

EXPERIMENTÁLNÍ TESTY ŘEZIVOSTI BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ S ORIENTACÍ NA KVALITATIVNÍ PARAMETRY

Radovan Ondra

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: **Radovan ONDRA**

Osobní číslo: **T08567**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **EXPERIMENTÁLNÍ TESTY ŘEZIVOSTI BROUSÍCÍCH
KOTOUČŮ S ORIENTACÍ NA KVALITATIVNÍ
PARAMETRY**

Zásady pro vypracování:

Teoretická studie procesu broušení se zaměřením na materiál ČSN EU 14 220.4, kvantifikace základních vazeb s orientací na závislost parametrů drsnosti a dynamických charakteristik na hloubce řezu a velikosti posuvu včetně metody statistických charakteristik výsledků a vyhodnocení získaných hodnot.

1) Vymezení základních veličin při broušení 2) Přehled současného stavu hodnocení parametrů drsnosti a metod jejich měření 3) Teoretické závislosti parametrů drsnosti na hloubce řezu a posuvu 4) Kvantifikace naměřených výsledků s orientací na předpokládanou teoretickou závislost 5) Metoda provedení experimentů 6) Zpracování získaných výsledků analyticky a graficky

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího BP

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 11. 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

.....

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 užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce v rámci bakalářského studia předkládá experimentální testy řezivosti brousících kotoučů s orientací na kvalitativní parametry. V teoretické části je rozebrána teorie broušení, brusných kotoučů a základní vlastnosti nízkolegované oceli. V praktické části jsou popsána experimentální měření, která byla provedena na BPH 320 A. Testováno bylo pět různých hloubek broušení. Z dosažených hodnot byla vyhodnocena kvantifikace procesu broušení, drsnost povrchu, chování brusného kotouče a povrchu obroušeného materiálu.

Klíčová slova:

Broušení, brusné kotouče, hloubka broušení, drsnost povrchu, kvantifikace procesu broušení, drsnoměr Motutoyo Surfrest SJ – 301, nízkolegovaná ocel třídy 14, brousící materiál.

ABSTRACT

My bachelor study presents experimental tests determining rust development on grinding wheels with a focus on qualitative parameters. The theoretical component of my discussion is on the theory of grinding, attributes of grinding wheels and the basic properties of low alloy steel. The practical portion describes the experimental measurements that were performed on a BPH 320 A metal machine tool observed under five different cutting depths. The results were evaluated by quantification of the grinding process, the surface roughness, the behavior of the grinding wheel as well as the surface buffed material.

Keywords:

Grinding, grinding wheel, grinding depth, surface roughness, quantification of the grinding process, roughness Motutoyo Surfrest SJ - 301, low alloy steel grade 14, abrasive material.

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Karlovi Kocmanovi, DrSc. Za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 BROUŠENÍ	12
1.1 TECHNOLOGICKÁ CHARAKTERISTIKA BROUŠENÍ.....	12
1.1.1 Typické znaky broušení	13
1.1.2 Základní použití broušení	14
1.2 ROZDĚLENÍ BROUŠENÍ	14
1.3 CHARAKTERISTIKY ZÁKLADNÍCH METOD BROUŠENÍ	17
1.3.1 Obvodové broušení do kulata vnějších ploch	17
1.3.2 Obvodové broušení do kulata vnitřních ploch	20
1.3.3 Rovinné broušení.....	22
1.3.4 Tvarové broušení	23
1.4 ŘEZNÉ SÍLY	23
1.5 TERMODYNAMICKÉ JEVY PŘI BROUŠENÍ	24
1.6 DRSNOST POVRCHU	26
1.7 BROUSÍCÍ NÁSTROJE	28
1.7.1 Broušící materiály	28
1.7.2 Standardní broušící materiály.....	29
1.7.3 Označování standardních broušících nástrojů.....	29
1.7.4 Tvar, rozměry a specifikace standardních broušících kotoučů.....	31
1.8 OPOTŘEBENÍ BROUSÍCÍCH ZRN	33
1.9 KVANTIFIKACE EFEKTIVNOSTI PROCESU OBRÁBĚNÍ	34
2 NÍZKOLEGOVANÁ OCEL TŘÍDY 14	38
2.1 SLOŽENÍ, POUŽITÍ OCELI TŘÍDY 14.....	38
2.2 VLASTNOSTI MATERIÁLU.....	38
II ANALYTICKÁ ČÁST	39
3 PRAKTICKÉ ZKOUŠKY MĚŘENÍ	39
3.1 PARAMETRY BROUŠENÍ.....	39
3.1.1 Obráběný materiál	39
3.1.2 Broušící kotouč.....	39
3.1.3 Obráběcí stroj	40
3.1.4 Měřicí přístroje	41
3.2 METODIKA MĚŘENÍ	41
3.2.1 Kvantifikace procesu broušení	43
3.2.2 Měření drsnosti.....	43
3.2.3 Chování kotouče a pohledově ohodnocený povrch materiálu	43
3.3 VÝSLEDKY EXPERIMENTÁLNÍCH MĚŘENÍ.....	44
3.3.1 Kvantifikace procesu broušení	44
3.3.2 Měření drsnosti.....	45
3.3.3 Chování kotouče a pohledově ohodnocený povrch materiálu	46
ZÁVĚR	48

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	51
SEZNAM OBRÁZKŮ	53
SEZNAM TABULEK	54
SEZNAM GRAFŮ.....	55
SEZNAM PŘÍLOH	56

ÚVOD

Broušení se ve výrobě využívá již více než 100 let, i když první poznatky spadají do mladší doby kamenné. V těchto časech jej člověk využíval především k jednoduchým ručním operacím, kdy se z počátku jednalo o obrušování různých nástrojů o kameny nebo křemenný písek. Ve Středověku až do dob průmyslové revoluce se používalo brusných materiálů převážně k ostření a leštění nástrojů, zbraní a brnění. Intenzivní rozvoj broušení nastal teprve v druhé polovině 19. století, v době rozmachu strojního obrábění. Samotný brusný kotouč byl patentován až v roce 1860.

V dnešní době tvoří broušení 20-25% celkového strojního obrábění. Kdy jsou kladeny na kvalitní výrobek vysoké nároky v podobě dodržování rozměrových tolerancí, ale i tvarových přesností, jakosti povrchu apod. Z těchto důvodů si broušení kovových i nekovových materiálů udrží i do budoucna svoje uplatnění. S rozvojem výkonných brousících nástrojů a strojů se význam broušení rozšiřuje z původní oblasti dokončovacích operací také na produkční obrábění.

Práce je zaměřena na experimentální testy řezivosti brousícího kotouče vzhledem na materiál obrobku, k hloubce řezu, velikosti posuvu a základních vazeb. Následné vyhodnocení výsledků drsnosti.

Bakalářskou práci je rozdělena do dvou částí. První část bude věnována teorii technologii broušení, měření drsnosti a její závislosti na hloubce řezu, vlastnosti nízkolegované oceli.

Druhá část bude věnována praktické části. Z obroušených vzorků na stroji a jejich vyhodnocení drsnosti povrchu Ra, Rz na hloubkách řezu a kvantifikace procesu broušení.

I. TEORETICKÁ ČÁST

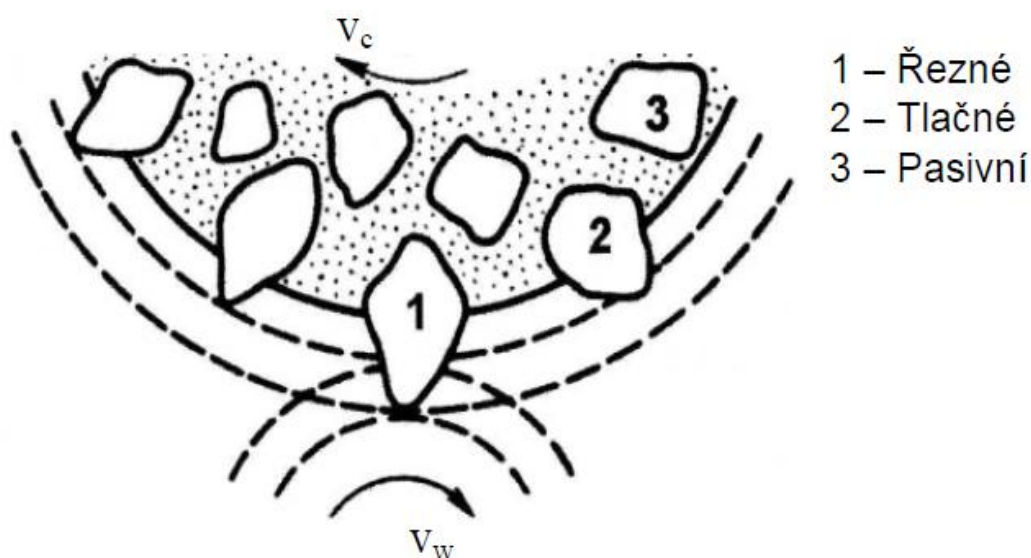
1 BROUŠENÍ

Broušení se používá zejména pro obrábění součástí s vyššími požadavky na přesnost rozměrů, tvarů a jakost povrchu. Dále se broušení uplatňuje při obrábění materiálů, které není možné jinými obráběcími metodami obrobit, brousící metoda je hospodárnější než jiné obrábění.

1.1 Technologická charakteristika broušení

Brousící proces má základní charakteristiky podobné jako jiné obráběcí procesy a zvláště je blízký frézování. Při broušení však dochází ke kvalitativním i kvantitativním odlišnostem, které souvisí zejména s vlastnostmi brousícího kotouče a řeznými podmínkami. Broušení se odlišuje především různorodostí geometrického tvaru brousících zrn a jejich nepravidelným rozmístěním po ploše brousícího nástroje. Brousící proces se uskutečňuje při vysokých řezných rychlostech. Rychlost při běžném broušení je 30 až 35 m.s⁻¹.

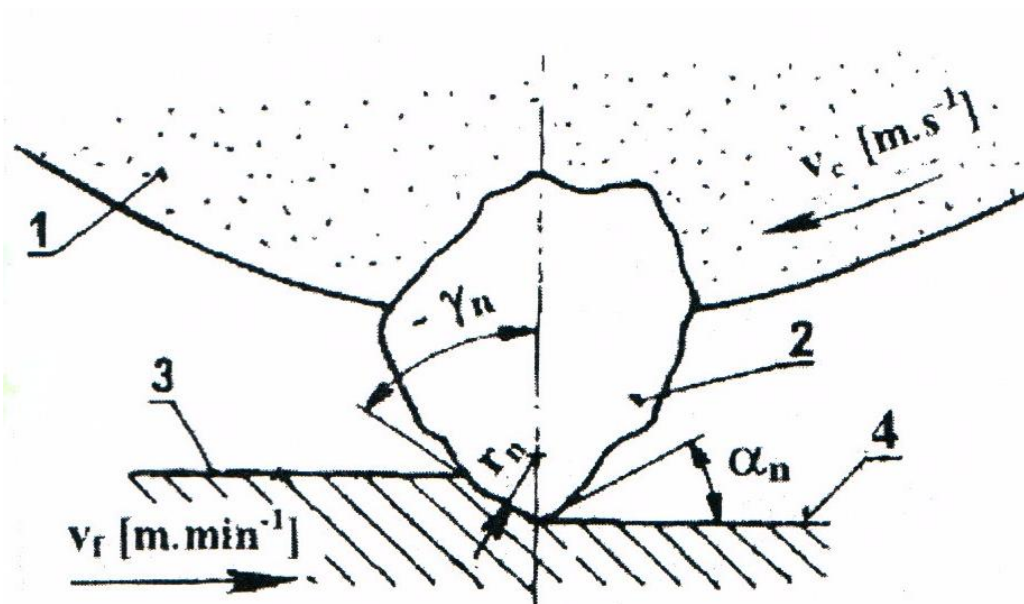
Od jiných způsobů obrábění se práce brousícího kotouče liší schopností tzv. samoostrění. Tato vlastnost brousícího kotouče souvisí s poměrně málo pevným zakotvením brousícího zrna ve vazbě kotouče. V důsledku zvýšení řezných sil na otupených zrnech se tato vylomí a jejich funkci přebírají zrna neotupená (Obr. 1.)¹.



Obr. 1. Zrna brousícího kotouče²

1.1.1 Typické znaky broušení

- brousící zrna jsou nepravidelně rozmístěna po ploše brousícího nástroje - dochází k nerovnoměrnému úběru třísky z obrobku,
- různorodost geometrického tvaru zrn, úhel zrna se mění a bývá vesměs záporný. Vysoká tvrdost zrna, odolnost proti teplotě, nepravidelné poloměry zaoblení ostří řádu několika tisícín milimetrů. Brousící zrna mají zpravidla negativní úhel čela a poměrně velký úhel hřbetu (Obr. 2.),
- brousící kotouč nemá souvislý břit,
- každé zrno brusiva působí na broušenou plochu dynamicky, což zvyšuje okamžitou teplotu broušení,
- v průběhu broušení hrany vyčnívajících ostrých zrn jsou více vystavené nárazům než hrany méně vyčnívající a zaoblené. Ostré hrany se otupují, přičemž se prostory mezi zrnými ucpávají třískami – ztráta řezivosti (nutnost použít orovnávačů),
- krátká doba záběru zrna brusiva s obrobkem vlivem vysokých řezných rychlostí ^{1,2}



Obr. 2. Model záběru brousícího zrna ¹

v_c – řezná rychlost; v_f – posuvová rychlost; γ_n – normální úhel čela;

α_n – normální úhel hřbetu; r_n – poloměr zaoblení ostří; 1 – brousící kotouč

2- brousící zrno; 3 – obráběná plocha; 4 – obrobená plocha

1.1.2 Základní použití broušení

Broušení je klíčovou technologií k výrobě pokročilých výrobků a povrchů v různých oblastech průmyslu. Obvykle se využívá tam, kde je potřebný jeden nebo více z následujících faktorů:

➤ *Požadavek vysoké přesnosti*

Broušením se dosahuje vysoké přesnosti a geometrické tolerance, proto se uplatňuje při dokončovacích operacích. Lze jím vyrábět velké součásti, jako jsou nožové sáně, i menší, jakými jsou např. kontaktní čočky, jehly, valivá ložiska apod.

➤ *Požadavek velkého úběru materiálu*

Typickým příkladem mohou být drážky pro odvod třísky u šroubovitého vrtáku, které jsou vybroušeny z tyčových polotovarů na jeden záběr, s plnou hloubkou drážky. Šroubovitě vrtáky tak lze vyrábět ve velkém množství, vysoké kvalitě, rychle a efektivně, s nízkými náklady.

➤ *Obrábění tvrdých materiálů*

Další výhodou broušení je schopnost obrobit velmi tvrdé materiály a kalené povrchy. V mnoha případech je jediným způsobem výroby součásti s těmito vlastnostmi. Takle schopnost se stává čím dál více důležitou díky rostoucímu využívání řezné keramiky a dalších tvrdých materiálů.

1.2 Rozdělení broušení

Na Obr. 3. - 4. jsou schematicky rozděleny základní operace broušení. Tyto operace lze rozdělit do těchto kritérií:

- typ obrobeného povrchu
- aktivní část brousících kotoučů
- vzájemný vztah obrobku a brousícího kotouče
- směr hlavního posuvného pohybu obrobku ve vztahu k brousícímu kotouči
- vzájemný vztah tangenciálních rychlostí brousících kotoučů a obrobku ve zvoleném bodě
- typ brousícího nástroje

Typ obrobeného povrchu - metody jeho vytváření⁷

- rovinné broušení – výsledkem je rovinná plocha.
- broušení do kulata – výsledkem je rotační povrch.
- broušení na otáčivém stole – broušení s rotačním posuvem.
- tvarovací broušení - označení brusných operací, jejichž výsledkem není ani plochý, ani válcový povrch, například broušení závitů, ozubených kol atd.
- kopírovací broušení – tvarové broušení, při kterém se obrobek tvaruje řízenou změnou posuvu, NC stroje atd.
- broušení tvarovými broušícími kotouči – profil broušícího kotouče určuje konečný profil obrobku.

Aktivní část broušících kotoučů⁷

- obvodové broušení – broušení obvodem kotouče (Obr. 3.).
- čelní broušení – broušení čelem kotouče kolmým k jeho ose (Obr. 4.).

Vzájemná poloha broušícího kotouče a obrobku⁷

- vnější broušení – broušení vnějšího povrchu obrobku.
- vnitřní broušení – broušení vnitřního povrchu obrobku.

Hlavní pohyb posuvu stolu vzhledem k broušícímu kotouči⁷

- axiální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče.
- tangenciální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě.
- radiální broušení – hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě D je radiální vzhledem ke kotouči.
- obvodové zápichové broušení – broušení s plynulým radiálním posuvem stolu.
- čelní zápichové broušení – broušení s plynulým axiálním posuvem stolu.

Vzájemný vztah tangenciálních rychlostí broušících kotoučů a obrobku ve zvoleném bodě⁷

- protiběžné broušení – broušení s opačným směrem pohybu broušícího kotouče a obrobku.

- souběžné broušení – broušení se stejným směrem pohybu brousícího kotouče a obrobku.

Typ brousícího nástroje

- vázaným brusivem – zrna brusného materiálu jsou spojena pojivem do určitého tvaru kotouče nebo segmentu.
- volné brusivo – zrna nejsou stmelena pojivem, vyskytují se ve formě prášku a používají se pro broušení kapalinou, lapování, honování a jiné způsoby.

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

Obr. 3. Vybrané způsoby obvodového broušení¹

		BROUŠENÍ ČELNÍ		
		radiální	tangenciální	axiální
Rovinné – pohyb stolu	přímočarý			
	otáčivý			

Obr. 4. Vybrané způsoby čelního broušení¹

n_s – frekvence otáčení brousícího kotouče; n_w – frekvence otáčení obrobku;

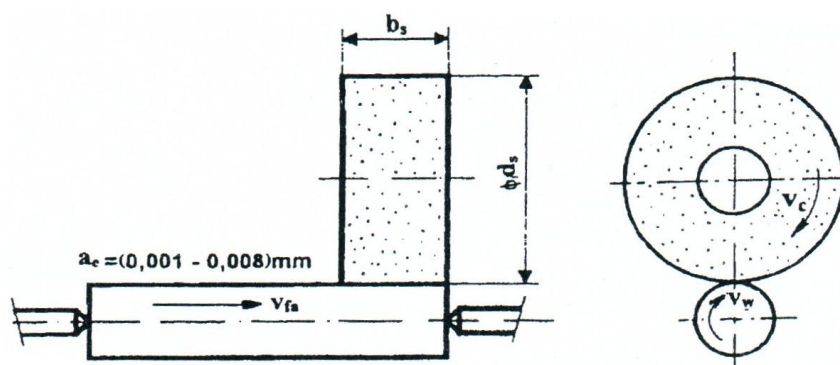
v_{fa} – axiální rychlost posuvu stolu; v_{fr} – radiální rychlost posuvu; v_{ft} – tangenciální rychlost posuvu stolu

1.3 Charakteristiky základních metod broušení

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

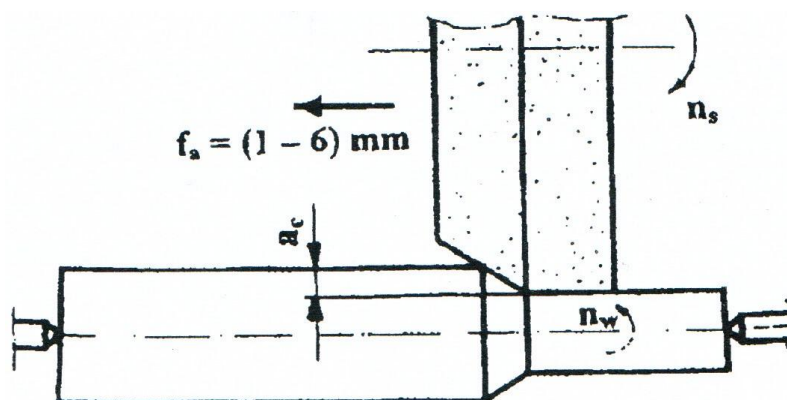
1.3.1 Obvodové broušení do kulata vnějších ploch

➤ **Broušení axiální** – broušení s podélným (axiálním) posuvem se používá zejména při broušení dlouhých součástek. Obrobek se otáčí mezi hroty a koná současně posuvový pohyb rovnoběžný s osou obrobku, popř. obrobek koná jen pohyb otáčivý a nástroj posuvový podél osy obrobku (Obr. 5.)³.



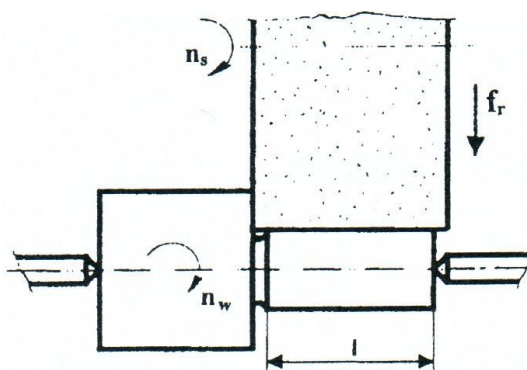
Obr. 5. Schéma obvodového broušení s podélným (axiálním) posuvem³

➤ **Broušení hloubkové** – broušení kotoučem nastaveným na rozměr (hloubkové broušení) je metoda broušení, kdy se celý přídavek obrousí za jeden podélný zdvih stolu s malou axiální rychlostí posuvu (Obr. 6.)³.



Obr. 6. Princip hloubkového broušení³

➤ **Broušení radiální** – podmínkou využití radiálního (zapichovacího) broušení je tuhý obrobek, zpravidla do maximální délky 350 mm. Výkon broušení je o 40 - 80% vyšší než u axiálního (Obr. 7.)³

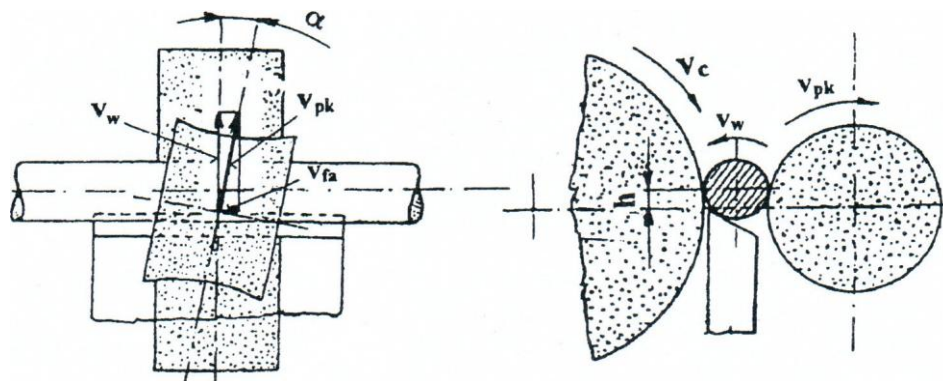


Obr. 7. Princip zapichovacího broušení³

➤ **Broušení bezhroté** – bezhroté broušení umožňuje vysokou produktivitu práce při průchozím i zapichovacím způsobu broušení.

a) **Bezhroté průběžné broušení** – použití při broušení hladkých válcových součástí

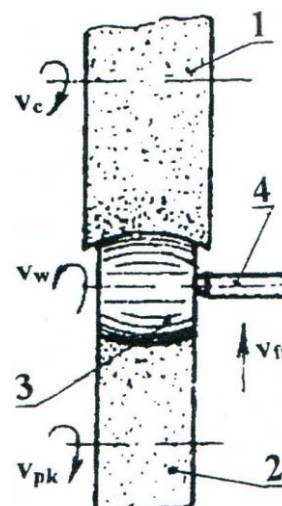
(Obr. 8.).



Obr. 8. Princip bezhrotého průběžného broušení³

α – úhel vyklonění podávacího kotouče; v_c – obvodová rychlost broušícího kotouče; v_{pk} – obvodová rychlost podávacího kotouče; v_w – obvodová rychlost obrobku; v_{fa} – axiální rychlost posuvu obrobku; h – výškové přestavení obrobku

b) **Bezhroté zápichové broušení** – používá se u součástí, které mají nákrůžek, tvarové nebo kuželové plochy a nemají středící důlky (Obr. 9.)³.

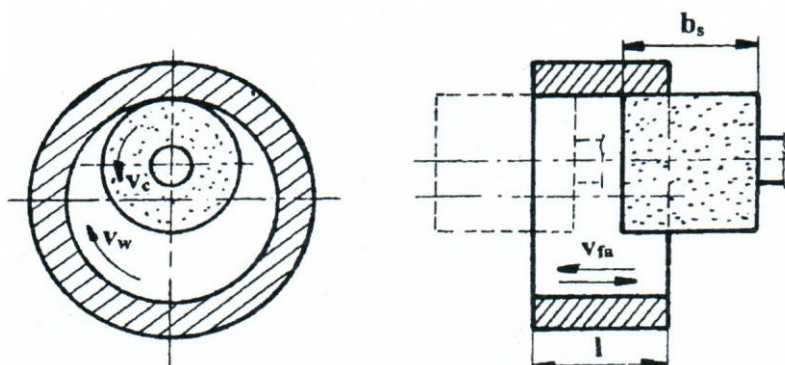


Obr. 9. Bezhroté zápichové broušení tvarové rotační plochy³

1 – broušící kotouč; 2 – podávací kotouč; 3 – obrobek; 4 – doraz

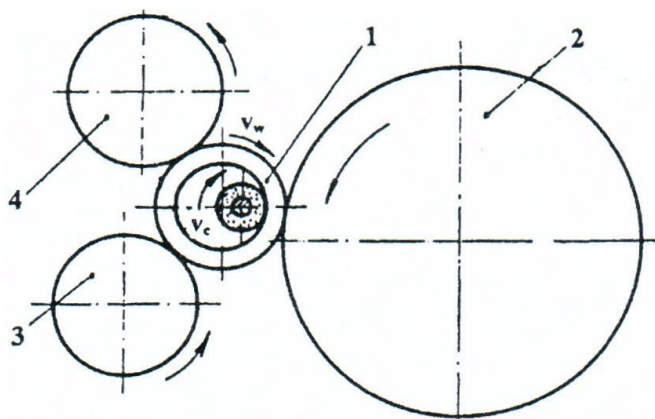
1.3.2 Obvodové broušení do kulata vnitřních ploch

➤ **Broušení axiální** – U axiálního vnitřního broušení se brousící kotouč otáčí uvnitř otvoru rychlostí v_c a posouvá se ve směru osy otvoru posuvem v_{fa} . Obrobek se otáčí s frekvencí otáčení n_w a obvodovou rychlostí v_w . Odbroušení přídavku se dosáhne vzájemného posunutí součásti a kotouče kolmo na broušený povrch o hodnotu pracovního (radiálního) záběru a_e (Obr. 10.)¹.



Obr. 10. Schéma vnitřního broušení s podélným posuvem a radiálním přísuvem³

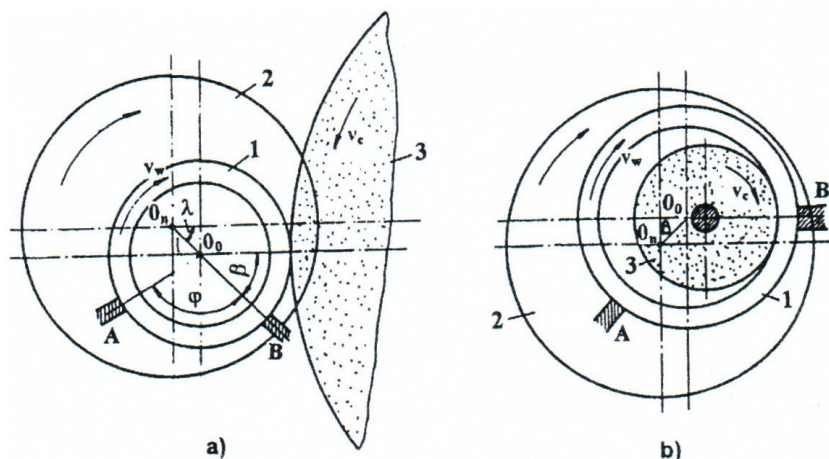
➤ **Bezhraté broušení** – bezhraté broušení se podobá vnitřnímu broušení. Všechny základní pohyby brousícího kotouče a obrobku jsou zachovány, rozdíl je v upínání součástky. Tento způsob broušení lze uplatnit pouze u součástí, které mají válcový vnější povrch souosý s broušeným vnitřním povrchem (Obr. 11.)¹.



Obr. 11. Schéma vnitřního bezhratého broušení¹

1 – obrobek; 2 – podávací kotouč (zabezpečuje otáčení obrobku); 3 – opěrný kotouč (určuje polohu součásti); 4 – upínací kotouč (přitlačuje a tím upíná)

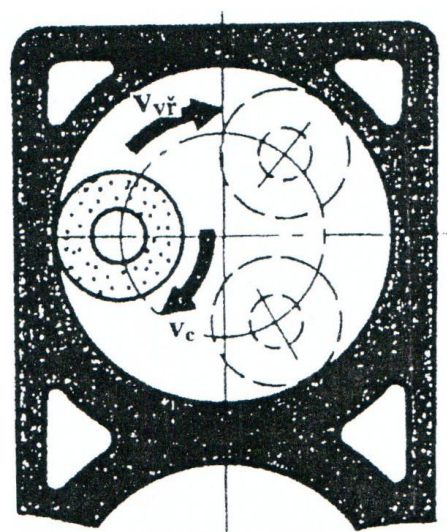
➤ **Bezhruté broušení v tuhých opěrkách** – použitím této aplikace se dosahuje vysoké přesnosti geometrického tvaru. Metoda je aplikovatelná pro vnější i vnitřní broušení (Obr. 12.)¹.



Obr. 12. Schéma broušení v tuhých opěrkách³

a – vnější broušení; b – vnitřní broušení; 1 – obrobek; 2 - příru-
ba; A, B – opěrky; 3 – brousící kotouč

➤ **Planetové broušení** – při broušení děr v součástech, které nelze upnout na brusce na díry do sklíčidla nebo čelistí, se používá planetového broušení. Nevýhodou je menší přesnost, vřeteno má delší vyložení a je proto méně tuhé (Obr. 13.)¹.

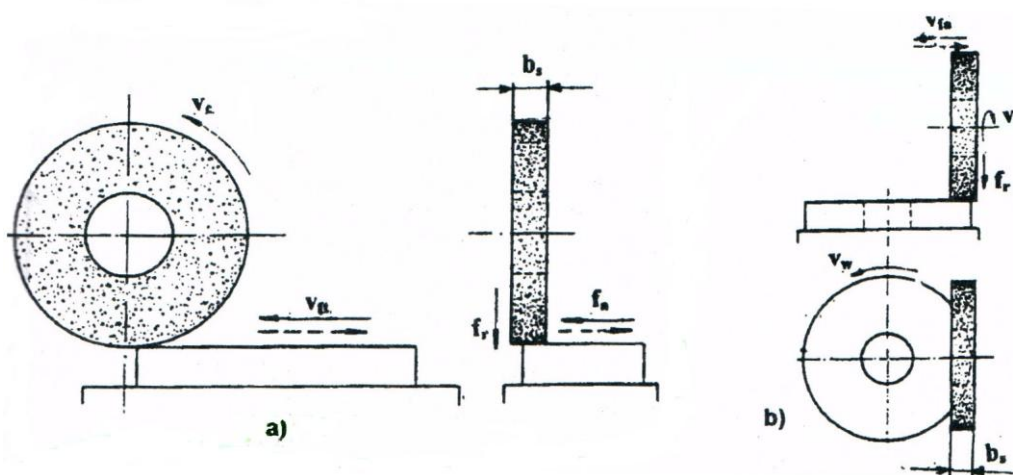


Obr. 13. Vnitřní planetové broušení³

$v_{vř}$ – rychlost otáčení osy brousícího kotouče ko-
lem osy broušené díry

1.3.3 Rovinné broušení

➤ **Broušení obvodové** – broušení obvodem kotouče je nejpřesnější způsob broušení ploch, protože se pracuje relativně úzkým kotoučem a obrobek se vlivem tepla, vzniklého při broušení, deformuje jen nepatrně. Používá se zejména při broušení přesných rovinných ploch a dále při výrobě nástrojů, měřidel, přípravků atd. (Obr. 14.)¹.

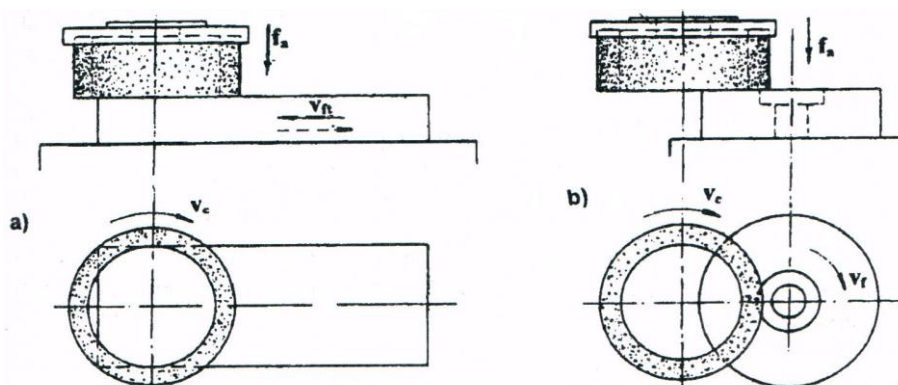


Obr. 14. Rovinné broušení obvodové¹

a – přímočarý pohyb stolu; b – otáčivý pohyb stolu

v_{ft} – rychlost posuvu stolu; v_c – řezná rychlost; v_w – obvodová rychlost obrobku; f_a – posun stolu vzhledem ke kotouči; b_s – tloušťka brousícího kotouče; f_r – hloubka broušení

➤ **Broušení čelní** – broušení čelem kotouče není tak přesné jak rovinné broušení obvodem, je však mnohem výkonnější (Obr. 15.)¹.



Obr. 15. Rovinné broušení čelní¹

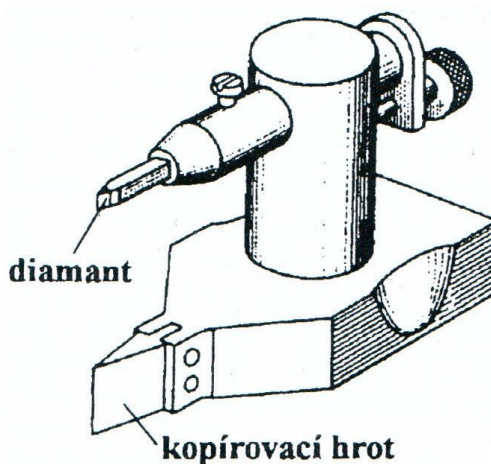
a – přímočarý pohyb stolu; b – otáčivý pohyb stolu

1.3.4 Tvarové broušení

Často se setkáváme i s broušením tvarové plochy i značně složitého tvaru. To by nešlo brousit jinak než:

- a) *Profilovými kotouči*
- b) *Kotouči s obvyklým tvarem*, přičemž kopírovací pohyb vykonává pomocí šablony brousící kotouč nebo součást, příp. tvar je definován číslicově v programových blocích.

K tvarování brousícího nástroje nám slouží např. ocelová kladka, brusičská kolébka, šablona (Obr. 16.), skloněná šablona.

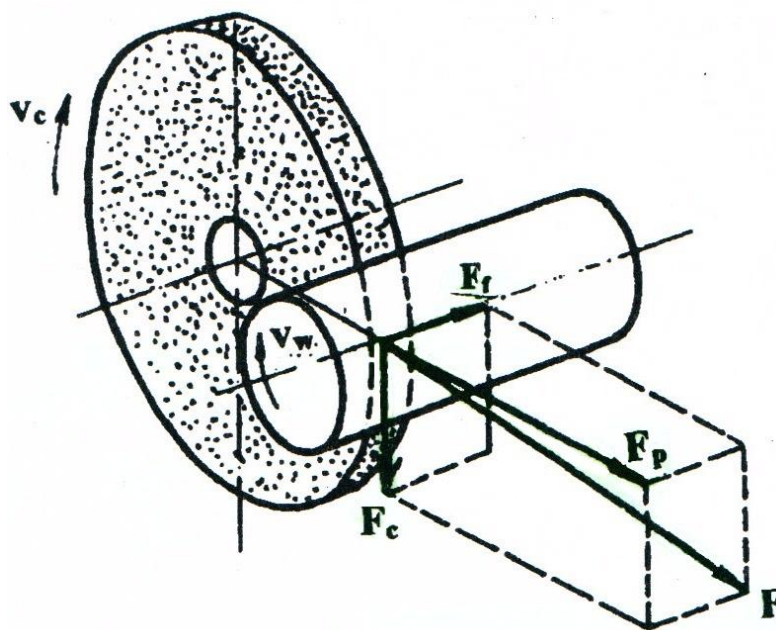


Obr. 16. Přípravek pro tvarování brousícího kotouče pomocí šablony³

1.4 Řezné síly

Vznik řezných sil při broušení mezi brousícím kotoučem a obrobkem se rozkládá do tří vzájemně kolmých směrů. Ve směru řezné rychlosti leží řezná síla F_c (způsobuje odřezávání třísky), pasivní síla F_p (přitlačuje brusné zrnko k obráběné ploše) je kolmá k broušené ploše a posuvová síla F_f působí ve směru podélného posuvu, tzn. kolmo na rovinu otáčení brusného kotouče (Obr. 17.)¹.

Záporný úhel čela brusných zrn způsobuje, že síla F_p je vždy větší než F_c . Při broušení platí, že $F_p > F_c > F_f$ a $F_p/F_c = 1,2 \div 3$ ¹.



Obr. 17. Rozložení řezných sil při obvodovém axiálním broušení do kulata¹

Zvyšování řezných sil má negativní dopad na brousící kotouč. Ten se více opotřebovává a snižuje se tak jeho životnost, zvyšuje se teplota při broušení, která má za následek snížení přesnosti obrábění a kvality obrobku. Na velikost řezných sil mají vliv řezné parametry, ale i charakteristika kotouče. Růst těchto sil je způsoben především snižováním řezné rychlosti (obvodové rychlosti kotouče) v_c , koncentrací zrnitosti, dále pak zvyšováním pracovního záběru a_e , obvodové rychlosti obrobku v_w nebo posuvové rychlosti v_f ².

1.5 Termodynamické jevy při broušení

Při broušení dochází k vytváření velkého množství tepla. Toto teplo vzniká přeměnou mechanické energie. Převážná část tohoto tepla pak, na rozdíl od jiných metod třískového obrábění, vzniká třením brousícího kotouče o povrch obrobku. Velká část tohoto tepla pak přechází do obrobku, také díky minimální tepelné vodivosti nástroje. Celé tepelné pole, obsahující kromě obrobku i třísky, nástroj a okolní prostředí, je nestatické⁶.

Teplo, které vzniká přeměnou mechanické energie, je odváděno:

- a) Obrobkem, (60 ÷ 80%)
- b) Brousícím kotoučem, (10 ÷ 13%)
- c) Třískami, (5 ÷ 30%)
- d) Okolním prostředím

Za pomoci diferenciálních rovnic vedení tepla v pevných látkách je možné provést jeho simulaci šíření v obrobku⁶.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (1.1)$$

kde: λ ...koeficient tepelné vodivosti broušeného materiálu [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Hustota proudění tepla φ přecházejícího z místa řezu do obrobku je pak⁶:

$$\varphi = \frac{Q \cdot q_w \cdot 10^4}{A_D} = \frac{C}{f_a^{0,47} \cdot a_e^{0,47}} v_c \cdot q_w \cdot 10^4 \quad (1.2)$$

kde: Q - množství tepla vznikajícího při broušení [$\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$]

q_w - množství tepla přecházejícího do obrobku [%]

A_D - jmenovitá plocha řezu [mm^2]

f_a - příčný posuv [$\text{mm} \cdot \text{zdvih}^{-1}$]

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

Stav povrchové vrstvy z velké části závisí na množství tepla přeneseného do obrobku. Množství generovaného tepla je přímo úměrné spotřebované energii. Rozhodující faktory ovlivňující výsledný stav je jak materiál obrobku, tak materiál nástroje. Dále použité řezné podmínky a s nimi související řezné prostředí a použité chlazení⁶.

1.6 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je důležitým činitelem zejména pro dynamicky namáhané součásti, které se začínají porušovat zpravidla od povrchu. Větší drsnost tedy nepříznivě působí na únavovou pevnost součásti, a popřípadě i na jejich odolnost proti otěru⁵.

Obrobená plocha není v žádném případě ideálně hladká. Vykazuje vždy určitý stupeň drsnosti, který je určen mikronerovnostmi vzniklými při obrábění⁵.

Drsnost obrobené plochy je způsobena stopami, které na ní zanechá břit nástroje. Druh a stupeň drsnosti závisí na způsobu obrábění, na fyzikálních a mechanických vlastnostech obráběného materiálu, na jakosti, tvaru a geometrii břitu, na řezných podmínkách, zejména na velikosti posuvu, hloubce řezu a na řezné rychlosti. Drsnost povrchu dosahovaná při obrábění může být dále ovlivňována tuhostí soustavy (stroj – nástroj – obrobek), způsobem upínání obrobku, řeznou kapalinou, třením třísky a nástroje o obrobený povrch, opotřebením nástroje apod⁵.

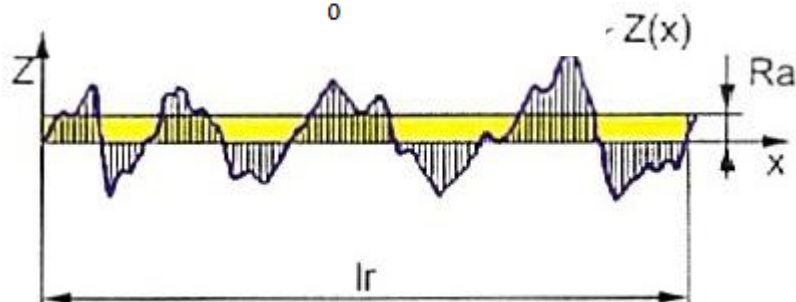
Drsnost povrchu obrobené plochy je zpravidla různá v příčném a v podélném směru. Příčný směr je kolmý ke směru řezného pohybu, podélný je s řezným pohybem rovnoběžný⁵.

Větší drsnost obrobené plochy v příčném směru při obrábění je např. (soustružení, vrtání atd.), u jiných způsobů obrábění je větší ve směru podélném (frézování). U dokončovacích operací je drsnost v obou směrech téměř stejná (obroušení, honování, lapování). Stupeň drsnosti se určuje zásadně ve směru největší drsnosti⁵.

V dnešní praxi se používá hodnocení povrchu ve 2D a 3D. 2D hodnocení je nejrozšířenějším způsobem zjišťování geometrie povrchu, patří zde mnoho parametrů určující drsnost povrchu (Profil povrchu, Měřené délky – mezní vlnové délky, Maximální výška profilu R_z , Střední aritmetická hodnota drsnosti R_a , Střední kvadratická hodnota drsnosti R_q , Abbottova křivka, atd.). Nejčastěji se však určují parametry R_a a R_z . Výhodou 2D hodnocení povrchu je rychlé zpracování dat.

R_a – střední aritmetická hodnota absolutních hodnot úchylek Z_i v rozsahu základní délky l_r (Obr. 18.)

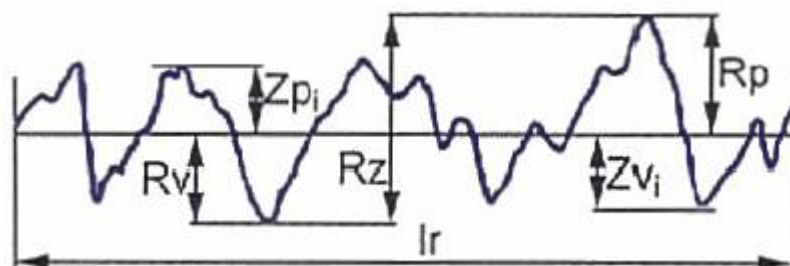
$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx [\mu m] \quad (1.3)$$



Obr. 18. Schematické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti R_a ⁸

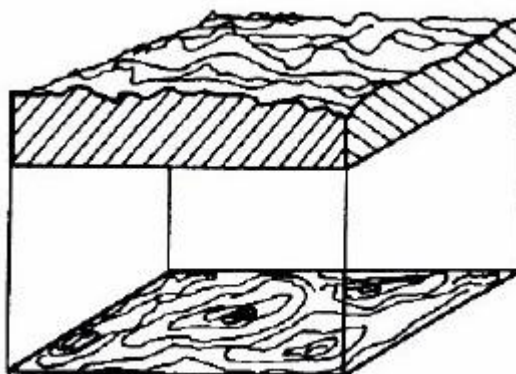
R_z – součet nejvyššího výstupku profilu R_p a nejnižší prohlubně R_v profilu v rozsahu základní délky (Obr. 19.)

$$R_z = R_{p \max} + R_{v \max} [\mu m] \quad (1.4)$$



Obr. 19. Schematické vyjádření maximální výšky profilu R_z ⁸

3D hodnocení geometrie povrchu je v dnešní době čím dál víc používána z důvodu hodnocení povrchu z tribologického hlediska (např. chování materiálu při lisování a tak sledování tření a adheze). Nejdokonalejší představu o reálném povrchu s jeho plošným tvarem a výškou nerovnoměrností je možné získat pomocí vrstevnicových map a případným axonometrickým zobrazením naměřených hodnot (Obr. 20.). Výhodou optické metody je, že lze měřit topografii povrchů ve 3D bezdotykově. Nevýhodou je časová náročnost vytvoření modelu, nutnost uskutečnit větší počet měření, drahé přístrojové vybavení.



Obr. 20. Axonometrické zobrazení a vrs-
tevníková mapa povrchu⁸

1.7 Broušící nástroje

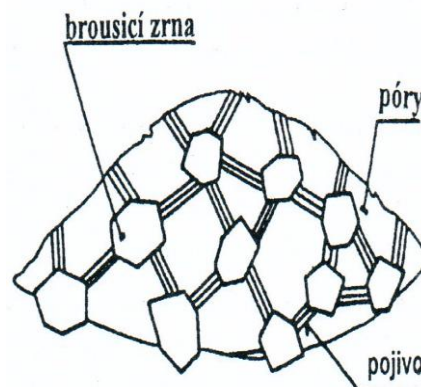
Jsou to řezné nástroje, které tvoří zrna brusiva pevně vázaná pojivem v tuhých či pružných tělesech různých tvarů a velikostí. Může být tvaru kotouče, kamene, segmentu, broušící tělíska, pásu apod. Největším rozsahu představují broušící kotouče.

1.7.1 Broušící materiály

Základní část broušících materiálů tvoří broušící zrna, která se používají ve formě volných zrn (broušící, lapovací a leštící prášky), zrn nanesených a přilepených k pružnému podkladu (broušící a leštící plátna a papíry), zrn rozptýlených v mazadlech a tekutinách (broušící a leštící pasty), nebo nejčastěji zrn spojených pojivem v tuhá tělesa potřebného tvaru (broušící kotouče a segmenty), (Obr. 21.)¹.

V technické praxi se používají standardní broušící materiály (na bázi kysličníku hlinitého Al_2O_3 a na bázi karbidu křemíku SiC), diamantové broušící materiály a broušící materiály z kubického nitridu bóru³.

Obr. 21. Schematické znázornění stavby broušícího kotouče – řezné části a spojovací části³



Krystaly (zrna) se štípují ve smykových plochách a mají pak různě zaostřené hrany, jež působí jako miniaturní nože s kladným nebo záporným úhlem čela. Tvrdost zrna a jeho brusná schopnost (brusivost), tj. množství materiálu odebraného za jinak stejných podmínek v jednotce času, jsou největší u diamantového zrna. Korund má řezivost asi 6krát menší, karbid křemíku dosahuje asi čtvrtinu řezivosti diamantu⁴.

Otupená zrna spotřebují více síly při řezání, tlak na ně vzrůstá a zrno se konečně vyloží ze svého podkladu, čímž nová, neotupená zrna přicházejí samočinně v činnost. Tato samoostřicí schopnost brusných kotoučů je důležitá pro udržení řezivosti kotoučů. **Tvrdostí kotoučů** označujeme jejich schopnost udržet zrna ve vazbě, není to tedy pojem totožný s tvrdostí materiálu zrn⁴.

Tvrdost kotouče závisí na složení a množství pojiva v poměru k množství zrn a na teplotě, při které se keramický kotouč vypaluje. Závady způsobené nevhodnou tvrdostí brusného nástroje se projeví tím, že kotouč má buď malou samoostřicí schopnost a že se nadměrně zahřívá, pálí a zanáší, čímž se jakost broušeného povrchu zhorší a spotřeba síly roste, nebo že se příliš měkký kotouč rychle opotřebuje. Jemná zrna mají relativně velký povrch a potřebují proto k dosažení stejné tvrdosti více pojiva⁴.

1.7.2 Standardní broušící materiály

Broušící materiály typu Al_2O_3 (umělý korund, elektrit) a broušící materiály typu SiC (karbidsilicium, karborundum) patří k technologicky nejrozšířenějším. Jejich označování a identifikace vlastností má řadu společných znaků a jsou tudíž charakterizovány společně¹.

1.7.3 Označování standardních broušících nástrojů

Podle ČSN ISO 525 (22 4503) se skládá z určení tvaru, rozměrů, specifikace složení broušícího materiálu a maximální obvodové rychlosti.

Příklad označení: Typ kotouče $1 - 300 \times 50 \times 76 - A 36 L 5 V - 35 \text{ m.s}^{-1}$

Jedná se o typ kotouče: Plochý broušící kotouč, vnější průměr 300 mm, tloušťka 50 mm, díra 76 mm, broušící materiál korund, velikost zrna 36, tvrdost L, struktura 5, pojivo keramické, maximální obvodová rychlost 35 s^{-1} .¹

Oproti starému, ale dosud široce používanému označování podle ČSN 22 4501, dochází k změnám (Tab. 1.).

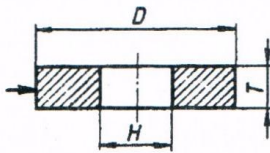
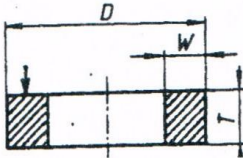
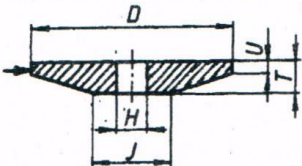
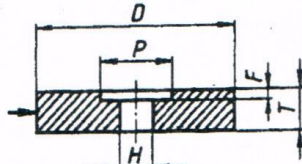
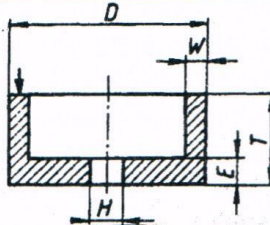
Tab. 1. Specifikace brousících materiálů Al_2O_3 a SiC podle ČSN 22 4501 a podle ČSN ISO 525 (22 4503)¹

Charakteristika	Vyjádření	Označení	
		ČSN 22 4501	ČSN ISO 525 (22 4502)
Druh	SiC černý	C 48	C
	SiC zelený	C 49	
	Al_2O_3 bílý	A 99 B	A
	Al_2O_3 barvený	A 99	
	Al_2O_3 růžový	A 94	
	Al_2O_3 manganový	A 98 M	
	Al_2O_3 hnědý	A 96	
	Al_2O_3 zirkonový	A 97 E	
	Al_2O_3 mikrokrytalický	A 97 M	
	Al_2O_3 polokřehký	A 97 P	
Zrnitost	velmi hrubá	250, 200, 160	není
	hrubá	125, 100, 80, 63	4,5,6,7,8,10,12,14,16, 20,22,24
	střední	50, 40, 32, 25	30,36,40,46,54,60
	jemná	20, 16, 12, 10	70,80,90,100,120,150, 180
	velmi jemná	8, 6, 6	220,240,280,320,360, 400,500,600,800,1000, 1200
	zvlášť jemná	4, 3, M32, M22, M15	není
Tvrдость	velmi měkký	G, H	není
	měkký	I, J, K	A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K
	střední	L, M, N, O	L,M,N,O,P,Q
	tvrdý	P, Q, R, S	R,S,T,U,V,W,X,Y
	velmi tvrdý	T, U	není
	zvlášť tvrdý	V, W, Z	není
Struktura	velmi hutný	1, 2	0,1,2,3,4,5,6,7,8, 9,10,11,12,13,14 atd.
	hutný	3, 4	
	polohutný	5, 6	
	pórovitý	7, 8	
	velmi pórovitý	9, 10	
	zvlášť pórovitý	11, 12, 13	
Pojivo	keramické	V	V
	silikátové	S	není
	pryžové	R	R
	pryžové s výztuží	RF	RF
	umělá pryskyřice	B	B
	umělá pryskyřice s výztuží	BF, BF-Flex	BF
	šlakové	E	E
	magneziové	Mg	Mg
	polyuretanové	U	není

1.7.4 Tvar, rozměry a specifikace standardních brousicích kotoučů

Tvar kotouče – Kotouče se označují typovým číslem, které udává jejich základní tvar (Tab. 2.).

Tab. 2. Označování tvarů a rozměrů brousicích kotoučů – výběr¹

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... x T/U ... x
5		Kotouče s jednostranným vybráním Typ 5 – D x T x H – P..., F
6		Kotouče hrncovité Typ 6 – D x T x H – W..., E

Rozměry kotouče – Rozměry kotouče vychází z jeho základního tvaru. Nejčastěji jsou popsány těmito údaji: vnější průměr kotouče, tloušťka a šířka, rozměr díry na upnutí atd.

Druh brousicího materiálu – Volí se v závislosti na vlastnostech materiálu obrobku.

Umělý korund – ocel, ocel na odlitky, temperované litiny, tvrdé bronzy

Karbid křemíku – šedá litina, mosaz, měď, lehké kovy a jejich slitiny, slinuté karbidy, sklo, keramika³.

Zrnitost brousicího materiálu – volí se podle závislosti na požadované drsnosti broušeného povrchu. Čím vyšší jsou požadavky na drsnost povrchu, tím jemnější zrnitost. Pro větší úběr materiálu a při broušení mosazi, mědi a hliníku se volí hrubší zrnitost³.

Tvrдость brousicího materiálu – tvrdost identifikuje soudržnost hmoty brousicího nástroje. Volí se podle pravidla (Čím tvrdší materiál obrobku a čím je větší styčná plocha brousicího kotouče s broušenou plochou, tím měkčí brousicí nástroj). Souvisí to s uvolňováním otupených zrn z nástroje³.

Struktura brousicího materiálu – Struktura (sloh) vyjadřuje vzdálenost mezi brousicími zrny, nebo také hutnost brousicího nástroje. Čím vyšší je číslo, tím je také vzdálenost mezi zrny větší. Hutné brousicí materiály se volí broušení tvrdých a křehkých materiálů. Na broušení houževnatých materiálů jsou vhodné kotouče pórovité. Zvláště pórovité kotouče slouží k broušení součástí, které se nesmí broušením příliš zahřívát³.

Pojivo – pojivo vytváří mezi brousicími zrny můstky a jeho vlastnosti významně ovlivňuje tzv. samoostření brousicího nástroje³.

Keramické pojivo (V) – jsou křehké, citlivé vůči nárazu a bočnímu tlaku. Řezná kapalina jim neškodí a při dobrém skladování se jejich vlastnosti nemění.

Magnezitové pojivo (Mg) – pevnost se skladováním snižuje, škodí mu vlhko, kyselá i zásaditá prostředí. Kotouče s tímto pojivem jsou křehké, používají se pro jemný výbrus bez tepelného ovlivnění součástí.

Umělá pryskyřice (B) – jsou méně citlivé vůči nárazům a bočním tlakům, zvláště kotouče se sklotextilní výztuží. Slouží k hrubování, broušení vnějších i vnitřních válcových ploch, rovinných ploch, řezání kovů, kamene a keramiky.

Pryžové pojivo (R) – se používá na jemné ostření nástrojů, broušení vnějších válcových ploch, jako tenké řezací kotouče, podávací kotouče u bezhrotého broušení a zvláště elastické nástroje pro čištění a leštění.

Polyuretanové pojivo – jsou určeny pro jemné broušení a leštění.

Šelakové pojivo (E) – se používají jako lešticí pro leštění kamene.

Maximální obvodová rychlost – vyjadřuje maximální obvodovou rychlost, kterou lze u kotouče použít.

1.8 Opotřebení brousicích zrn

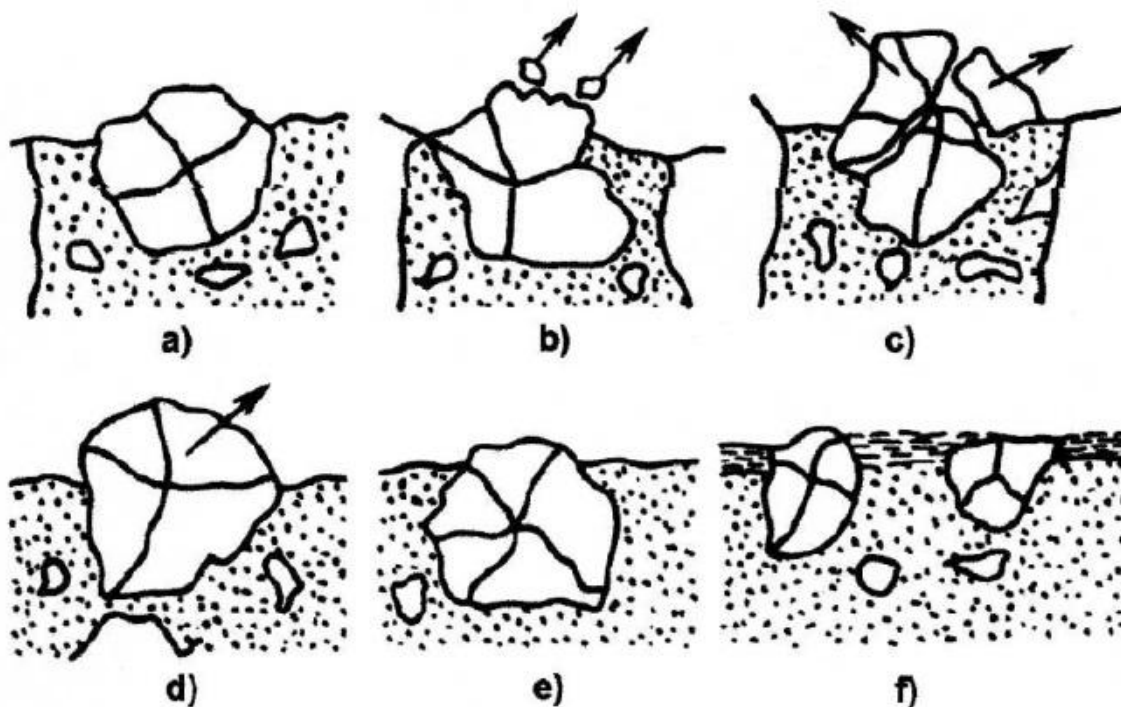
Během procesu broušení se brousicí kotouč postupně opotřebovává, což vede ke změnám provozních podmínek, snížení jeho pracovní schopnosti a výsledné jakosti povrchu. Opotřebení funkční části kotouče je složitý fyzikálně chemický proces, který je ovlivňován všemi podmínkami broušení. Podle parametrů kotouče a řezných podmínek dochází k otupování brusných zrn nebo k jeho samoostření².

Otupení nastává zaoblováním, štěpením a vylamováním brusných zrn, čímž kotouč ztrácí řezné vlastnosti. K samoostření dochází v důsledku postupného otupování brusných zrn a jejich vylamování z pojiva při rostoucím řezném odporu. Následným vydrolením pojiva se dostávají do záběru nová zrna, takže se plocha kotouče neustále obnovuje. Pro některé brousicí kotouče je tato schopnost typická².

Podle podmínek broušení rozlišujeme tyto základní druhy opotřebení (Obr. 22.)².

- a) Otěr řezných částí zrn brusiva se vznikem více či méně hladkých plošek
- b) Mikroskopické porušování (štěpení) zrn
- c) Porušování celých zrn z pojiva
- d) Úplné vylamování zrn z pojiva

- e) Porušení působením chemických vlivů ve styčném pásu zrna a obráběného materiálu při vysokých teplotách vznikajících v zóně broušení
- f) Zanášení prostoru mezi zrny (pórů) třískami a brusným odpadem



Obr. 22. Základní způsoby opotřebení brousicího kotouče²

1.9 Kvantifikace efektivity procesu obrábění

Ke komplexnímu hodnocení brousicích kotoučů byly aplikovány požadované charakteristické veličiny v procesu broušení, kvantifikované podle následných kritérií³.

➤ **Stanovení řezné síly F_c**

Teorii zabývající se silami při broušení (uvedené v kapitole 1.3) lze sílu F_c přibližně určit z experimentálně získané rovnice při rotačním broušením s příčným posuvem³:

$$F_c = C_m \cdot v_s^{0,7} \cdot f_a^{0,7} \cdot a_e^{0,6} \quad [N] \quad 1.5$$

Kde: C_m – konstanta charakterizující broušený obrobek (pro zakalené oceli $C_m = 21$)

v_s – řezná rychlost [m.s⁻¹]

f_a – rychlost posuvu [m.s⁻¹]

a_e – radiální záběr [mm]

➤ **Měrná energie broušení e_c**

Účinnost energetické stránky procesu broušení, čím menší je hodnota e_c , tím lepší je řezivost BK³.

$$e_c = \frac{F_c \cdot v_c}{Q_w} \quad [J.mm^{-3}] \quad 1.6$$

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

Q_w – objemový výkon [mm³.s⁻¹]

➤ **Objemový výkon Q_w**

Je definován jako úběr materiálu za jednu sekundu, se zvyšující se hodnotou Q_w se zvyšuje i řezivost BK³.

$$Q_w = \frac{a_e \cdot b_D \cdot 10^3 \cdot v_w}{60} \quad [mm^3 \cdot s^{-1}] \quad 1.7$$

b_D – šířka broušení [mm]

v_w - rychlost obrobku [m.min⁻¹]

➤ **Součinitel řezivosti BK ξ**

Je určen poměrem mezi pasivní a řeznou silou při broušení³.

$$\xi = \frac{F_p}{F_c} \quad 1.8$$

➤ **Součinitel broušení BK μ**

Vyjadřuje poměr mezi řeznou a pasivní silou broušení³.

$$\mu = \frac{F_c}{F_p} \quad 1.9$$

➤ **Řezný příkon P_c**

Řezný příkon P_c brusného vřeteníku lze vypočítat³:

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{10^3} \quad [kW] \quad 2.0$$

➤ **Množství tepla Q**

Množství tepla Q , vzniklého při broušení z řezné síly a řezné rychlosti.

$$Q = F_c \cdot v_c \quad [J \cdot s^{-1}] \quad 2.1$$

Vzniklé teplo Q je odváděno třískami, obrobkem, chladicí kapalinou, prostředím a brousicím kotoučem. 2 % celkové práce řezání se spotřebuje na deformaci mřížky a vytvoření nových povrchů, 98 % práce se přemění v teplo³.

➤ **Teplo odváděné třískami Q_t**

$$Q_t = F_c \cdot v_c \cdot \frac{q_t}{10^2} \cdot 60 = m_t \cdot c \cdot (t_t - t_o) \quad [J \cdot \text{min}^{-1}] \quad 2.2$$

q_t – podíl tepla přecházejícího do třísek [%]

m_t – hmotnost třísek [kg.min⁻¹]

c – měrná tepelná kapacita broušeného kovu [J.kg⁻¹.K⁻¹]

t_o – teplota okolí [°C]³

➤ **Hustota tepelného toku φ_w**

Definuje množství tepla přecházející plochou 1m² obrobku v čase jedné sekundy³.

$$\varphi_w = \frac{Q \cdot \frac{q_w}{10^2}}{\frac{A_D}{10^6}} = \frac{F_c \cdot v_c \cdot q_w \cdot 10^4}{A_D} = \frac{10^3 \cdot P_c \cdot q_w \cdot 10^4}{A_D} = \frac{P_c \cdot q_w \cdot 10^7}{A_D} \quad [J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}] \quad 2.3$$

➤ **Množství tepla přecházející do obrobku Q_o**

$$Q_o = \varphi_w \cdot \frac{A_D}{10^6} = \frac{P_c \cdot q_w \cdot 10^7}{A_D} \cdot \frac{A_D}{10^6} = P_c \cdot q_w \cdot 10 \quad [J \cdot s^{-1}] \quad 2.4$$

q_w – množství tepla přecházejícího do obrobku [%]

h_{eq} – ekvivalentní tloušťka třísky [mm]

k_c – měrná řezná síla [MPa]

A_D – jmenovitá plocha řezu [mm²]

v_c – řezná rychlost na obvodu kotouče [m.s⁻¹]³

2 NÍZKOLEGOVANÁ OCEL TŘÍDY 14

2.1 Složení, použití oceli třídy 14

Ocel ušlechtilá slitinová nízkolegovaná určená k tepelnému zpracování, s obsahem manganu (Mn), křemíku (Si), chromu (Cr), hliníku (Al).

Použití: menší hřídele, ozubená kola, šneky, vačkové hřídele, vřetena obráběcích strojů, písní čepy, pera, zubové spojky, trny, upínací nářadí apod¹¹.

2.2 Vlastnosti materiálu

Ocel je dobře tvářitelná za tepla, po žihání na měkko i za studena je dobře obrobitelná (pro hladké obrábění se doporučuje ocel zušlechtěná na pevnost 690 až 880 MPa). Je dobře svařitelná. Je vhodná pro strojní součásti pro zušlechtění do průměru 35 mm k cementování s velmi tvrdou cementovanou vrstvou s velkou pevností v jádře po kalení.

Materiál 14 220 Mn – Cr s obsahem uhlíku 0,14 až 0,19 má mechanické vlastnosti:

- Pevnost v tahu min. Rm 785 MPa
- Tvrdost podle Brinella min. HB 239
- Mez kluzu min. Re 590 MPa¹¹

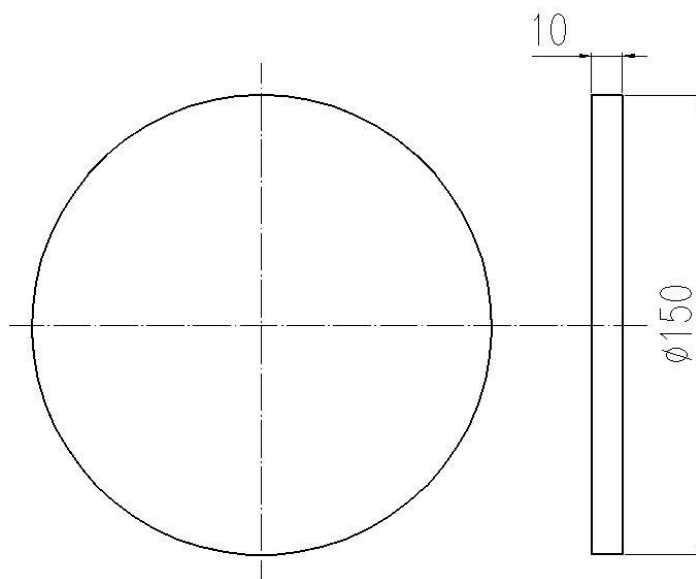
3 PRAKTICKÉ ZKOUŠKY MĚŘENÍ

3.1 Parametry broušení

3.1.1 Obráběný materiál

Jako zkušební vzorek byl odkoupený od firmy *CZ TOP TRADE s.r.o.*, uhlíková ocel ČSN 14 220, tyče kruhové válcované o průměru 150 a tloušťky 10mm (Obr. 23.). Pro následné cementování, kalení, popouštění a broušení. Byla nutnost orovnění povrchu na soustruhu.

Materiál byl zakalen u firmy *Kalírna Frydrych, s.r.o.*, cementován do hloubky 0,7 – 0,8 mm, kalen, popuštěn na 59 – 61 HRC.

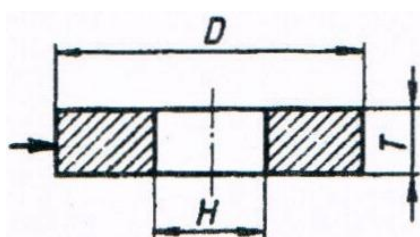


Obr. 23. Rozměry materiálu

3.1.2 Broušící kotouč

Ke zkouškám byl použitý broušící kotouč od firmy Norton (Obr. 24.) s označením 5SG46G12VXPC. Jedná se o špičkové keramické kotouče nejvýkonnější řady Norton SG s keramickým zrnem. Tyto kotouče se vyznačují vysokou životností a díky kvalitě zrna schopností obrábět těžko obrobitelné materiály.

Tvar kotouče je znázorněn na (Obr. 25.). Brusné zrna se skládá z 50% koramizovaného umělého korundu a bílého korundu (materiál založený na oxidu hlinitém). Brusná zrna tohoto kotouče byla stmelena vysokotavitelným keramickým pojivem. Brusný kotouč je střední zrnitosti, nízké tvrdosti a velmi pórovitý. Maximální obvodová rychlost $35 \cdot s^{-1}$. $D - 245 \text{ mm}$, $T - 25 \text{ mm}$, $H - 76$.

Obr. 24. Kotouče Norton¹⁰Obr. 25. Kotouč plochý¹

3.1.3 Obráběcí stroj

Zkoušky byly prováděny na BPH 320 A (Obr. 26.), bruska na plocho, která je určena k broušení rovinných ploch.



Obr. 26. BPH 320 A

Parametry stroje:

Upínací plocha stolu: 320 x 1000 mm, upínací drážky stolu - počet 3 - šířka x rozteč: 12 x 100 mm, největší zatížení stolu: 2 800 N, největší šířka broušení: 320 mm, největší délka broušení: 1 000 mm, největší výška obrobku při novém kotouči: 350 mm, největší vzdálenost osy vřeteny od upínací plochy stolu: 475 mm, brusný kotouč: průměr x šířka x díra: 250 x 32 x 76 mm, otáčky brusného kotouče: 2280 - 2600 min^{-1} , průměr brusného kotouče po opotřebení: 120 mm, podélný pohyb stolu: 1 060 mm, příčný pohyb stolu: 350 mm, svislý pohyb broušícího vřeteníku: 420 mm, rychlost podélného pohybu stolu: 2 - 22 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, příčný posuv stolu v úvratích: 0,1 - 4 mm, svislý přísuv do řezu - 1 dílek na stupnici: 0,005 mm, svislý posuv motorický: 0,42 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, elektromotor broušícího vřeteníku: 4 kW, elektromotor čerpadla hydrauliky: 2,2 kW, elektromotor posuvu vřeteníku: 0,37 kW, celkový příkon stroje: 6,8 kVA, půdorysná plocha stroje: délka x šířka: 4100 x 1750 mm, výška stroje: 2 125 mm, hmotnost stroje: 3 200 kg^9 .

3.1.4 Měřicí přístroje

Na měření potřebných veličin byly použity tyto přístroje:

Měření rozměrů kotouče – digitální posuvné měřítko s přesností 0,001 mm

Měření rychlosti posuvu stolu – metr, stopky (BPH 320 A, na které byly prováděny zkoušky, nemá digitálně nastavení rychlost posuvu, funguje na dvou stupních rychlosti zapnutí hydrauliky, která se dají regulovat v rozmezí 2 - 22 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)

Měření drsnosti – drsnoměr Motutoyo Surftest SJ – 301

3.2 Metodika měření

Při hodnocení a optimalizaci broušících kotoučů, jejich vlastnosti při určitých podmínkách broušení, je důležité se zabývat kvantifikací efektivnosti procesu obrábění. Stanovení těchto kritérií je zapotřebí velké množství experimentů, které jsou časově náročné a také je zapotřebí prostředků, bez kterých by to nebylo možné realizovat.

Jak již bylo zmíněno, pro testy byl vybrán plochý kotouč s obvodovým broušením. Zkoušený materiál byl upevněn naplocho pomocí elektrického magnetu, kdy docházelo broušením k ubírání materiálu. Testy jsem si rozdělil na 5 částí, postupně jsem zvyšoval hloubku broušení a_e v rozmezí od 0,02 – 0,1 mm (Obr. 27.).



Obr. 27. Broušení zkoušeného materiálu

Na základě zadání této bakalářské práce byly sledovány tyto parametry: řezná rychlost v_c , hloubka broušení (radiální záběr) a_e , posuv stolu (axiální posuv) f_a , drsnost $R_a - R_z$. Cílem bylo zjištění závislosti drsnosti na hloubce broušení. Ke komplexnímu hodnocení broušicích kotoučů byly aplikovány požadované charakteristické veličiny v procesu broušení, kvantifikované podle následných kritérií: řeznou sílu F_c , měrná energie broušení e_c , objemový výkon Q_w , součinitel řezivosti BK ξ , Součinitel broušení BK μ , řezný příkon P_c , množství tepla Q , teplo odváděné třískami Q_t , teplota třísek t_t , hustota tepelného toku ϕ_w , množství tepla přecházející do obrobku Q_o . Dalším sledovaným aspektem bylo chování kotouče a pohledově ohodnocení povrchu materiálu. Výsledné hodnoty byly zpracovány do tabulek a grafů.

Během zkoušek zůstaly určité hodnoty řezných podmínek neměnné. Pro všech 5 zkoušek řezu se ponechala řezná rychlost v_c a posuv stolu f_a konstantní. Měnila se pouze hloubka broušení a_e . Materiál byl po celou dobu broušení chlazen procesní kapalinou.

řezná rychlost $v_c - 33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, posuv stolu (axiální posuv) $f_a - 10,22 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$

3.2.1 Kvantifikace procesu broušení

Během měřených hodnot se kvantifikace efektivity procesu broušení měnila v závislosti na hloubce broušení a_e . Neměnné hodnoty, jako řezná rychlost v_c , posuv stolu (axiální posuv) f_a , zůstaly konstantní. Vzorce, z kterých jsem vypočítal hodnoty, jsou v kapitole 1.9.

3.2.2 Měření drsnosti

Drsnost povrchu je další důležitá část hodnocení. Pro měření byl použit mobilní měřič drsnosti Motutoyo Surftest SJ – 301 (Obr. 28.), drsnoměr s prachotěsným, na dotek citlivým ovládacím displejem a vestavěnou tiskárnou. Pomocí tiskárny lze nechat vytisknout výsledky v různých formátech. Odpovídá mezinárodním standardům DIN, ISO, ANSI a JIS. Přístroj má i vestavěný paměťový disk na uložení hodnot.

Na přístroji byly nastaveny normy drsnosti ISO, cut-off (základní délka) λ_c na 0,25mm. Měřicí stojánek pro držení měřící hlavy byl nastaven na výšku měření povrchu obrobku, důležité bylo dodržení rovnoběžnosti mezi snímacím hrotem a plochou měřeného obrobku. Přístroj v cca 8sekundách vyhodnotil drsnost.

Drsnost byla měřena pro všech pět hloubek broušení.



Obr. 28. Surftest SJ – 301¹²

3.2.3 Chování kotouče a pohledově ohodnocený povrch materiálu

U kotouče byl sledován při broušení zvuk a u povrchu praskliny, spálení atd.

3.3 Výsledky experimentálních měření

3.3.1 Kvantifikace procesu broušení

Z údajů dosazených do vzorců, byly vypočteny hodnoty, které byly následně zpracovány do tabulek (Tab. 3.; 4.) a grafů (Příloha 1).

Tab. 3. Vypočtené hodnoty 1

Hloubka broušení a_e [mm]	Řezná síla F_c [N]	Měrná energie broušení e_c [J.mm ⁻³]	Objemový výkon Q_w [mm ³ .s ⁻¹]	Součinitel řezivosti BK ξ	Součinitel broušení BK μ
0,02	118,14	45,78	85,17	2,5	0,4
0,04	179,07	34,69	170,33	2,5	0,4
0,06	228,39	29,50	255,50	2,5	0,4
0,08	271,42	26,29	340,67	2,5	0,4
0,1	310,31	24,05	425,83	2,5	0,4

Tab. 4. Vypočtené hodnoty 2

Hloubka broušení a_e [mm]	Řezný příkon P_c [kW]	Množství tepla Q [J.s ⁻¹]	Teplo odváděné třískami Q_t [J.min ⁻¹]	Hustota tepelného toku φ_w [J.s ⁻¹ .m ⁻²]	Množství tepla přecházející do obrobku Q_o [J.s ⁻¹]
0,02	3,90	3898,76	40936,99	5,46.10 ⁹	2729,13
0,04	5,91	5909,42	62048,88	4,14.10 ⁹	4136,59
0,06	7,54	7537,01	79138,66	3,52.10 ⁹	5275,91
0,08	8,96	8957,00	94048,51	3,13.10 ⁹	6269,90
0,1	10,24	10240,20	107522,14	2,87.10 ⁹	7168,14

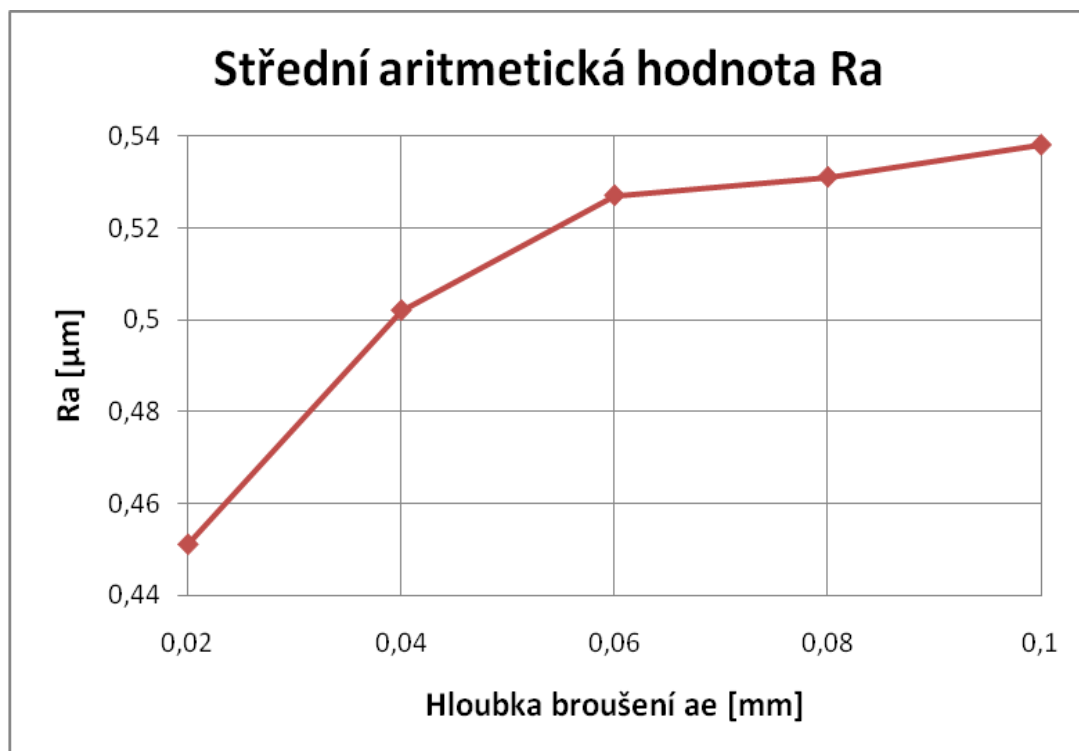
Podle výsledků je patrné, že s rostoucí hloubkou broušení se mění veškeré hodnoty. Od zvyšující se řezné síly F_c , řezivosti BK, řezného příkonu P_c , množství tepla Q , tepla odváděného třískami Q_t a množství tepla přecházejícího do obrobku Q_o . Měrná energie e_c se se zvyšující hloubkou broušení a_e zmenšovala, vlivem zvětšující se objemového výkonu Q_w tzn. čím je menší měrná energie e_c , tím je lepší řezivost BK. Hustota tepelného toku φ_w se také zmenšovala, množství tepla přecházejícího plochou 1m² obrobku v jedné sekundě se zmenšovala se zvyšováním jmenovité plochy řezu. Součinitel řezivosti BK ξ , broušení μ zůstal stejný. Je to způsobené tím, že se zvyšující se řeznou silou F_c roste i síla pasivní F_p , která je 2,5 krát větší než řezná síla F_c .

3.3.2 Měření drsnosti

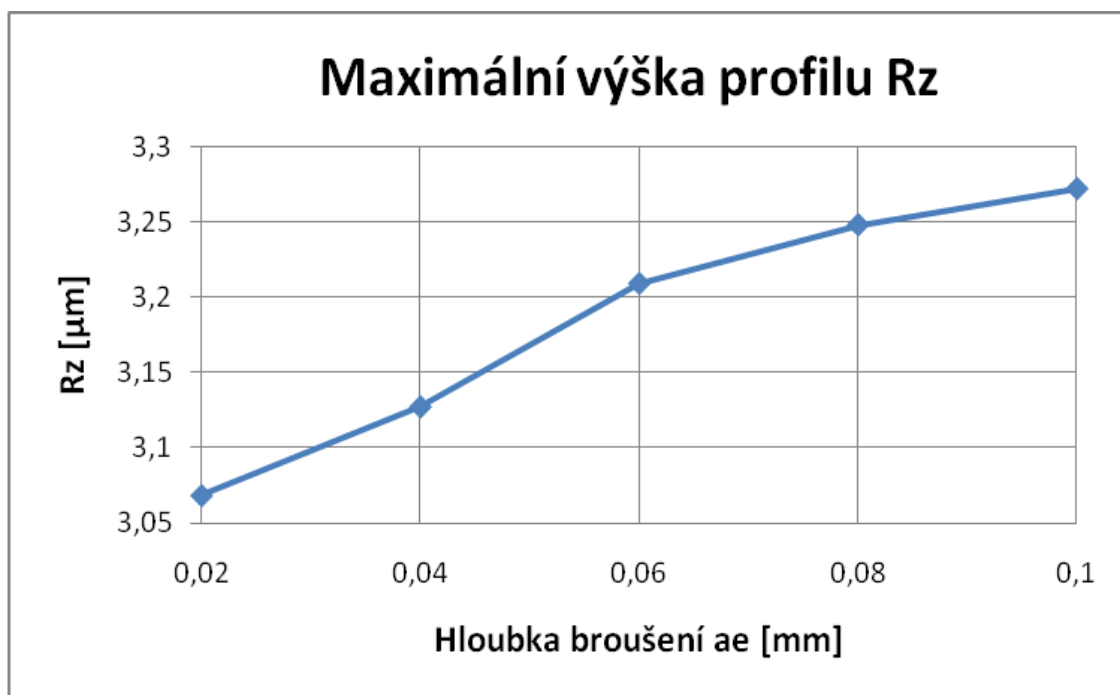
Z naměřených hodnot byly vypočítány průměrné hodnoty. Z hodnot se sestavila tabulka (Tab. 5.) a grafy (Graf 3.1; 3.2). Neměřené hodnoty a vytisknutá drsnost z přístroje Motutoyo Surfrest SJ – 301 (Příloha 2).

Tab. 5. Průměrné hodnoty drsnosti

Hloubka broušení a_e [mm]									
0,02		0,04		0,06		0,08		0,1	
Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
Průměrné hodnoty									
0,451	3,068	0,502	3,127	0,527	3,209	0,531	3,248	0,538	3,272



Graf. 1. Průměrné hodnoty Ra



Graf. 2. Průměrné hodnoty Rz

Z tabulek a grafů vyplývá, že s rostoucí hloubkou broušení, roste drsnost povrchu. Se zvyšující se hloubkou broušení a tím i námahou lze usoudit, že hloubka broušení má přímý vliv na drsnost povrchu. Čím větší hloubka broušení, tím větší drsnost a porušení povrchu ve formě malých prasklin.

3.3.3 Chování kotouče a pohledově ohodnocený povrch materiálu

Hodnocení zvuku broušícího kotouče od normálního broušení. Hodnocení materiálu, praskliny (Obr. 29.) a spáleniny (Tab. 6.).

Tab. 6. Sledované hodnoty

Hloubka broušení ae [mm]	Zvuk brusného kotouče	Obroušený povrch (praskliny; spáleniny)
0,02	bez změny	bez změny; bez změny
0,04	bez změny	bez změny; bez změny
0,06	zvyšující se zvuk	vznikají jemné praskliny; tmavší odstín než v předchozím
0,08	pískání	vznikají husté sítě prasklin; spálená obroušená plocha
0,1	pískání	velké viditelné praskliny; tmavší spálený odstín než v předchozím broušení

Dále bylo zjištěno při broušení hloubky 0,08 mm prokluzování klínového řemene. Aby se při broušení nerozlomil brusný kotouč nebo nezkazil stroj, bylo poslední broušení broušeno v hloubce 0,1 mm půlkou tloušťky brusného kotouče.



Obr. 29. Vzniklé sítě prasklin

ZÁVĚR

Předmětem bakalářské práce bylo posouzení kvalitativních parametrů broušení při různých hloubkách broušení. Navrhnutý postup byl experimentálně zkoušen broušicím kotoučem od firmy Norton 5SG46G12VXPC s keramickým zrnem při broušení uhlíkové oceli ČSN 14 220.4.

Z výsledku experimentálních měření lze vyvodit několik závěrů. V závislosti na hloubce broušení se kvantifikace procesu broušení měnila. Se zvyšující se hloubkou broušení a_e se zvyšovala řezná síla F_c , řezivost BK, řezný příkon P_c , množství tepla Q , teplo odváděné třískami Q_t , množství tepla přecházejícího do obrobku Q_o a drsnost povrchu. Např. při broušení hloubky 0,1 mm byla řezná síla o 62 % větší než při broušení hloubky 0,02 mm. To má nepříznivý vliv na broušící kotouč. Ten se více opotřebovává a snižuje se tak jeho životnost.

Dále se při měření ukázalo, že s rostoucí hloubkou broušení se zvětšuje drsnost povrchu. Čím větší hloubka broušení, tím větší drsnost a porušení povrchu ve formě malých prasklin. U hloubky broušení 0,1 mm ve srovnání s hloubkou broušení 0,02 mm bylo naměřeno o 16 % větší střední aritmetická hodnota R_a a o 6,2 % větší maximální výška profilu R_z .

Při broušení byl zjištěn spálený povrch od hloubky broušení 0,06 mm. Prokluzování klínového řemene a pískání brusného kotouče se projevilo u hloubky 0,08 mm.

V běžné praxi se volí nejpříznivější podmínky pro broušení, aby se zachovala jak trvanlivost broušícího kotouče, tak struktura broušené povrchové vrstvy. U velkých hloubek broušení dochází ke strukturním změnám povrchové vrstvy. Snižuje se únavová pevnost a podporuje poškození dynamicky namáhaných povrchů. Lze usoudit, že broušení nízkolegované oceli ČSN 14 220.4 keramickým zrnem je z pohledu trvanlivosti broušícího kotouče a obroušeného povrchu materiálu přijatelné do hloubky broušení 0,04 mm na jeden posuv stolu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOCMAN, Karel; PROKOP, Jarosla. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Vysoké učení technické v Brně : Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s.
2. MASLOV, J. N.: *Teorie broušení kovů*. Vyd. 1. Praha: SNTL 1979. 246 s. ISBN - .
3. KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. [s.l.] : Akademické nakladatelství CERM, 2011. 330 s.
4. *Tumlikovo.cz : Metal Cutting Technologies* [online]. 22.11.2010 [cit. 2011-05-24]. BRUSNÉ NÁSTROJE VŠEOBECNĚ. Dostupné z WWW: <<http://www.tumlikovo.cz/rubriky/optimalni-nastaveni/brusneho-kotouce/>>.
5. *Tumlikovo.cz : Metal Cutting Technologies* [online]. 24.3.2011 [cit. 2011-05-24]. Drsnost obrobeného povrchu. Dostupné z WWW: <<http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>>.
6. KOCMAN, Karel; ZEMČÍK, Oskar. *Web.tuke.sk : Analysis of Thermodynamic Effects when Grinding* [online]. 2008 [cit. 2011-05-24]. Analýza termodynamických jevů při broušení. Dostupné z WWW: <<http://web.tuke.sk/fvtpo/journal/pdf08/2-str-14-16.pdf>>.
7. ČSN ISO 3002-5. *Základné veličiny pri rezaní a brúsení Časť 5: Základná terminológia brúsnych operácií používajúcich brúsiace kotúče*. [s.l.] : [s.n.], 1994. 32 s.
8. *Ksp.tul.cz* [online]. 2008 [cit. 2011-05-24]. Povrchy povlaků - Mikrogeometrie. Dostupné z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/povrchy%20povlaku.pdf>.
9. HNILICA, Tomáš. *Cee-machines.com* [online]. 2011 [cit. 2011-05-25]. BPH 320 A. Dostupné z WWW: <<http://www.cee-machines.com/stroj/224/>>.
10. PEŠINA, Tomáš. *Brousito.cz : Brusivo Liberec* [online]. 2011 [cit. 2011-05-28]. Norton SG. Dostupné z WWW: <<http://www.brousito.cz/cz/katalog/keramicke-kotouce-a-brusna-teliska/norton-sg/42>>.

11. LEINVEBER, Jan; ŘASA, Jaroslav; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Praha : Scientia, spol s.r.o., pedagogické, 2000. 985 s.
12. *Mitutoyo.com* [online]. 2009 [cit. 2011-05-30]. Surf test SJ – 301. Dostupné z WWW: <http://www.mitutoyo.com/pdf/1964_SJ-201-301.pdf>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_D – jmenovitá plocha řezu	[mm ²]
a_e - radiální záběr (hloubka broušení)	[mm]
b_D – šířka broušení	[mm]
c – měrná tepelná kapacita broušeného kovu	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
C_m - konstanta charakterizující broušený obrobek	[-]
e_C - měrná energie broušení	[J.mm ⁻³]
f_a – axiální posuv (rychlost posuvu)	[mm.zdvih ⁻¹]
F_C - řezná síla	[N]
F_f - posuvová síla	[N]
F_p – pasivní síla	[N]
h_{eq} – ekvivalentní tloušťka třísky	[mm]
k_c – měrná řezná síla	[MPa]
m_t – hmotnost třísek	[kg.min ⁻¹]
n_s – frekvence otáčení brousícího kotouče	[ot.s ⁻¹]
P_c - řezný příkon	[kW]
Q - množství tepla vznikajícího při broušení	[J.s ⁻¹]
Q_o - množství tepla přecházející do obrobku	[J.s ⁻¹]
Q_t - teplo odváděné třískami	[J.min ⁻¹]
q_t – podíl tepla přecházejícího do třísek	[%]
Q_w - objemový výkon	[mm ³ .s ⁻¹]
q_w – množství tepla přecházejícího do obrobku	[%]
R_a - střední aritmetická hodnota drsnosti	[μm]
r_n – poloměr zaoblení ostří	[mm]
R_z - maximální výška profilu	[μm]

t_o – teplota okolí	[°C]
v_c – řezná rychlost na obvodu kotouče	[m.s ⁻¹]
v_{fa} – axiální rychlost posuvu stolu	[m.min ⁻¹]
v_{fr} – radiální rychlost posuvu	[m.min ⁻¹]
v_{ft} – tangenciální rychlost posuvu stolu	[m.min ⁻¹]
v_w – obvodová rychlost obrobku	[m.min ⁻¹]
α_n – normální úhel hřbetu	[rad]
λ - koeficient tepelné vodivosti broušeného materiálu	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
μ - součinitel broušení BK	[-]
ξ - součinitel řezivosti BK	[-]
γ_n – normální úhel čela	[rad]
ϕ_w - hustota tepelného toku	[J.s ⁻¹ .m ⁻²]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Zrna brousícího kotouče ²	12
Obr. 2. Model záběru brousícího zrna ¹	13
Obr. 3. Vybrané způsoby obvodového broušení ¹	16
Obr. 4. Vybrané způsoby čelního broušení ¹	17
Obr. 5. Schéma obvodového broušení s podélným (axiálním) posuvem ³	18
Obr. 6. Princip hloubkového broušení ³	18
Obr. 7. Princip zapichovacího broušení ³	18
Obr. 8. Princip bezhrotého průběžného broušení ³	19
Obr. 9. Bezhroté zápichové broušení tvarové rotační plochy ³	19
Obr. 10. Schéma vnitřního broušení s podélným posuvem a radiálním přísuvem ³	20
Obr. 11. Schéma vnitřního bezhrotého broušení ¹	20
Obr. 12. Schéma broušení v tuhých opěrkách ³	21
Obr. 13. Vnitřní planetové broušení ³	21
Obr. 14. Rovinné broušení obvodové ¹	22
Obr. 15. Rovinné broušení čelní ¹	22
Obr. 16. Přípravek pro tvarování brousícího kotouče pomocí šablony ³	23
Obr. 17. Rozložení řezných sil při obvodovém axiálním broušení do kulata ¹	24
Obr. 18. Schematické vyjádření střední aritmetické hodnoty drsnosti R_a^8	27
Obr. 19. Schematické vyjádření maximální výšky profilu Rz^8	27
Obr. 20. Axonometrické zobrazení a vrstevnicová mapa povrchu ⁸	28
Obr. 21. Schematické znázornění stavby brousícího kotouče – řezné části a spojovací části ³	28
Obr. 22. Základní způsoby opotřebení brousícího kotouče ²	34
Obr. 23. Rozměry materiálu	39
Obr. 24. Kotouče Norton ¹⁰ Obr. 25. Kotouč plochý ¹	40
Obr. 26. BPH 320 A	40
Obr. 27. Broušení zkoušeného materiálu	42
Obr. 28. Surfctest SJ – 301 ¹²	43
Obr. 29. Vzniklé sítě prasklin	47

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Specifikace brousicích materiálů Al_2O_3 a SiC podle ČSN 22 4501 a podle ČSN ISO 525 (22 4503) ¹	30
Tab. 2. Označování tvarů a rozměrů brousicích kotoučů – výběr ¹	31
Tab. 3. Vypočtené hodnoty 1	44
Tab. 4. Vypočtené hodnoty 2	44
Tab. 5. Průměrné hodnoty drsnosti	45
Tab. 6. Sledované hodnoty	46

SEZNAM GRAFŮ

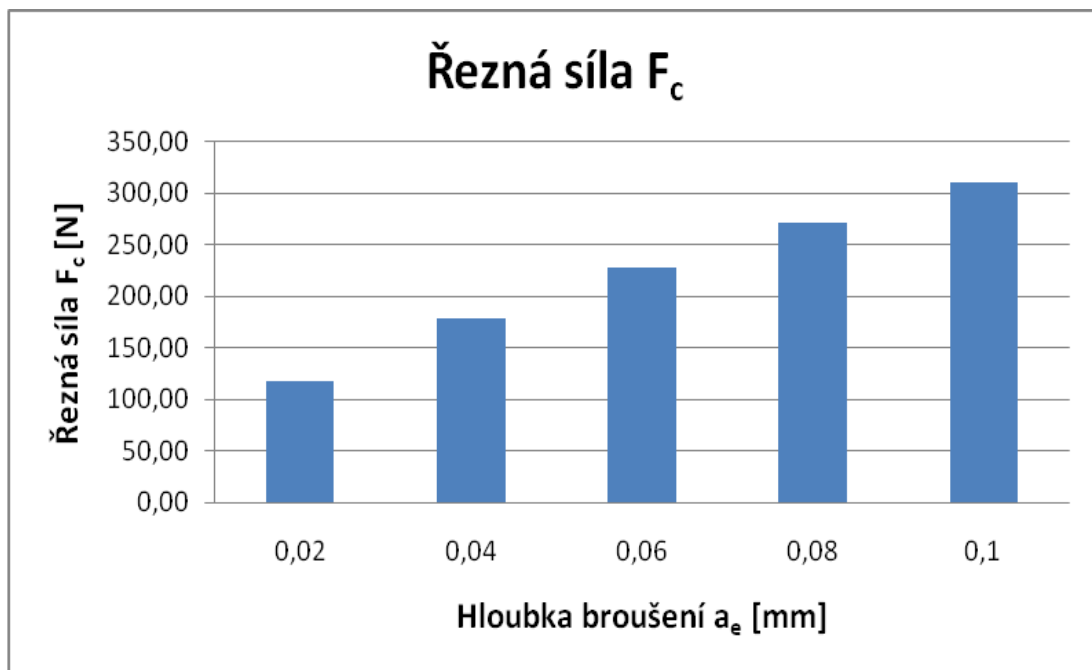
Graf. 1. Průměrné hodnoty Ra	45
Graf. 2. Průměrné hodnoty Rz	46

SEZNAM PŘÍLOH

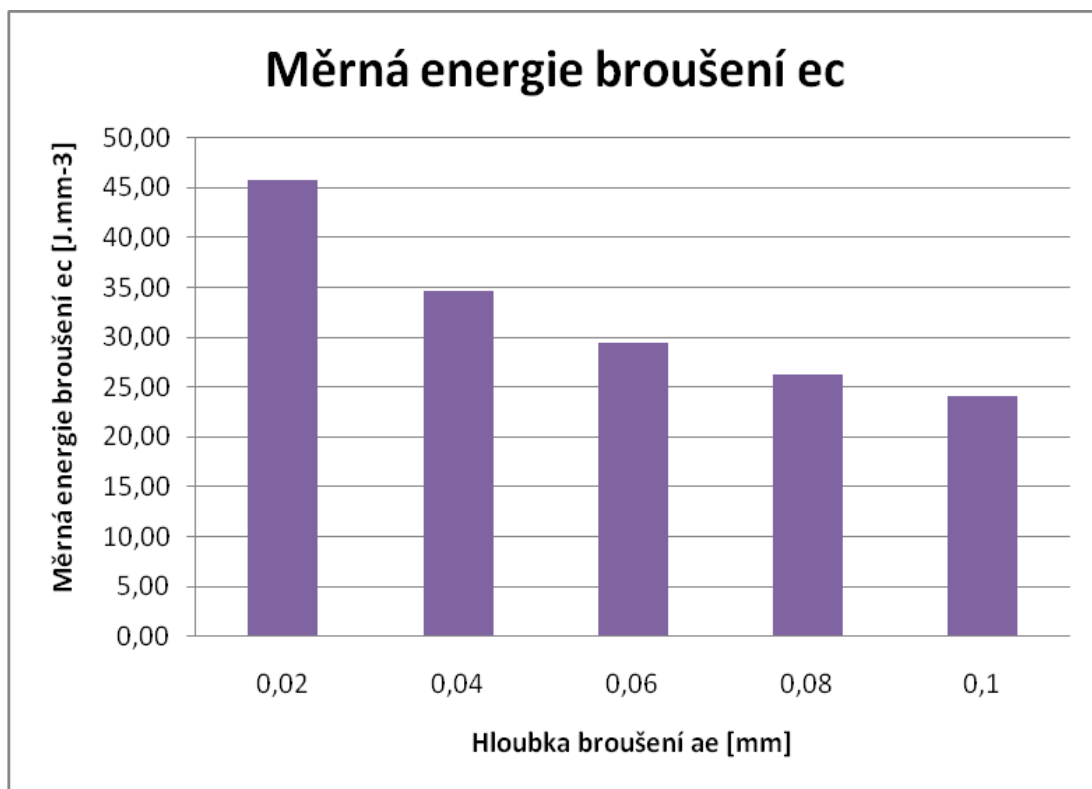
Příloha 1 Grafy ke kvantifikaci procesu broušení

Příloha 2 Naměřené drsnosti

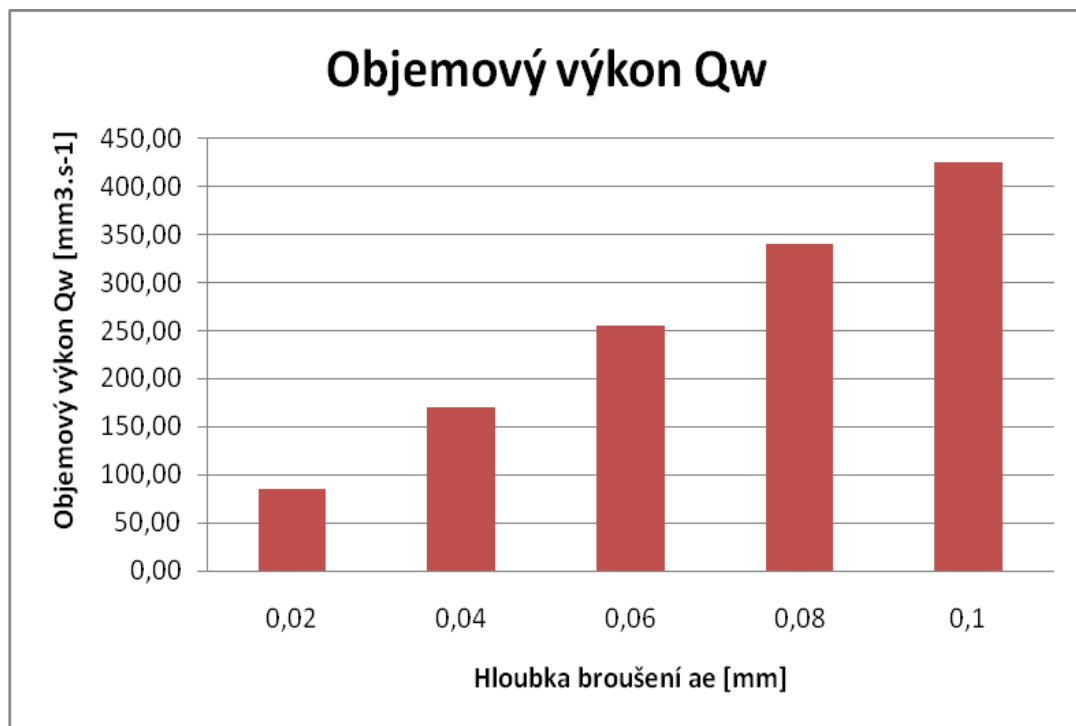
Grafy ke kvantifikaci procesu broušení



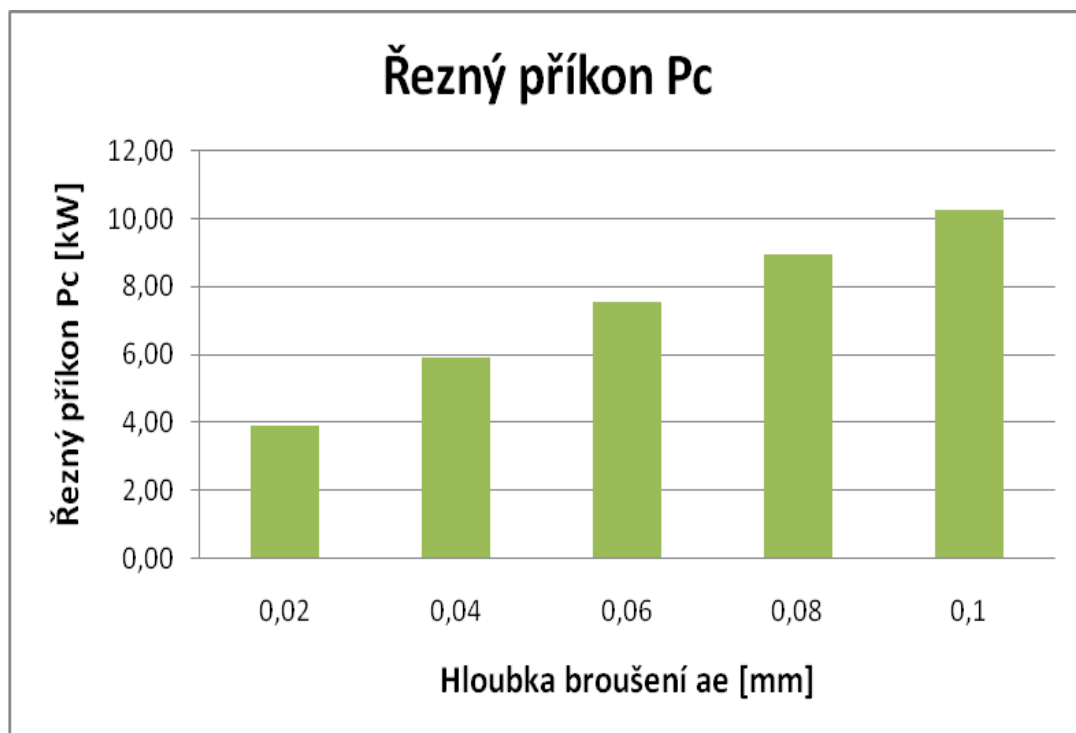
Závislost řezné síly na hloubce broušení



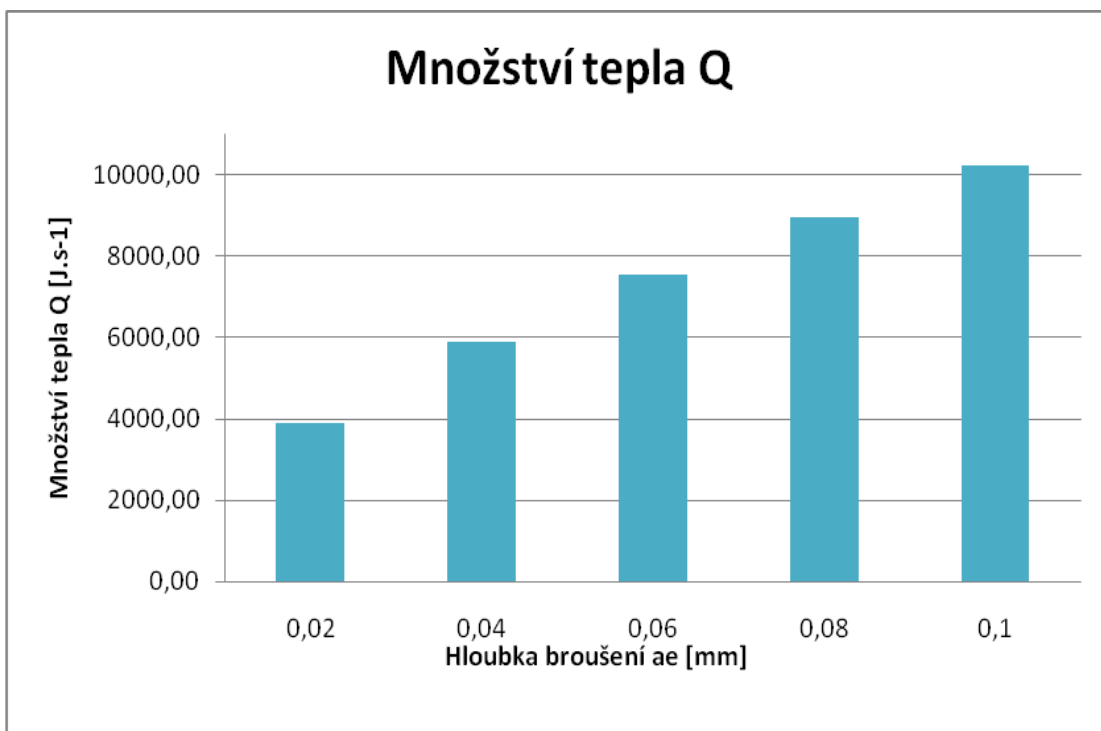
Závislost měrné energie broušení na hloubce broušení



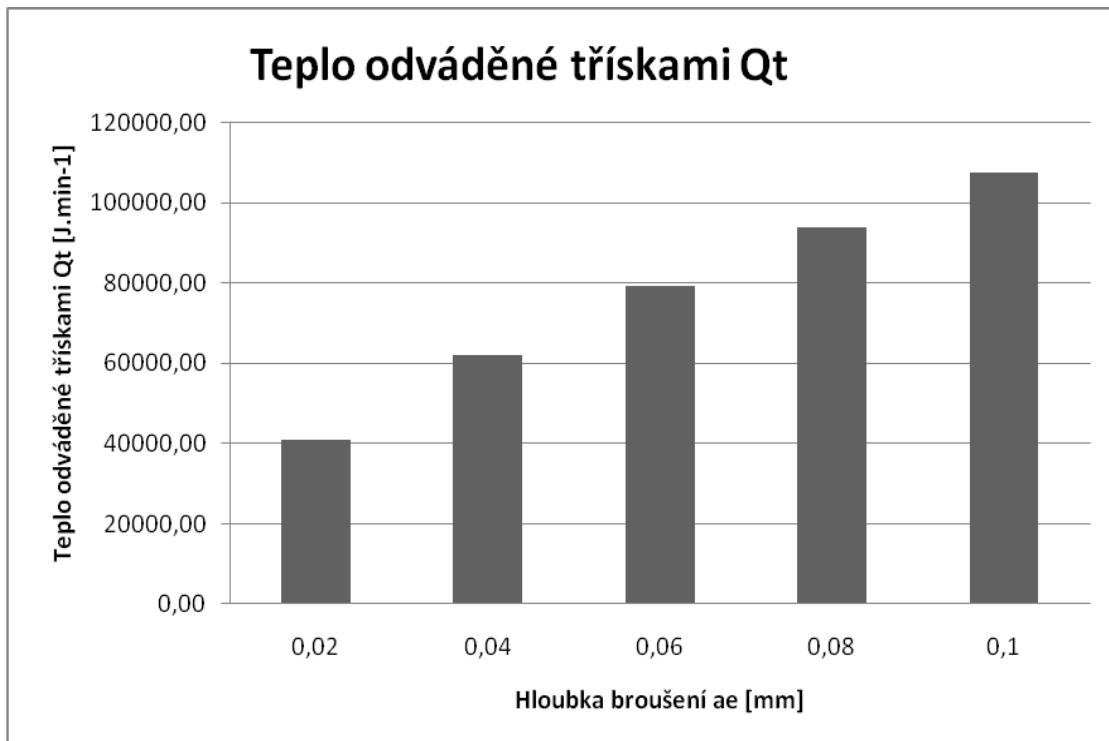
Závislost objemového výkonu na hloubce broušení



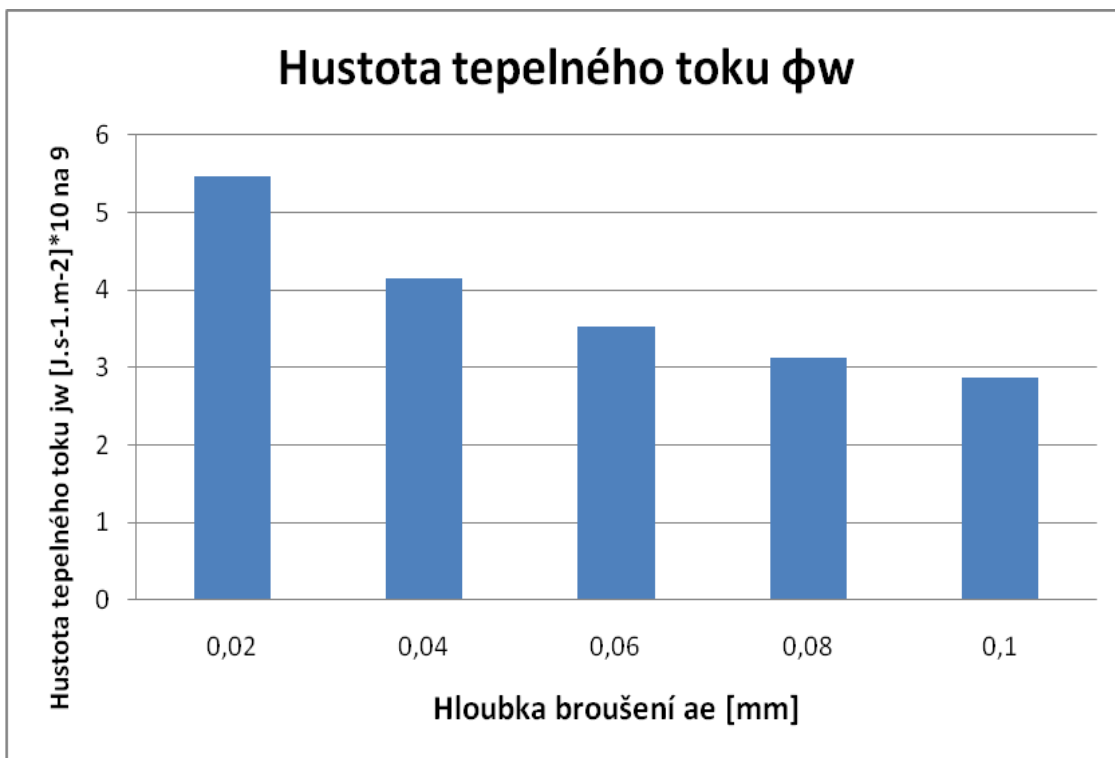
Závislost řezného příkonu na hloubce broušení



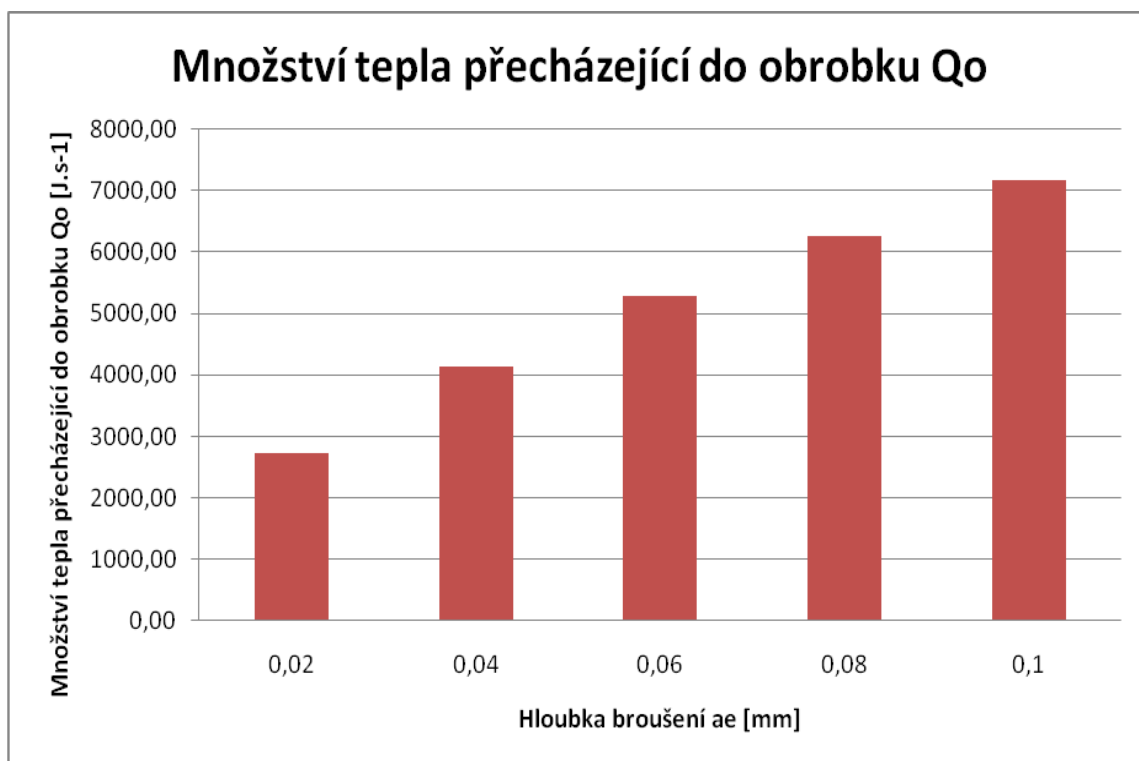
Závislost množství tepla na hloubce broušení



Závislost tepla odváděné třískami na hloubce broušení



Závislost hustoty tepelného toku na hloubce broušení



Závislost množství tepla přecházejícího do obrobku na hloubce broušení

Naměřené drsnosti

Hloubka broušení ae [mm]									
0,02		0,04		0,06		0,08		0,1	
Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
0,5	2,88	0,44	2,63	0,44	3,15	0,48	3,11	0,52	2,86
0,51	4,09	0,46	2,7	0,41	2,47	0,49	2,94	0,53	3,2
0,43	3,16	0,62	3,68	0,45	2,98	0,54	3,39	0,53	3,57
0,45	2,71	0,56	3,63	0,59	3,54	0,46	2,73	0,59	3,55
0,44	2,89	0,5	3,35	0,73	3,95	0,69	4,29	0,53	2,99
0,4	2,65	0,48	2,67	0,6	3,68	0,51	3,36	0,57	3,16
0,46	3,18	0,47	2,97	0,51	2,95	0,54	3,08	0,64	3,6
0,39	2,9	0,47	3,71	0,51	3,18	0,52	3,23	0,54	3,71
0,49	3,18	0,5	2,74	0,56	3,26	0,5	2,98	0,42	2,78
0,44	3,04	0,52	3,19	0,47	2,93	0,58	3,37	0,51	3,3
Průměrné hodnoty									
0,451	3,068	0,502	3,127	0,527	3,209	0,531	3,248	0,538	3,272
Směrodatná odchylka									
0,0381	0,3843	0,0508	0,4201	0,0909	0,4038	0,0622	0,4020	0,0542	0,3123
Maximální naměřená hodnota									
0,51	4,09	0,62	3,71	0,73	3,95	0,69	4,29	0,64	3,71
Minimální naměřená hodnota									
0,39	2,71	0,44	2,63	0,41	2,47	0,46	2,73	0,42	2,78

Mitutoyo Surfitest SJ-301

DATE 1999/01/01
TIME 02:33:35

R-PROFILE

λ_c 0.25mm
N 5

Ra 0.55 μm
Rz 3.19 μm
RSm (5%) 59 μm
Rmr (P. 50%) 37%

R-PROFILE

$\lambda_c = 0.25\text{mm} \times 5$

$\rightarrow \times 5K$
 \downarrow
 $\times 100$

Ver. 2.0 $\mu\text{m}/\text{cm}$
Hor. 100.0 $\mu\text{m}/\text{cm}$

