_e	[mm]	radiální záběr
a_{max}	[mm]	maximální tloušťka třísky
b_D	[mm]	šířka broušení
b	[mm]	odhad parametru, exponentu
c	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita broušeného kovu
d_w	[mm]	průměr obrobku
e_c	[J.mm ⁻³]	měrná energie broušení
f_a	[mm.zdvih ⁻¹]	šířka broušené plochy (axiální posuv)
F	[N]	celková síla
F_c	[N]	tangenciální složka řezné síly
F_p	[N]	pasivní složka řezné síly
F_f	[N]	posuvová složka řezné síly
G	[-]	brusný poměr
h	[mm]	vzdálenost od broušeného povrchu
h_{eq}	[mm]	ekvivalentní tloušťka třísky
k_c	[MPa]	měrná řezná síla
m_t	[kg.min ⁻¹]	hmotnost obroušeného kovu (třísek
P_c	[kW]	efektivní výkon
T	[°C]	průběh teploty v broušeném povrchu
Q	[J.s ⁻¹]	teplo
Q_k	[J.s ⁻¹]	teplo přestupující do kotouče
Q_t	[mm ³]	objem obroušeného materiálu

Q_w	[mm ³ .s ⁻¹]	teplo přecházejícího do obrobku
q_t	[%]	podíl tepla přecházejícího do třísek
q_w	[%]	podíl tepla přecházejícího do obrobku
t_t	[°C]	teplota třísky
t_h	[°C]	teplota součástky ve vzdálenosti h od povrchu
U_t	[mm ³ .s ⁻¹]	objemový výkon
v_c	[m.s ⁻¹]	řezná rychlost
v_f	[m.min ⁻¹]	posuvová rychlost
v_w	[m.min ⁻¹]	obvodová rychlost obrobku
W	[-]	objemový součinitel třísek
φ	[J.s ⁻¹ .m ⁻²]	hustota tepelného toku
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	koeficient tepelné vodivosti broušeného materiálu
ρ	[kg.dm ⁻³]	hustota broušeného kovu
α_n	[rad]	normálový úhel hřbetu
β_1	[°]	mez plastické deformace
γ_n	[rad]	normálový úhel ostří
r_n	[mm]	poloměr zaoblení ostří
ξ	[-]	součinitel řezivosti BK
μ	[-]	součinitel broušení BK
η	[mm ³ .J ⁻¹]	součinitel účinnosti broušení
°C		stupeň Celsia, jednotka teploty
mm		milimetr - jednotka délkového rozměru
μm		mikrometr - jednotka délkového rozměru
MPa		jednotka tlaku, napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Model záběru brousicího zrna	13
Obrázek 2 Hlavní a posuvový pohyb u procesu broušení [2].....	16
Obrázek 3 Rovinné broušení, přímočarý pohyb stolu[3].....	18
Obrázek 4 Obvodové broušení s axiálním posuvem[3].....	19
Obrázek 5 Broušení dle pohybu stolu [2]	20
Obrázek 6 Schéma řezné a spojovací části brousicího kotouče [3].....	21
Obrázek 7 Názorný příklad označení brousicího kotouče [6]	22
Obrázek 8 Druhy struktury brousicího kotouče [2]	24
Obrázek 9 Upínání brousicího kotouče pomocí přírub [2].....	26
Obrázek 10 Umělý bílý korund [13].....	28
Obrázek 11 Umělý růžový korund[13]	28
Obrázek 12 Umělý hnědý korund [13]	29
Obrázek 13 Karbid křemíku [13].....	30
Obrázek 14 Znázornění ekvivalentní tloušťky třísky[3].....	39
Obrázek 15 Úhly jednotlivých zrn brusiva [2]	40
Obrázek 16 Graf závislosti efektivního výkonu u broušení na radiálním záběru[17]	53
Obrázek 17 Graf závislosti teploty obrobku u broušení materiálu ČSN 14 109.4[17].....	54
Obrázek 18 Graf závislosti teploty na vzdálenosti od broušené plochy $t_h = f(h)$	55
Obrázek 19 Graf závislosti teploty na vzdálenosti od broušené plochy $t_h = f(h)$	55
Obrázek 20 Graf množství tepla pro radiální záběr a_e 0,005 mm [17].....	58
Obrázek 21 Graf množství tepla pro radiální záběr a_e 0,04 mm[17]	58
Obrázek 22 Graf teplota třísky pro a_e 0,005 mm[17].....	59
Obrázek 23 Graf teplota třísky pro a_e 0,04 mm[17]	59
Obrázek 24 Graf množství tepla přecházející do obrobku při a_e 0,005 mm[17].....	60
Obrázek 25 Graf množství tepla přecházející do obrobku při a_e 0,04 mm[17].....	60
Obrázek 26 Graf měrná energie broušení pro a_e 0,005mm [17].....	61
Obrázek 27 Graf měrná energie broušení pro a_e 0,04 mm[17].....	61
Obrázek 28 Graf drsnosti obrobeného povrchu pro a_e 0,005 mm[17].....	62
Obrázek 29 Graf drsnosti obrobeného povrchu pro a_e 0,04 mm[17].....	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Znázornění rozlišení zrnitosti [6].....	23
Tabulka 2 Kvalitativní parametry [3]	33
Tabulka 3 Testované brousící kotouče [17].....	43
Tabulka 4 Chemické složení materiálu ČSN 14 109. [14]	44
Tabulka 5 Použití brousících kotoučů, stanovené řezné parametry a výsledky	46
Tabulka 6 Výsledné parametry testování pro materiál 14 109.4, $a_e = 0,005$ mm[17].....	51
Tabulka 7 Výsledné parametry testování pro materiál 14 109.4, $a_e = 0,04$ mm[17].....	52
Tabulka 8 Legenda ke grafu závislosti efektivního výkonu u broušení na radiálním	53
Tabulka 9 Legenda ke grafu č 2 Analytická formulace závislosti teploty obrobku na vzdálenosti od kontaktu brousícího kotouče s broušenou plochou [17]	54
Tabulka 10 Výsledky měření pro $a_e 0,005$ mm [17].....	56
Tabulka 11 Výsledky měření pro $a_e 0,04$ mm [17].....	57

