

Výzkum broušení dílů forem kotoučem z diamantu a kubického nitridu bóru

Bc. Jiří Čop

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří ČOP**

Osobní číslo: **T10368**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Výzkum broušení dílů forem kotoučem z diamantu
a kubického nitridu bóru**

Zásady pro vypracování:

- 1) Uveďte teorii a technologii broušení kovů a nekovů
- 2) Hodnoťte rozdělení a vhodnost použití nových brousících materiálů
- 3) Uveďte metody hodnocení jakosti povrchu
- 4) Určete vliv technologických podmínek na dynamické jevy, jakost obrobku a životnost nástrojů z diamantu a kubického nitridu bóru
- 5) Porovnejte ekonomickou výhodnost použití progresivních nástrojů

Rozsah diplomové práce:
Rozsah příloh:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:
Dle zadání vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: **13. února 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




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

Příjmení a jméno: ČOP JIRÍ

Obor: KTZ

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohou užit 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 14. 5. 2012

..... Jirí Čop

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

²⁾ Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a reportážní 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) *Dělační, diplomová, bakalářské a rigorózní práce odebrané uchozením k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlášení 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) *Přesí, že odevzdním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

²⁹ *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, § 25 odst. 1:*

(3) *Do práva autorského patří nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, uslyší-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).*

³⁰ *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 (§ 25 odst. 3). Oupřá-í autor takového díla udělit svolení bez věcného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat náhrady chybějícího projevu nebo vůle u soudu. Úrazovnění § 25 odst. 3 nástává nedotčena.*

(2) *Mení-li sjednána jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout (jinému těm), 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 výjímku jim 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 přihlíží k výši výjímku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá výzkumem broušení materiálů dílu forem brousicími kotouči z diamantu a kubického nitridu bóru.

Teoretická část obecně popisuje technologický proces broušení a nástroje či stroje používané k tomuto technologickému procesu. Dále je zde popsána problematika jakosti povrchu a materiály z nichž jsou formy vyráběny. Je zde také popsána výroba, vlastnosti a použití diamantu a kubického nitridu bóru.

Praktická část diplomové práce je věnována výzkumu vlivu technologických podmínek na velikosti řezných sil, kmitání a jakosti povrchu po broušení brousicími kotouči z diamantu a kubického nitridu bóru. Součástí praktické části je také návrh orovnávacího zařízení.

Klíčová slova: Broušení, diamant, kubický nitrid bóru, jakost povrchu, řezné síly, kmitání

ABSTRACT

This master thesis deals with the research of grinding materials part of molds with using grinding wheels from diamond and cubic boron nitride.

Theoretical part of this master thesis generally describes grinding as technological process and tools or machines which are used for grinding. In the next part of this master thesis is describes problem with quality of surface and materials which are used for production molds.

Practical part of this master thesis is devoted to research on the influence of technological conditions on the size of cutting forces, vibration and quality of surface after grinding with using grinding wheels from diamond and cubic boron nitride. In the practical part is also a proposal of grinding dresser.

Keywords: Grinding, diamond, cubic boron nitride, quality of surface, cutting forces, oscillation

Tímto bych chtěl poděkovat panu prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc. jakožto vedoucímu mé diplomové práce, za jeho obětavý přístup, odborné vedení, cenné připomínky či rady a v neposlední řadě za podklady a čas strávený nad touto prací.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jirímu Šálkovi a Ing. Luboši Rokytovi za jejich odbornou pomoc a čas strávený při měření praktické části diplomové práce na brusce.

Motto:

„Je zbytočné se ptát, má-li život smysl či ne. Má práve takový smysl, jaký mu dáme.“

Seneca

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

OBSAH

ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1 TEORIE BROUŠENÍ.....	13
1.1 VZNIK TRÍSKY	13
1.2 ŘEZNÉ SÍLY A VÝKON PŘI BROUŠENÍ.....	15
1.3 BROUSICÍ STROJE	17
1.3.1 Hrotové brusky	17
1.3.2 Bezhraté brusky	18
1.3.3 Rovinné brusky	19
1.3.4 Brusky na díry	20
1.3.5 Speciální brusky	21
1.4 DOPROVODNÉ JEVI PŘI BROUŠENÍ.....	21
1.4.1 Zpevnění povrchu.....	21
1.4.2 Zbytkové napětí.....	22
1.4.3 Opatření brousicího kotouče	23
1.4.4 Prostředí při broušení	25
2 BROUSICÍ NÁSTROJ.....	26
2.1 ZNAČENÍ BROUSICÍCH NÁSTROJŮ.....	26
2.2 ROZDĚLENÍ BROUSICÍCH MATERIÁLŮ	28
2.2.1 Přírodní brousicí materiály.....	29
2.2.2 Syntetické brousicí materiály	30
3 METODY HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU	32
3.1 CHARAKTER TEXTURY POVRCHU	33
3.1.1 Odchylka tvaru	34
3.1.2 Vlnitost povrchu.....	34
3.1.3 Drsnost povrchu	35
3.2 PARAMETRY TEXTURY POVRCHU	36
3.2.1 Amplitudové parametry	36
3.2.2 Plošné a objemové parametry	38
3.2.3 Hybridní parametry	39
3.2.4 Funkční parametry	40
3.3 MĚŘENÍ PARAMETRŮ TEXTURY POVRCHU	40
4 DIAMANT	42
4.1 ROZDĚLENÍ A VÝROBA	42
4.2 VLASTNOSTI.....	44
4.3 POUŽITÍ.....	45
5 KUBICKÝ NITRID BORU.....	46
5.1 VÝROBA.....	46
5.2 VLASTNOSTI.....	47
5.3 POUŽITÍ.....	48
6 MATERIÁLY VSTŘIKOVACÍCH FOREM.....	50

6.1	OCELI VHODNÝCH JAKOSTÍ	51
6.2	NEŽELEZNÉ SLITINY KOVŮ	53
6.2.1	Slitiny hliníků.....	53
6.2.2	Slitiny mědi	53
II	PRAKTICKÁ ČÁST	54
7	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	55
8	CHARAKTERISTIKA BROUSICÍCH KOTOUČŮ A BROUŠENÝCH MATERIÁLŮ	56
8.1	POUŽITÉ BROUSICÍ KOTOUČE.....	56
8.2	BROUŠENÉ MATERIÁLY	56
8.2.1	Ocel 19 436	57
8.2.2	Ocel 14 109	57
8.2.3	Dural.....	57
8.2.4	Epoxidová pryskyřice.....	58
9	VYHODNOCENÍ ŘEZNÝCH SIL.....	59
9.1	BRUSKA BRH 20.03 F.....	59
9.2	TENZOMETRICKÝ DYNAMOMETR.....	60
9.3	MATERIÁL: 19 436.4.....	62
9.3.1	Vyhodnocení řezné síly F_p při změně posuvové rychlosti	62
9.3.2	Vyhodnocení řezné síly F_p při změně hloubky úběru	63
9.3.3	Vyhodnocení řezné síly F_c při změně posuvové rychlosti.....	64
9.3.4	Vyhodnocení řezné síly F_c při změně hloubky úběru.....	65
9.4	MATERIÁL: 14 109.4	66
9.4.1	Vyhodnocení řezné síly F_p při změně posuvové rychlosti	66
9.4.2	Vyhodnocení řezné síly F_p při změně hloubky úběru	67
9.4.3	Vyhodnocení řezné síly F_c při změně posuvové rychlosti.....	68
9.4.4	Vyhodnocení řezné síly F_c při změně hloubky úběru.....	69
9.5	MATERIÁL: DURAL	70
9.5.1	Vyhodnocení řezné síly F_p při změně posuvové rychlosti	70
9.5.2	Vyhodnocení řezné síly F_p při změně hloubky úběru	71
9.5.3	Vyhodnocení řezné síly F_c při změně posuvové rychlosti.....	72
9.5.4	Vyhodnocení řezné síly F_c při změně hloubky úběru.....	73
9.6	MATERIÁL: EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE	74
9.6.1	Vyhodnocení řezné síly F_p při změně posuvové rychlosti	74
9.6.2	Vyhodnocení řezné síly F_p při změně hloubky úběru	75
9.6.3	Vyhodnocení řezné síly F_c při změně posuvové rychlosti.....	76
9.6.4	Vyhodnocení řezné síly F_c při změně hloubky úběru.....	77
10	VYHODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU	78
10.1	BROUSICÍ KOTOUČ A 99B 80 Is(K) 9 V.....	79
10.1.1	Drsnost R_a při změně posuvové rychlosti.....	79
10.1.2	Drsnost R_a při změně hloubky úběru.....	79
10.1.3	Materiálový podíl R_{mr} při změně posuvové rychlosti.....	80
10.2	BROUSICÍ KOTOUČ B107 K 100 B-II.....	81
10.2.1	Drsnost R_a při změně posuvové rychlosti.....	81
10.2.2	Drsnost R_a při změně hloubky úběru.....	81

10.2.3	Materiálový podíl Rmr při změně posuvové rychlosti.....	82
10.3	BROUSÍCÍ KOTOUČ D100 K100 B-VI	83
10.3.1	Drsnost Ra při změně posuvové rychlosti.....	83
10.3.2	Drsnost Ra při změně hloubky úběru.....	83
10.3.3	Materiálový podíl Rmr při změně posuvové rychlosti.....	84
10.4	POROVNÁNÍ DRSNOSTI RA MEZI JEDNOTLIVÝMI BROUSÍCÍMI KOTOUČI.....	85
10.4.1	Materiál 19 436.4	85
10.4.2	Materiál 14 109.4	86
11	VYHODNOCENÍ ZÁVISLOSTI DRSNOSTI NA KMITÁNÍ.....	88
11.1	MATERIÁL: 19 436.4	89
11.1.1	Vliv změn posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru.....	89
11.1.2	Vliv změn hloubky úběru při konstantní posuvové rychlosti	90
12	NÁVRH OROVNÁVACÍHO ZAŘÍZENÍ	91
12.1	OROVNÁNÍ BROUSÍCÍCH KOTOUČŮ	91
	ZÁVĚR	93
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	96
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	98
	SEZNAM OBRÁZKŮ	100
	SEZNAM TABULEK.....	102
	SEZNAM PŘÍLOH.....	103

ÚVOD

Při výrobě součástí se velice často objevují požadavky na dlouho pracovní dobu dílů, přístrojů či strojů. Právě broušení je velmi častou dokončovací operací při výrobě strojních součástí, která má základní vliv na užité vlastnosti a životnost dílu. Broušením lze dosáhnout úpravy povrchu ploch a tím i zbavení se nečistot, rzí, výstupků či nerovností. Především zbavení se nerovností a výstupků na dílech může broušenému dílu zaručit mnohem vyšší životnost.

Pro moderní opracování a úpravu kovových, plastových či dřevěných ploch je moderní brusivo a nářadí pro broušení či leštění naprostou nezbytností. Aby byl výsledek dokonalý, je potřeba používat správné brusivo a zvolit správnou metodu či techniku broušení. Nejdůležitějším faktorem při broušení je výběr adekvátního brusiva vzhledem k broušenému materiálu.

Výsledná jakost povrchu a jeho vlastnosti jsou ovšem při broušení závislé na více faktorech než jen pouze na výběru brusiva. Jakost povrchu může dále silně ovlivňovat volba kotouče, tuhost soustavy, správně zvolené řezné či chladicí kapaliny, vyvážení kotouče, vhodné řezné a technologické podmínky a spousta dalších faktorů. Volba materiálu zrn broušícího kotouče je silně závislá na materiálu obrobku a tedy i jeho mechanických vlastnostech. Z důvodu zachování samoostřící schopnosti broušícího kotouče se používají pro broušení tvrdších materiálů broušící kotouče s měkkými zrny a naopak. Těžkoobrobitelné, nástrojové či kalené oceli lze za určitých podmínek brousit i měkkými kotouči ovšem dochází k velkým opotřebením broušícího kotouče a ne všechny materiály lze měkkými kotouči brousit. Z tohoto důvodu se v poslední době rozvíjí trend využití moderních supertvrdých materiálů jako brusiva. Diamant, kubický nitrid bóru či sintrovaný korund dosahují jako brusiva, při správně zvolených technologických podmínkách, výborných kvalit jakostí povrchů, při velmi malém opotřebením kotouče. Životnost kotoučů tedy mnohonásobně roste oproti broušícím kotoučům s měkkými zrny. Ve správně zvolených technologických podmínkách může u těchto broušících kotoučů docházet i ke snížení řezných sil a tedy i tepla vzniklého při broušení, což je žádoucí zejména u ocelových materiálů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TEORIE BROUŠENÍ

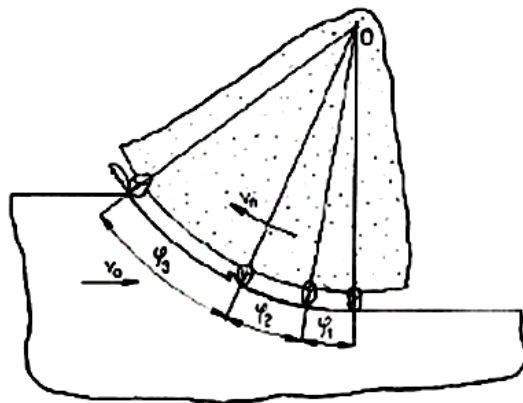
Broušení je dokončovací operace, kdy dochází k obrábění mnohabřitým nástrojem. Břity jsou tvořeny zrna tvrdých materiálů navzájem spojených vhodným pojivem. Hlavní pohyb při broušení vykonává rotující broušící kotouč, vedlejší pohyby vykonává nástroj nebo obrobek.

Broušení je významnou technologií, která drží krok s vývojem dalších metod obrábění. Pro broušení platí v principu stejné zákonitosti teorie obrábění jako pro klasické technologie, tvorba třísky je provázána plastickou deformací v primární i sekundární oblasti. Broušící zrna u klasických broušících kotoučů mají však nevhodnou geometrii z hlediska vzniku třísky vývinu tepla, zásahu deformací a tepla pod úroveň budoucího povrchu i z hlediska dalších aspektů. Geometrie břitu u broušení je výrazně odlišná od nástrojů s definovanou geometrii břitu. [2]

1.1 Vznik třísky

Broušení probíhá při záběru vysokého množství zrn s nepravidelnou geometrií a některými rozdíly geometrie v porovnání s jedno nebo několikabřitými nástroji. Dochází k neustálému opotřebením zrn, jejich odlamování, lomu a uvolňování z vazby broušícího. Při broušení probíhá elastická a následně plastická deformace malého množství materiálu při záběru jednotlivého zrna, po překročení pevnosti v rovinně smyku dochází k vytvoření třísky. Tento mechanismus charakterizuje tvorbu třísky v oblasti běžných rychlostí broušení. Při broušení vysokou rychlostí $v_c > 150$ m/s je předpoklad tvorby třísky bez znatelné plastické deformace při vyšších rychlostech nestačí materiál reagovat na záběr zrna a dochází k usmýknutí částic materiálu ve tvaru velmi drobných třísek, případně je předpokladem tečení materiálu. To dokumentují třísky kulovitěho charakteru, které jsou při těchto rychlostech pozorovány.

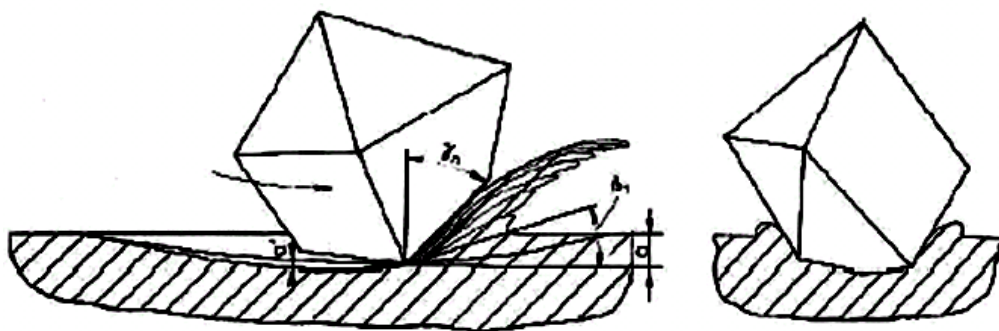
Každé zrno, které odřezává materiál při pohybu v kontaktní zóně, prochází třemi stádii: pružná deformace povrchu, plastická deformace povrchu a odebrání třísky. Spolehlivou informaci o procesu tvoření třísky při broušení lze získat zkoumáním právě těchto jednotlivých oblastí. To je možné pouze pomocí experimentálních metod. [9]



Obr. 1. Schéma fáze broušení.

φ_1 - fáze pružné deformace, φ_2 - fáze plastické deformace, φ_3 - fáze tvoření třísky

Při práci všeobecně orientovaným broušicím zrnem se tvoří plynulá tříska. Výrazná mez plastické deformace, ohraničené úhlem β , odděluje nedeformovaný kov od třísky, která se výrazně plasticky deformuje. Na intenzitě deformace se podílí geometrie zrna, jeho poloha a tření mezi řezným a obráběným materiálem. Průřez třísky se v průběhu záběru zrna mění v závislosti od okamžité hloubky odřezávané vrstvy α . Kromě tvoření třísky ve směru pohybu zrna se i plasticky vytlačí materiál v příčném směru. K tomu dochází za broušicím zrnem v závislosti na podmínkách broušení a proměnlivé hloubce. Strana třísky obrácená k broušicímu zrnem je lesklá, zadní strana má stopy po vystupujících vrypech. Obrobený povrch je pak tvořen soustavou drážek po broušicích zrnech a stopami po plastickém vytlačení materiálu z drážek. V důsledku velkých plastických deformací a vnějšího tření se určitá část třísky ohřeje natolik, že se roztaví a vytvoří kapku kovu nebo shoří (jiskření). [9]



Obr. 2. Model tvoření třísky při broušení

1.2 Řezné síly a výkon při broušení

Při broušení působí na brousící kotouč odstředivé a řezné síly. Protože řezné síly jsou vzhledem k odstředivým silám malé, při úvahách o pevnosti brousícího kotouče se zanedbávají.

Na obráběnou součástku působí výsledná síla F , která je součtem elementárních sil od jednotlivých zrn. Rozkládá se na tři složky:

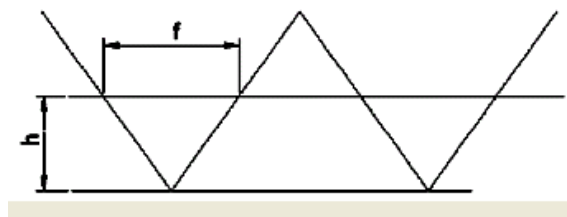
- 1) Tangenciální síla F_c
- 2) Radiální síla F_p
- 3) Axiální síla F_f

Tyto složky se používají na výpočet

- výkonu na vřetenu kotouče a obrobku (síla F_c)
- tuhosti soustavy stroj – obrobek – nástroj, přesnosti obrábění (síla F_p)
- výkonu na posuv (síla F_f)

Když mají brousící zrna záporné úhly čela, je možno předpokládat, že řezná síla F_p bude vždy větší, než síla F_c . Experimentální měření potvrzují, že radiální řezná síla F_p je 1,5 – 3x větší než řezná síla F_c . Síla F_f je o mnoho menší než síla F_c . Přitom řezná síla při broušení je součtová síla elementárních sil, kterými působí na materiál jednotlivá brousící zrna. Přitom jednotlivé zrna zasahují do rozdílné hloubky, proto jsou elementární síly značně rozdílné. Tříska a povrch obrobku vykazuje v procesu broušení vysoký stupeň plasticity. Je to důsledek vysoké řezné rychlosti (běžně 30-100 m.s⁻¹), záporných úhlů čela brousících zrn (až -80°) a teploty řezání převyšující 1000°C.

Plocha průřezu řezu má složitý tvar, na rozdíl od obrábění nástrojem s definovanou geometrií. Proto pro výpočet bereme podstatně zjednodušené schéma profilu brousícího kotouče podle *Obr. 3*.



Obr. 3. Zjednodušená plocha průřezu řezu při broušení

Řezné síly při broušení je možné poté určit analytickým výpočtem. Zde se vychází z určení skutečného průřezu odřezávaného kovu jedním brusným zrnem S_z , z počtu současně zabírajících zrn, ze zvolené hloubky řezu a_p , zrnitosti a struktury kotouče (1). Přitom:

$$S_z = h_z \cdot \frac{b}{2}, \quad (1)$$

kde: h_z – střední hodnota hloubky odřezávané vrstvy,

b – šířka řezné části zrna

Řezná síla na jedno zrno (2):

$$F_{lc} = k_b \cdot h_z \cdot \frac{b}{2}, \quad (2)$$

kde: k_b – měrná řezná síla při broušení

Velikost měrné řezné síly při broušení není konstantní, ale mění se s rychlostí brousícího kotouče a obrobku. Proto se v závislosti od těchto rychlostí mění i řezné síly F_c a F_f .

Řezná síla na obvodě brousícího kotouče F_c při počtu zrn v záběru bude (3):

$$F_c = F_{lc} \cdot z = k_b \cdot h_z \cdot \frac{b}{2} \cdot z, \quad (3)$$

Matematickým zpracováním experimentálních údajů byla pro rotační broušení stanovena závislost (4):

$$F_c = C_{fc} \cdot v_s^{0,7} \cdot f^{0,7} \cdot a_e^{0,6} \quad (4)$$

kde: C_{fc} – konstanta (při broušení kalené oceli je 22, nekalené oceli 21, litiny 20)

v_s – obvodová rychlost broušené součásti

f – podélný posuv na otáčku

a_p – hloubka řezu (příčný posuv na jeden dvojdvih)

Řeznou sílu je možno vyjádřit v závislosti od obvodové rychlosti brousícího kotouče v_k .

Pro obrábění oceli platí (5):

$$F_c = 25 \cdot \frac{v_s}{v_k} \cdot a_p^{0,53} \cdot f^{0,53} \quad (5)$$

Pro obrábění litiny (6):

$$F_c = 25 \cdot \frac{v_s}{v_k} \cdot a_p^{0,33} \cdot f^{0,33} \quad (6)$$

Výkon potřebný na otáčení (7):

$$P_s = \frac{F_c \cdot v_s}{60} \quad (7)$$

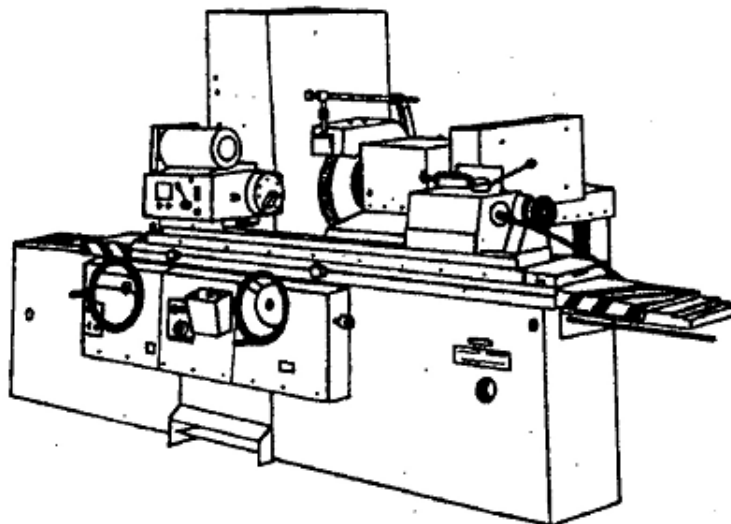
Naproti tomu, že řezné síly při broušení jsou malé, výkon v důsledku vysokých rychlostí broušícího kotouče je velký. Výkon potřebný na otáčení součástky je v porovnání s výkonem P_k velmi malý. [8]

1.3 Broušící stroje

Broušící stroje se vyrábí a dodávají v širokém sortimentu druhů a použití. Podle účelu a způsobu práce lze brusky rozdělit do skupin:

1.3.1 Hrotové brusky

Hrotové brusky se využívají k broušení rotačních ploch na obrobcích upnutých mezi hroty. Nejrozšířenějším provedením jsou univerzální hrotové brusky, používané pro broušení válcových, kuželových a čelních ploch a případně pro broušení děr.



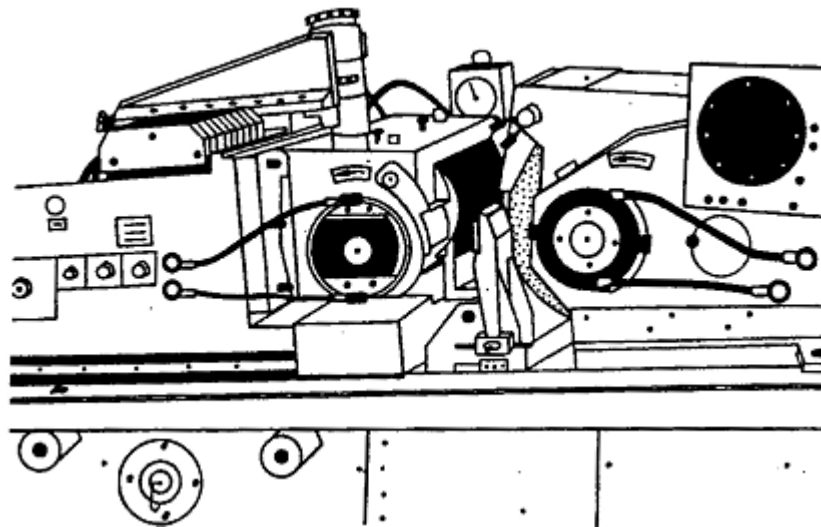
Obr. 4. Univerzální hrotová bruska

Na zadní části stojanu je otočně uložen broušící vřeteník, což umožňuje broušení strmých kuželů. Proti vřeteníku je na stojanu umístěno lože, po jehož vedení se v podélném směru

pohybuje stůl s pracovním vřeteníkem a koníkem. Horní část stolu je možno natáčet, což se využívá při broušení táhlých kuželů. Pomocí speciálního vřetena je možno brousit také díry v obrobcích upnutých ve sklíčidle. [4]

1.3.2 Bezhraté brusky

U bezhratých brusek odpadá upínání obrobku. Jsou konstruovány nejčastěji pro vnější, ale také v menším rozsahu pro vnitřní broušení rotačních ploch. Bezhraté brusky pro broušení vnějších ploch umožňuje zápichové a průběžné broušení.



Obr. 5. Bezhratá bruska pro vnější broušení

Mají dva vřeteníky – broušící vřeteník, na jehož vřetenu je broušící kotouč a vřeteník podávacího kotouče. Každý vřeteník má vlastní náhon, broušící vřeteno má konstantní otáčky, vřeteno podávacího kotouče má otáčky měnitelné. Podávací vřeteník lze přestavovat po vedení lože a nastavit tak požadovaný průměr broušení. Natáčením podávacího vřeteníku se nastavuje mimoběžnost os obou kotoučů pro vyvození axiálního pohybu obrobku při průběžném broušení. Bezhraté brusky se využívají obvykle v sériové výrobě, kde mohou pracovat v automatickém pracovním cyklu. [4]

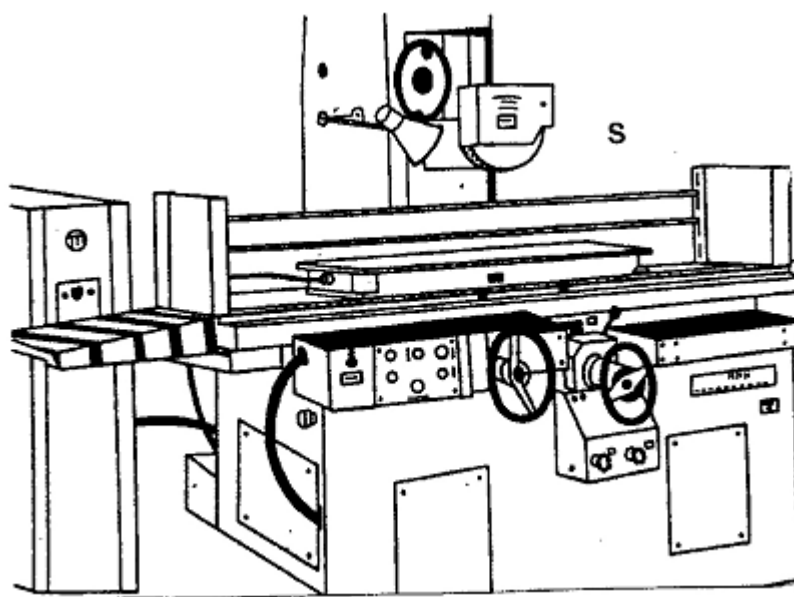
1.3.3 Rovinné brusky

Rozdělujeme je na:

1. Vodorovné rovinné brusky

Jsou určeny pro broušení rovinných ploch a jsou charakterizovány vodorovnou osou broušícího vřetena. Obrobky se nejčastěji upínají na elektromagnetickou desku umístěnou na pracovním stole. Pracovní stůl vykonává přímočarý vratný pohyb nebo otáčivý pohyb

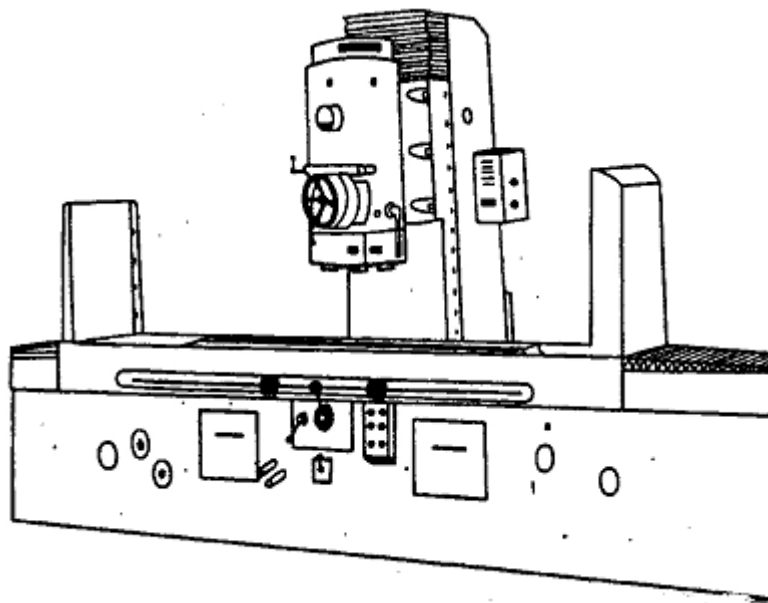
Nejrozšířenějším představitelem rovinných brusek jsou brusky s přímočarým vratným pohybem.



Obr. 6. Vodorovná rovinná bruska s přímočarým vratným pohybem stolu

2. Svislé rovinné brusky

Tyto brusky jsou charakterizovány svislou osou broušícího vřetena a vysokými výkony broušení, avšak horšími parametry přesnosti broušené plochy. Typickým představitelem těchto strojů je svislá vodorovná bruska s přímočarým vratným pohybem stolu.

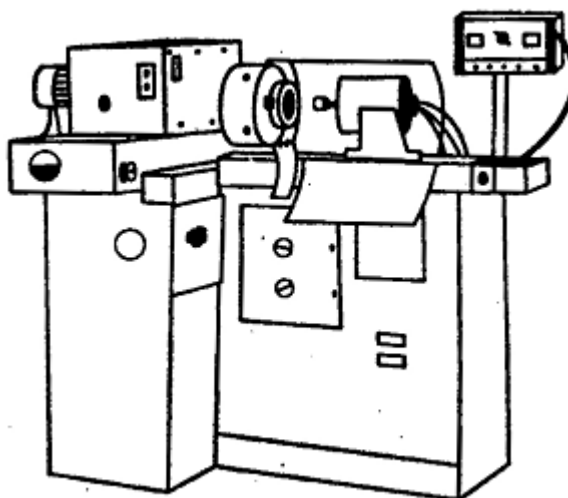


Obr. 7. Svislá rovinná bruska s přímočarým pohybem stolu

Brousicí vřeteník je posuvný stojan. Pracovní stůl uskutečňuje pouze přímočarý vratný pohyb, takže průměr brousicího kotouče musí být větší, než je šířka broušené plochy. Brousicí kotouč je zpravidla segmentový. Jakost obroušené plochy je horší než při broušení na vodorovných rovinných bruskách. Obrobky se obvykle upínají na magnetickou desku, umístěnou na pracovním stole. [4]

1.3.4 Brusky na díry

Brusky na díry jsou vyráběny a dodávány jako sklíčidlové, planetové a nezhotí. Významným představitelem těchto strojů je sklíčidlová bruska na díry.



Obr. 8. Sklíčidlová bruska na díry

Obrobek se upíná do sklíčidla pracovního vřeteníku uloženého na příčných saních, které umožňují nastavení obrobku proti brousicímu kotouči na požadovaný průměr. Brousicí vřeteno má vlastní elektromotor a vykonává axiální posuv obrobku vzhledem k brousicímu kotouči. Brousicí vřeteník je v tomto případě uložen na příčných saních a vykonává pohyb v radiálním směru. Zvláštní variantou konstrukce s vysokou automatizací pracovního cyklu představují brusky na díry kroužků valivých ložisek. [4]

1.3.5 Speciální brusky

Do této skupiny se zařazují brusky se speciálním technologickým zaměřením. Patří sem brusky na ostření nástrojů, brusky pro broušení závitů, brusky na broušení ozubení, brusky pro broušení klikových hřídelí, brusky na broušení vačkových hřídelů apod. [4]

1.4 Doprovodné jevy při broušení

1.4.1 Zpevnění povrchu

Stupeň zpevnění vrstvy kovu se hodnotí měřením mikrotvrdoti. Na broušeném povrchu mají největší tvrdost povrchové vrstvy. Směrem od povrchu tato tvrdost klesá, až se ustálí na hodnotě odpovídající hodnotě tvrdosti materiálu. Vzdálenosti od povrchu, v níž stále figuruje vyšší tvrdost, nazýváme hloubkou zpevnění. Z důvodu malé hloubky zpevnění, se mikrotvrdot ve většině případů nedá vyhodnotit v kolmém řezu. Efektivnější pro měření je tedy řez šikmý, který se vytváří elektrochemicky, aby nedocházelo k sekundárnímu ovlivnění povrchové vrstvy. Velikost úhlu je 1° - 2° což zaručuje velkou plochu, na níž lze mikrotvrdot měřit. Na analýzu povrchového zpevnění materiálu se nejvíce používají metody elektronové difrakce, rentgenová analýza či elektronová mikroskopie. Při broušení dochází v povrchové vrstvě také k fázovým přeměnám.

V povrchových vrstvách při broušení oceli se tvoří následující zóny.

- 1) První zóna – austeniticko – martenzitická, která se metalograficky jeví jako stejnorodá. Těžko leptatelná zóna. Její zvláštností je změna stupně tetragonálnosti martenzitu v porovnání se strukturou kalené oceli. Zóna se tvoří při nadkritických teplotách.

- 2) Druhá zóna – obsahuje popuštěný martenzit nebo ferit, austenit a malé množství sekundárního martenzitu. Z metalografického hlediska je tato zóna přechodná. Její zvláštností je zmenšení mřížky a zvětšení parametru austenitické fáze.
- 3) Třetí zóna – představuje ferit a karbidy. Je dobře lepitelná. Má zmenšené parametry mřížky ferit a blokovou strukturu fáze. Karbidická fáze je jemnozrná.
- 4) Čtvrtá zóna – tvoří strukturní přechod od popouštění k základnímu tepelnému zpracování. Obsahuje martenzit a do hloubky rozptýlený zbytkový austenit.

Vznik těchto zón závisí na řezných podmínkách. Při vysokých řezných parametrech se objevují čtyři zóny. Při obrábění nízkými rychlostmi a příčnými posuvy vzniká jen čtvrtá nebo třetí zóna. Intenzita a hloubka zpevnění povrchové vrstvy závisí na vlastnostech broušeného materiálu. [8]

1.4.2 Zbytkové napětí

Zbytkové napětí jsou jedním z projevů použitých technologií obrábění. Po výrobním procesu zůstávají v součástkách a konstrukcích a působí neustále i bez vnějšího zatížení. Svým působením mají významný vliv na funkčnost a životnost obrobenech povrchů.

Napětí, které se může vyskytovat v uzavřených systémech, můžeme rozdělit podle různých hledisek. Nejčastěji se do úvahy bere příčina, která napětí vyvolala. Dále doba, po kterou napětí působí nebo velikost objemu v které dosahuje rovnováhu. Napětí mohou být tahové (+) nebo tlakové (-).

Podle doby působení vnitřního napětí rozlišujeme napětí okamžité – časované, které vzniká po odstranění příčin, které je vyvolaly. Do této skupiny patří např. napětí způsobené rozdílem teplot v různých místech součásti a zanikající po vyrovnání teplot. Kromě okamžitých – časovaných napětí do této skupiny patří i napětí trvalé – zbytkové, které zůstává v soustavě i po odstranění příčin, které je způsobily. Podmínkou jejich vzniku je, že vložené nebo jinak vyvolané napětí přesáhne mez kluzu materiálu.

Podle objemu, v kterém napětí dosahuje rovnováhu, se zbytkové napětí rozděluje na:

- I. Druhu – Zasahují celý objem součástky, či její podstatnou část, tj. mají makroskopický charakter. K těmto napětím patří i napětí v nekonečně tenké, ale rozsáhlé oblasti. Porušení kompaktnosti součásti (např. jejím rozdělením) dojde ke změně její makrogeometrie.

- II. Druhu – Zasahují objem několika krystalových zrn. Porušením kompaktnosti (např. jejím rozdělením) součásti nemusí dojít ke změně makrogeometrie.
- III. Druhu – Projevují se v objemu několika atomových vzdáleností a dosahují rovnováhy jen v dostatečně velké části zrna. Porušením kompaktnosti (např. jejím rozdělením) nikdy nedojde ke změně její makrogeometrie.

Zbytkové napětí může vznikat pod obrobeným povrchem jen tehdy, když dojde v povrchové vrstvě k plastické deformaci. Smysl zbytkového napětí (tah/ tlak) závisí od toho, jak k deformaci došlo. Můžou působit následující faktory

- Nerovnoměrná plastická deformace vyvolaná silovým účinkem nástroje – způsobují vznik tlakových napětí
- Nerovnoměrné teplotní ovlivnění (ohřev nebo chladnutí) obrobku – způsobuje vznik tahových napětí
- Nerovnoměrná fázová transformace nebo vylučování nových strukturních složek – vznik tahových nebo tlakových napětí vzhledem na rozdíl objemu původní a nově vzniklé fáze
- Zbytkové napětí indukované předcházející operace v technologickém postupu (tepelné nebo mechanické zpracování výrobku) [7]

1.4.3 Opotřebení broušícího kotouče

Při broušení vzniká zvláštní mechanismus opotřebení. V zásadě je potřeba rozlišovat:

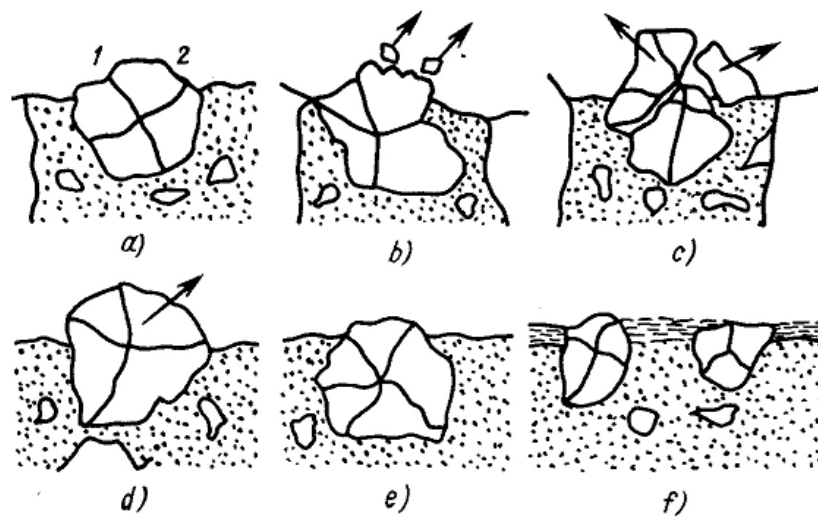
- Opotřebení broušícího kotouče
- Opotřebení brusného zrna

Opotřebení brusného kotouče je značně složitý chemicko – fyzikální proces, závislý od daných podmínek, jako je charakteristika broušícího kotouče, vlastnosti broušeného materiálu, řezné podmínky apod.

Základní druhy opotřebení, které mohou nastat v závislosti na podmínkách broušení:

- a) Otěr zrna – nastává vždy, když zrno začne vnikat do záběru a odebírat materiál. Postupně se vytvoří na hrotu otěrové plošky a zhorší se úběr materiálu. Tento způsob opotřebení brusných zrn je nejčastější a pro nástroje bez samoostření převládající.

- b) Povrchové štěpení brusných zrn – objevuje se tehdy, když měrné zatížení zrna překročí jeho pevnost a z části i vysvětluje princip samoostření. Předností tohoto druhu je rovnoměrné, úsporné opotřebení nástroje při rovnoměrných silách a trvalém volném řezání.
- c) Objemové rozrušování zrn – nastává při nadměrném zatížení nástroje nebo při defektech brusných zrn. Není už tak příznivé jako povrchové štěpení.
- d) Vylupování celých zrn – nejnevhodnější případ opotřebení, nastává obvykle při nevhodném zvolení nástroje, anebo nevhodných řezných parametrech.
- e) Porušení působením chemického vlivu – ve stykovém pásmu zrna a obráběného materiálu při vysokých teplotách, vznikajících v zóně řezání (difuzní a adhezní opotřebení)
- f) Zanášení – prostoru mezi zrny třísky a brusným odpadem



Obr. 9. Základní způsoby opotřebení kotouče

Všeobecně platí, že uvedené mechanismy opotřebení se ve skutečnosti kombiunují.

Proces opotřebení je tedy komplexní a složitý. [7]

1.4.4 Prostředí při broušení

Důležitým parametrem tvorby povrchu je prostředí vlastního procesu. Toto prostředí při broušení vytváří nejčastěji procesní kapaliny ve formě emulze, polysyntetických nebo syntetických kapalin.

Funkcí kapaliny je několik:

- Odvod tepla z místa plastické deformace a vzniku třísky
- Snížení množství vznikajícího tepla snížením tření mezi brousicím zrnem a povrchem broušené plochy
- Odvod třísky a zamezení ucpávání pórů brousicích kotoučů
- Podpora tvorby třísky
- Zamezení korozi

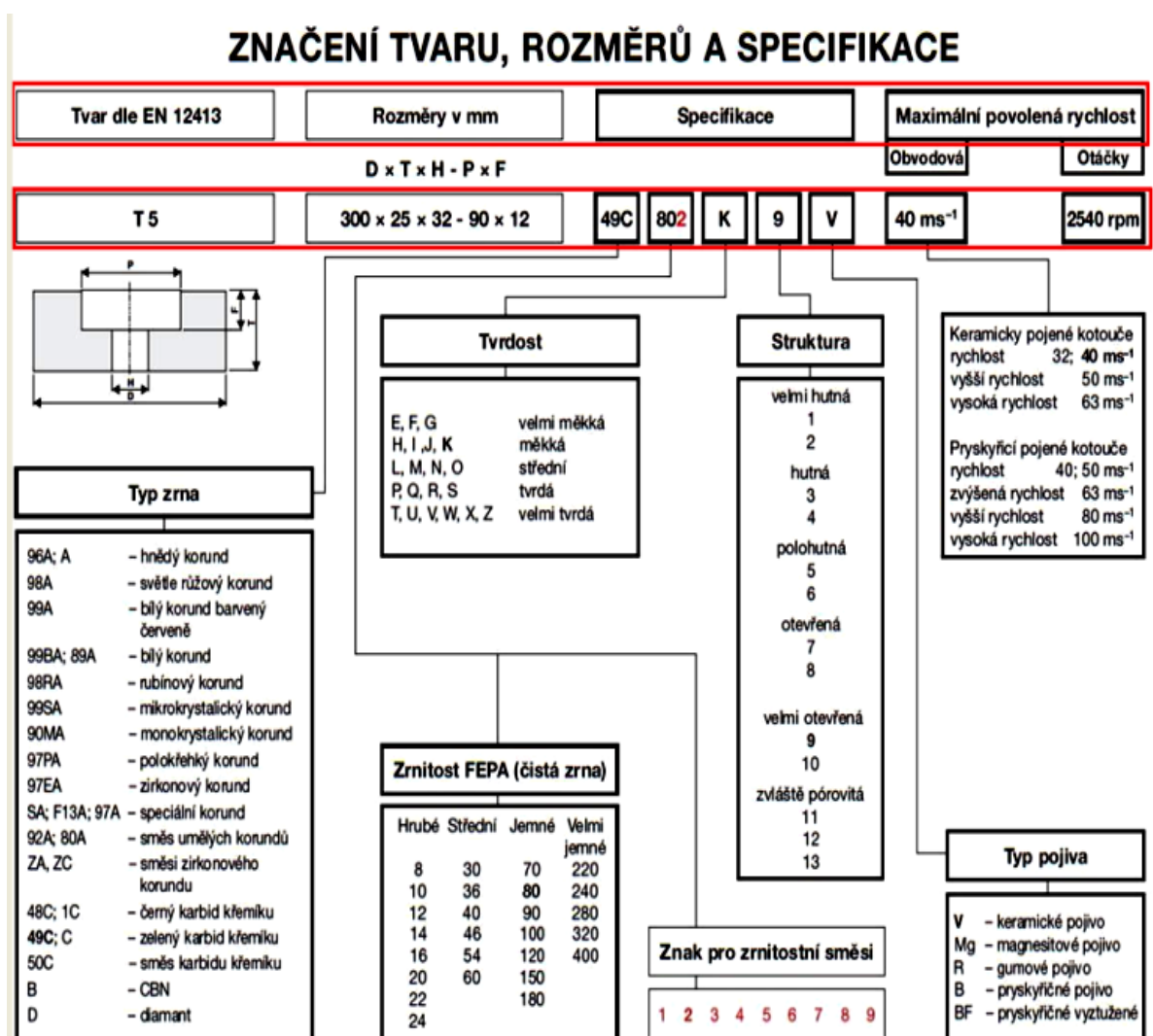
Při broušení vzniká tříska malého průřezu, nástroj má nízkou tepelnou vodivost a většina tepla tedy má snahu přecházet do obrobku. Procesní kapalinou snižujeme zejména tření mezi nástrojem a broušenou plochou a tím ovlivňujeme množství vznikajícího tepla. Ke snížení tření postačí menší množství procesní kapaliny, existuje hranice, kdy snížení množství kapaliny již výrazně ovlivňuje jakost povrchu. Tato hranice závisí pro dané řezné podmínky a danou kapalinu na materiálu obrobku, brousicím nástroji, zvláště na druhu zrna a použitém pojivu. Problematickým se redukce kapaliny jeví u bílého a růžového korundu, tedy u klasických druhů korundu, kde je zrno členitější, málo pravidelné a je nutno vysokým přidělem kapaliny tření výrazně snižovat.

Zajímavou oblastí je potom úplné odstranění procesní kapaliny při broušení. Je nutné ovšem sledovat vznik opalů a případně výskyt trhlin zapříčiněných nadměrným množstvím tepla, vznik vysokých tahových zbytkových napětí případně změny struktury. Řešením oblasti broušení bez chlazení je nízká hutnost kotouče – vysoká pórovitost, jenž snižuje tepelné zatížení povrchu a ostrost zrna snižuje množství tepla vznikajícího třením. [2]

2 BROUSICÍ NÁSTROJ

Podstata brousicích nástrojů je použití velkého množství řezných klínů ve formě drobných zrníček – brusných zrn. Ty se v rámci nástroje mohou vyskytovat jako volné brusné zrna a vlastním nástrojem budou přitlačované na broušenou plochu tak, aby mohly plnit svoji funkci (odebírání drobných částeczek z broušeného materiálu, či odebírání mikrotřísek) Častěji se však tyto brusné zrna v nástroji vyskytují jako vázané, vazbou spojené do tuhého tělesa. Takovéto brusné nástroje se skládají z brusiva, pojiva a vazby.

2.1 Značení brousicích nástrojů



Obr. 10 Značení tvaru, rozměrů a specifikace brousicích nástrojů

Označení brusného nástroje znamená uvést v následujícím pořadí:

- Tvar a rozměry broušícího nástroje
- Druh brusiva
- Zrnitost brusiva
- Tvrdost pojiva (vazby)
- Strukturu (pórovitost)
- Pojivo
- Maximální rychlosti broušícího kotouče
- Zvláštní úprava pojiva

Rozměry broušícího nástroje charakterizují jeho vnější tvar a případně i jeho upínací část (otvor).

Druh brusiva bývá označený dohodnutým písmenem, případně i procentuálním obsahem a dalšími vlastnostmi (legování aj.).

Zrnitost bývá udávaná číslem třídícího síta (počet oček třídícího síta připadající na délku anglického palce), avšak u velmi jemného brusiva bývá uvedený prostřední rozměr zrn (délka, šířka, výška) v mikrometrech. Takto jemné brusiva se třídí plavením a před jeho údaj se předepisuje písmeno M (např. M 22, M 15 atd.).

Tvrdost pojiva (vazby) bývá udávána písmenem latinské abecedy (písmena ze začátku abecedy pro měkkou vazbu, písmena z konce abecedy pro tvrdou vazbu. Pro diamantové nástroje a nástroje z kubického nitridu boru se uvádí římská čísllice (I – nejměkčí vazba, VIII – nejtvrďší vazba)

Struktura (pórovitost) se udává v 16 stupních označených 1 až 16 (1 – nejhustší vazba, 16 – nejpórovitější kotouč)

Koncentrace (u nástrojů ze syntetického diamantu a kubického nitridu boru) uvádí dohodnuté množství diamantového prášku (nebo KNB) v 1 mm^3 vrstvy. Za 100% koncentraci se podle dohody považuje $0,878 \text{ mg}$ v 1 mm^3 . [3]

Pojivo se označuje písmenem

V – keramické pojivo na bázi kaolinu a kazivce

S – silikátové pojivo na bázi křemičitého prachu a vodního skla

O – magnetizované pojivo na bázi magnezitu a chloridu vápenatého

B – umělá živice, fenolformaldehydová

E – šelak

R – guma na bázi přírodního nebo umělého kaučuku a síry

BZ – kovové na bázi bronzu

Další úpravy mohou být například sírování (označení S), impregnaci grafitem (G) apod.

2.2 Rozdělení brousicích materiálů

Materiál zrna ovlivňuje výrazně vlastnosti povrchu nejen svými geometrickými parametry, ale také fyzikálními a chemickými – tepelná vodivost, schopnost vazby k pojivu teplota difuze atd. Při komplexním výzkumu vlastností povrchu byla získána řada poznatků o vlivu zrna na průběh zbytkových napětí a průběh mikrotvrdosti v povrchové vrstvě. [2]

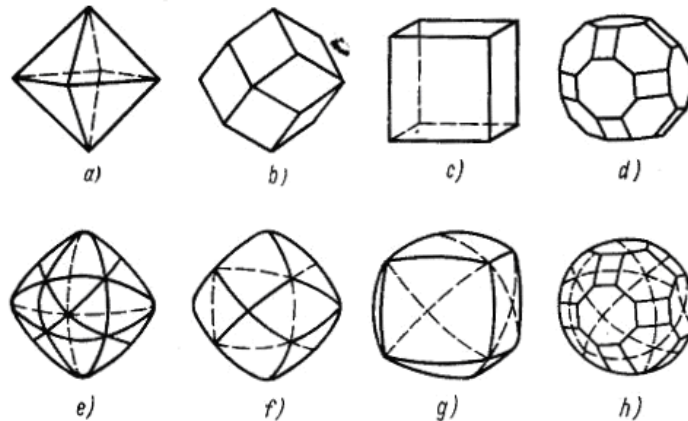
Materiály brousicích kotoučů lze obecně dělit na:

- 1) Přírodní – přírodní diamant, korund, křemík atd.
- 2) Syntetické (umělé) – umělý diamant, kubický nitrid boru, sintrovaný korund elektrokorund, karbid křemíku, karbid boru a jejich různé směsi

2.2.1 Přírodní brousící materiály

Přírodní diamant – označení A

Je modifikací uhlíku krystalické struktury, která obvykle obsahuje nevelké množství příměsí různých chemických prvků. Nejčastěji se vyskytují tyto krystalické tvary:



Obr. 11. Tvar krystalů přírodního diamantu

a – rovnoběžný osmistěn, b – kosočtvercový dvanáctistěn, c – krychlový, d – kombinovaný s rovinnými stěnami, e – křivostěnný osmistěn, f – křivostěnný dvanáctistěn, g – křivostěnný šestistěn, h – kombinovaná (z tvarů e, f, g)

Korund – označení E

Je minerál skládající se hlavně z krystalického oxidu hlinitého (až 80 až 90% Al_2O_3) s příměsí dalších minerálů. Je to velmi tvrdý, nepříliš křehký materiál. V přírodě se nachází mnoho druhů korundu. Přírodní korund krystalizuje v hexagonální krystalové soustavě ve tvaru protáhlých dipyramidálních hranolovitých, klencových a pinakonálních krystalů. Dipyramidální tvary jsou tvořeny stěnami ve tvaru pyramid s málo vyvinutými stěnami základního klence.

Smírek – označení N

Minerál na bázi krystalického oxidu hlinitého, obsahující ne více než 60% Al_2O_3 . Různé vedlejší příměsí snižují v porovnání s korundem jeho brusné vlastnosti.

Křemen – označení Kr

Minerál, který obsahuje hlavně oxid křemičitý (až 97% SiO_2) a příměsí dalších minerálů

2.2.2 Syntetické brousící materiály

Umělý diamant – označení AS

Získává se pomocí katalyzátoru z materiálu obsahující uhlík. Jako výchozí materiál se používá 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, která je typická pro diamant. Přitom se mění podstatně vlastnosti materiálu a z měkkého grafitu vzniká velmi tvrdý materiál – diamant. Podle norem se z umělého prášku vyrábí pět druhů brousících prášků (ASO, ASR, ASP, ASK, ASS), které se od sebe liší hlavně mechanickými vlastnostmi (pevností, křehkostí), tvarem a drsností povrchu. Zrnitost diamantových brousících prášků se mění od 400/250 do 50/40.

Kubický nitrid boru - označení KNB

Velmi tvrdý materiál, jehož syntéza se poprvé uskutečnila v roce 1957. Obsahuje 43,6% boru a 56,4% dusíku. Krystalografická mřížka se podobá mřížce diamantu, což znamená, že má stejnou stavbu, ale obsahuje atomy boru a dusíku. Rozměry krystalické mřížky jsou poněkud větší než u diamantu. Tím se spolu s nižší valencí atomů, tvořících mřížku KNB vysvětluje jeho poněkud menší tvrdost v porovnání s diamantem. [6]

Sintrovaný korund

Jedná se o uměle vytvořený typ korundu, kde výchozí surovina je aluminiummonohydrát, který se po sloučení s Al-disperzí drtí na požadovanou velikost zrn a v následných procesech získává konečnou pevnost a podpovrchovou tvrdost. Mezi jednoznačnou výhodou brusiva patří vyšší řezivost a tím i menší četnost orovnávání a vyšší životnost. Je určen pro broušení velmi tvrdých a houževnatých materiálů (tvrdosti nad 48 HRC, materiály HSS apod.) V určitých případech broušení dokáže brusivo plně nahradit KNB v keramických vazbách. [5]

Elektrokorund

Krystalický oxid hlinitý (Al_2O_3), který se získává vytavením látek bohatých tímto oxidem (bauxity, čistý oxid hlinitý) v elektrických pecích. Podle obsahu oxidu hlinitého má elektrokorund různou barvu, strukturu a vlastnosti. Rozlišujeme elektrokorund trojího druhu: normální, bílý a monokorund.

Elektrolkorund normální - označení E – skládá se z korundu s nepatrnou příměsí strusky (hexohlinitanu vápníku, anortitu, skla, minerálního titanu) a feroslitiny. Vyráběný elektrokorund se dělí na tyto skupiny E95, E93, E92, E91. Je vhodným brusivem na broušení materiálu s velkou pevností v tahu (ocel, temperovaná litina, bronz apod.).

Elektrokorund bílý - označení EB – má v porovnání s normálním elektrokorundem vyšší homogenitu chemického složení a fyzikálních vlastností. Vyrábí se ve třech skupinách EB99, EB98, EB97. Zrna bílého korundu jsou mnohostěny nepravidelného tvaru, které se od sebe liší velikostí. Nejčastěji se vyskytují jeho zrna ve tvaru připomínajícím osmistěn. Nové druhy elektrokorundu (chromový, zirkonový atd.) obsahují více monokrystalů, jejichž zrna jsou více izometrická a mají velmi dobrou brusivost.

Monokorund - označení M - obsahuje vysoké procento (99%) krystalického oxidu hlinitého. Získává se tavením bauxitu sirníku železa a redukčního činidla v elektrických pecích. Při tavení vznikne blok, který je tvořen zrny korundu spojenými sulfidy hliníku, vápníku a částečného titanu. Blok se dále zpracovává vodou, kdy se zrna monokorundu oddělují od sulfidů, obohacují se a třídí podle velikostí. Monokorund vyniká dobrými řeznými vlastnostmi a používá se při broušení legovaných kalených ocelí s malou tepelnou vodivostí a to při hrubování i broušení na čisto.

Karbid křemíku

Je sloučenina křemíku s uhlíkem (SiC), která se vyrábí v elektrických pecích za teploty 2100 až 2200 °C. Výchozí surovinou je křemenný písek a látky obsahující uhlík – koks a antracit. Výrobní proces spočívá v křečkování uhlíkových částic párami kyseliny křemičité. Technický karbid křemíku bývá dvojího druhu:

Zelený karbid křemíku – označení KZ - s obsahem alespoň 97% SiC je tvrdší, ale méně houževnatý. Používá se hlavně k ostření nástrojů ze slinutých karbidů.

Černý karbid křemíku – označení KČ - mívá černou nebo tmavě modrou barvu a kovový lesk. Obsahuje nejméně 95% SiC. Používá se ho často na broušení kovů s malou pevností v tahu, jako je např. šedá a bílá litina, měď, mosaz, hliník, křehké druhy bronzu atd.

Karbid bóru – označení KB

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 malým obsahem popela ropného koksu. [6]

3 METODY HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU

Jakost strojních součástí má stále větší význam pro dosažení správných výsledků, především s rozvojem vědy a techniky. Vyšší požadavky na snížení hmotnosti dynamicky namáhaných součástí při normálních či extrémních podmínkách zatěžování, vedly k důležitosti tohoto oboru.

Pod pojmem jakost z hlediska technologie výroby je třeba chápat přesnost:

- Rozměrů
- Geometrického tvaru
- Polohy
- Drsnosti povrchu

Mimo tyto parametry je dále nutné sledovat chemické i fyzikální změny materiálu v povrchové vrstvě obráběné součásti, které mohou vznikat v důsledku procesu obrábění. Jakost povrchu, tj. drsnost, resp. mikrogeometrie povrchu a vlastnosti povrchové vrstvy výrazně ovlivňují životnost a spolehlivost provozu součásti.

Na jakosti povrchu závisí:

- přesnost chodu strojních součástí
- jejich hlučnost
- doba záběhu, ztráty třením, elektrická vodivost, přestup tepla, únavová pevnost, odolnost proti opotřebení, odolnosti proti korozi apod. Drsnost povrchu tedy ovlivňuje průběhy chemických a fyzikálních jevů. Které provázejí činnost funkčního povrchu dané součásti.

Vztah mezi funkcí a jakostí povrchu ploch, která je vytvořena jistou technologickou metodou, je možné hodnotit ze dvou hledisek a to z hlediska:

- **Prostorového uspořádání (textury) povrchu** – je vyjadřováno především jeho drsností
- **Fyzikálních a chemických vlastností povrchové vrstvy součásti**

Během výrobního procesu mohou vzniknout následující změny na opracované ploše:

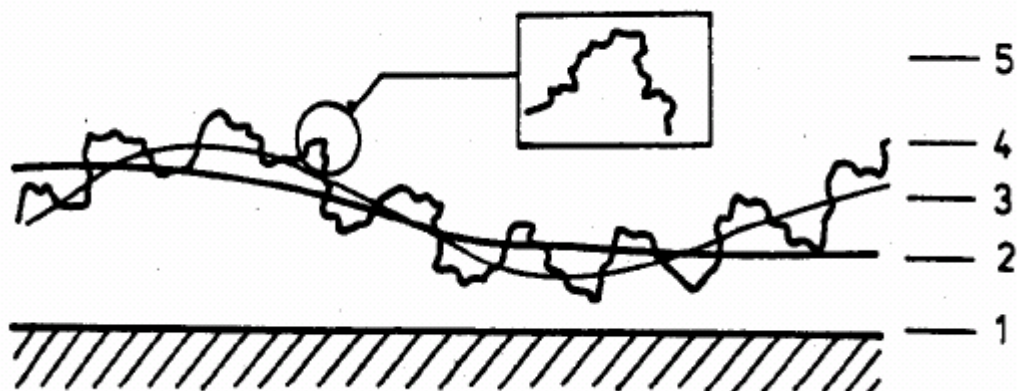
- Povrch je plasticky deformován v důsledku mechanického a tepelného účinku
- Dochází k rekrytalizaci
- Mění se tvrdost povrchové vrstvy
- Vznikají mikro a makrotrhliny
- Vznikají zbytková napětí v povrchové vrstvě apod. [1]

3.1 Charakter textury povrchu

Funkční vlastnosti povrchu součástí a částí strojů ve velké míře závisí na charakteru povrchu. Optimální volba a dodržení požadavků na charakter povrchu při vyhotovení výrobků ovlivňuje provozní vlastnosti povrchu, spolehlivost a životnost konstrukcí a mechanismů. Hodnocení charakteru povrchu vychází z profilové metody, tj. hodnocení povrchu z profilu povrchu čáry. [7]

V souladu s novým pojetím geometrické specifikace výrobků (GPS – Geometrical Product Specification) se v současné době nerovnost povrchu člení podle velikosti rozteče příslušných nerovností na ty složky:

- Drsnost povrchu – složka s nejmenší roztečí nerovností
- Vlnitost povrchu
- Tvar povrchu – složka s největší roztečí nerovností určenou základním profilem



Obr. 12. Charakter textury povrchu

1 – ideální rovný povrch, 2 – odchyly tvaru a polohy, 3 – vlnitost povrchu,

4 – mikroskopické drsnosti, 5 – submikroskopické nerovnosti

3.1.1 Odchylka tvaru

Geometrická struktura povrchu je soustavou geometrických prvků povrchu, podmíněná tvarem, rozměrem a rozmístěním převýšenin a prohlubní, které pocházejí z mechanického obrábění, anebo jsou zapříčiněné opotřebováním. Odchylkou tvaru je myšleno posouzení odchylky jednoho tvarového prvku od ideálního geometrického tvaru. [7]

Mezi hlavní zdroje odchylek tvaru patří:

1) Obráběcí stroj

- Nepřesnost chodu
- Vibrace a pružné deformace stroje

2) Nástroj

- Opotřebenění
- Geometrie (poloměr hrotu)
- Posuv

3) Prostředí

- Chvění, přenášené ze strojů stojících anebo pohybujících se v blízkosti výrobního zařízení
- Změna okolní teploty

4) Obrobek (ovlivňuje pouze částečně)

- Uvolnění zbytkových napětí
- Nehomogenita materiálu
- Tepelné ovlivnění

3.1.2 Vlnitost povrchu

Velký význam má také kromě drsnosti broušeného povrchu i jeho vlnitost, což je souhrn periodických a neperiodických výstupků a prohloubenin. Tvoření vln při broušení na čisto je nejvíce ovlivněno pracovními pohyby obrobku, brousicího vřeteníku kotouče a jeho tvarovou úchylkou (neokrouhlostí, ovalitou). Značný vliv má i poměr obvodových rychlostí kotouče a obrobku, jejich velikosti, počet záběrů kotouče a fázový posun vln při dalších průchodech kotouče. Zvětší-li se v jistém intervalu obvodová rychlost brousicího kotouče, zintenzivní se chvění technologické soustavy, čímž se omezuje možnost snižovat velikost vlnitosti. [6]

3.1.3 Drsnost povrchu

Nerovnosti na povrchu, které vznikají po libovolné technologické operaci, představují prostorový útvar, který lze velmi obtížně posuzovat. Problém hodnocení nerovnosti povrchu (drsnosti) je obvykle řešen redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu. V rovině řezu je získán profil, který je základním zdrojem informací pro posuzování textury povrchu.

Norma ČSN EN ISO 4287 definuje následující geometrické parametry:

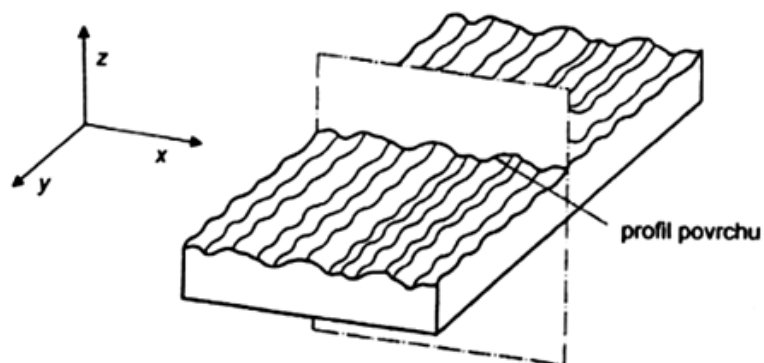
R – parametr vypočítaný z profilu drsnosti

W – parametr vypočítaný z profilu nerovnosti

P – parametr vypočítaný ze základního profilu

Uvedená norma definuje mimo jiné následující základní pojmy:

Profil povrchu je průsečnice skutečného povrchu a dané roviny.



Obr. 13. Profil povrchu

Snímaný profil je geometrické místo středů snímacího hrotu stanovených parametrů

Profil drsnosti je profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek, je základem pro hodnocení parametrů profilu drsnosti.

Filtr profilu je filtr rozdělující složky profilu na dlouhovlnné a krátkovlnné.

Fázově korigovaný filtr je filtr, který nezpůsobuje fázový posuv vedoucí k asymetrickému zkreslení profilu.

Střední čára základního profilu je čára nejmenších čtverců pořadnic odpovídající jmenovitému tvaru základního profilu (od této čáry jsou podle ČSN EN ISO 4287 odměřovány pořadnice profilu).

Základní délka drsnosti (l_r) je délka ve směru osy x použitý pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil drsnosti. Číselně je rovna charakteristické vlnové délce profilového filtru drsnosti.

Vyhodnocovaná délka (l_n) je délka ve směru osy x použitá pro hodnocení posuzovaného profilu. Vyhodnocovaná délka může obsahovat jednu nebo několik základních délek. [1]

3.2 Parametry textury povrchu

Parametry textury povrchu se dělí na:

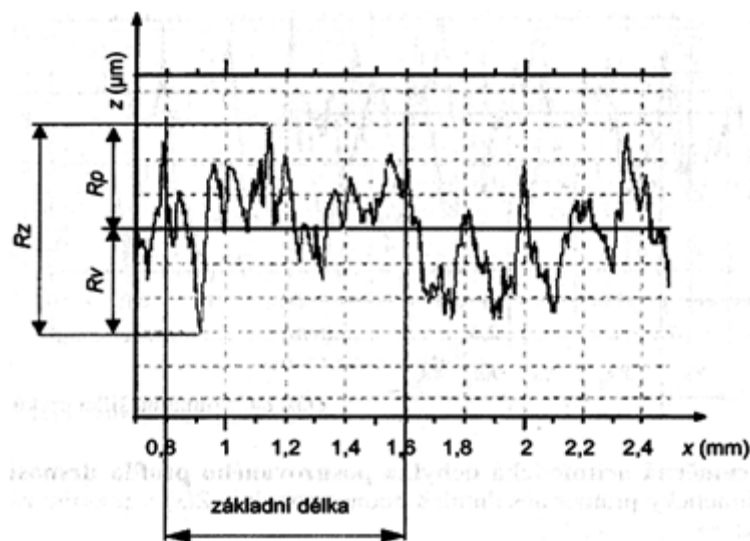
- 1) Amplitudové parametry
- 2) Plošné a objemové parametry
- 3) Hybridní parametry
- 4) Funkční parametry

3.2.1 Amplitudové parametry

Největší výška výstupků profilu drsnosti (R_p) je výška (Z_p) nejvyššího výstupku profilu drsnosti v rozsahu základní délky ve směru osy z.

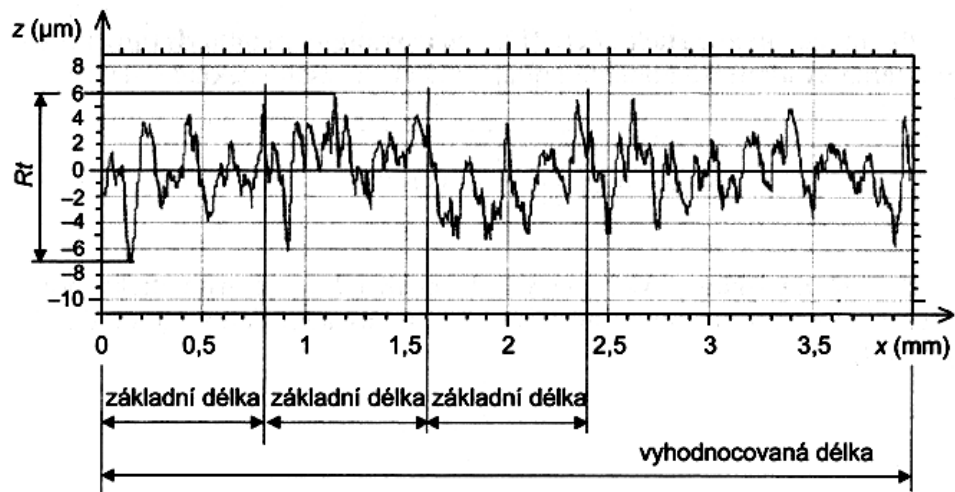
Největší hloubka prohlubně profilu drsnosti (R_v) je hloubka (Z_v) nejnižší prohlubně profilu drsnosti v rozsahu základní délky.

Největší výška profilu drsnosti (R_z) je součet výšky (Z_p) nejvyššího výstupku profilu a hloubky (Z_v) nejnižší prohlubně profilu drsnosti v rozsahu základní délky.



Obr. 14. Amplitudové parametry R_p , R_v , R_z

Celková výška profilu drsnosti (R_t) je součet výšky (Z_p) nejvyššího výstupku profilu a hloubky (Z_v) nejnižší prohlubně profilu drsnosti v rozsahu vyhodnocované délky.



Obr. 15. Amplitudový parametr R_t

Průměrná výška prvků profilu drsnosti (R_c) je průměrná hodnota výšek (Z_t) prvků profilu drsnosti v rozsahu základní délky.

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti (R_a) je aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. (8)

$$R_a = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (8)$$

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu drsnosti (R_q) je průměrná kvadratická hodnota pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. (9)

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |Z^2(x)| dx} \quad (9)$$

Koeficient asymetrie posuzovaného profilu (R_{sk}) – míra asymetrie hustoty rozdělení úchylek profilu $Z(x)$ v rozsahu základní délky. (10)

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \cdot \left[\frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} Z^3(x) dx \right] \quad (10)$$

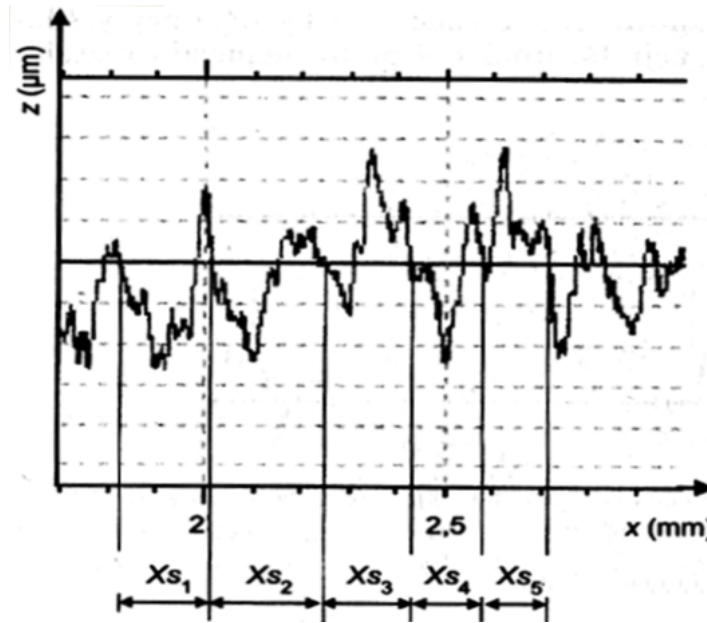
Koeficient špičatosti posuzovaného profilu (R_{ku}) – míra špičatosti hustoty rozdělení úchylek profilu $Z(x)$ v rozsahu základní délky. (11)

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \cdot \left[\frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} Z^4(x) dx \right] \quad (11)$$

3.2.2 Plošné a objemové parametry

Průměrná šířka prvků profilu drsnosti (R_{sm}) je aritmetický průměr šířek (X_s) prvků profilu drsnosti v rozsahu základní délky na střední čáře. (12)

$$R_{sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{s_i} \quad (12)$$

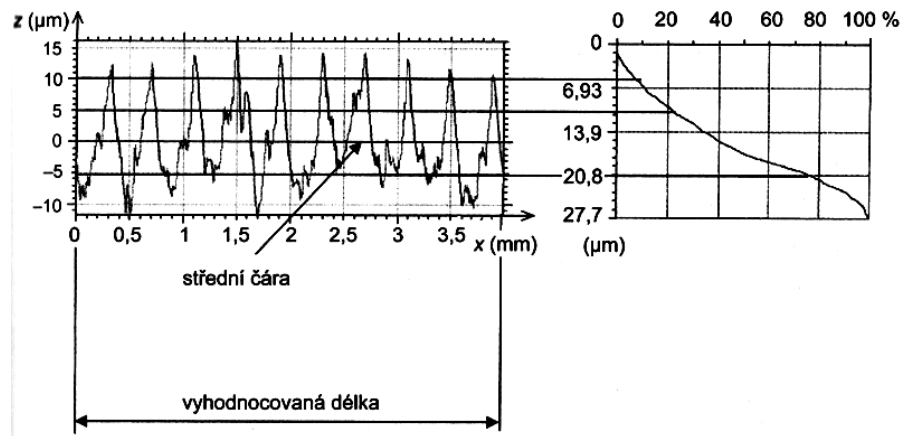


Obr. 16. Průměrná šířka prvku profilu drsnosti

Materiálový poměr profilu drsnosti (nosný podíl) $R_{mr}(c)$ je poměr délky materiálu elementů profilu drsnosti $Ml(c)$ (13) na dané úrovni c k vyhodnocované délce, při kterém platí: (14)

$$Ml(c) = \sum_{i=1}^n Mi(c) \quad (13)$$

$$R_{mr}(c) = \frac{Ml(c)}{ln} \quad (14)$$



Obr. 17. Materiálový podíl drsnosti R_{mr}

Křivka materiálového poměru profilu drsnosti (nosná křivka, AbbottFirestoneova křivka) je křivka představující materiálový poměr profilu drsnosti v závislosti na výšce profilu. Sestaví se vynesáním hodnot materiálového podílu v rozsahu celé hloubky profilu drsnosti.

Hustota výstupků povrchu (Sds) - počet výstupků na jednotkovou plochu

Směr textury povrchu (Std) – Stanovuje hlavní úhel směru textury povrchu. Parametr má význam, je-li hodnota menší než 0,5. Úhel směru se vyjadřuje ve stupních od -90° do 90° .

Poměrný aspekt textury povrchu (Str) – Poměr nejkratší délky poklesu na 0,2 autokorelační funkce k největší délce. Parametr se pohybuje v rozmezí 0 až 1. Je-li hodnota blízká 1, lze povrch označit za isotropní, tzn. má ve všech směrech stejnou charakteristiku. Blížili se hodnota 0 je povrch anizotropní, tzn. s orientovanou nebo periodickou texturou povrchu.

Fraktální dimense povrchu (Sfd) – parametr ukazuje tvarovou složitost profilu povrchu s využitím teorie fraktální geometrie. Dimense povrchu se pohybuje mezi hodnotami 2 (rovinná plocha) a 3 (velmi složitý tvar povrchu). U některých tvarů povrchu nelze fraktální dimensi stanovit a parametr pro hodnocení využít. [1]

3.2.3 Hybridní parametry

Hodnocení textury, které charakterizují spojení kritérií amplitudových s plošnými a objemovými, jako jsou sklony, zakřivené atd.

Kvadratický sklon povrchu (Sdq)

Aritmetický průměr zakřivení výstupků povrchu (Ssc)

Poměrná rozvinutá styková plocha (Sdr)

3.2.4 Funkční parametry

Skupina parametrů charakterizující funkční aspekty povrchu, především mazání a broušení. Jsou speciálně určeny kontrole v automobilním průmyslu. Jde např. o:

Hloubka drsnosti jádra (Sk)

Redukovaná výška výstupku drsnosti (Spk)

Redukovaná hloubka prohlubní (Svk)

Horní materiálový podíl (Sr1), Dolní materiálový podíl (Sr2) aj.

3.3 Měření parametrů textury povrchu

Pro praktické zjišťování hodnot charakteristik drsnosti povrchu existuje řada metod, z nichž zatím nepoužívanější je metoda dotyková. Tato metoda využívá ostrého hrotu, který se v daném směru posouvá po povrchu a umožňuje získat informace o jeho profilu.

Metoda umožňuje zjišťovat číselné hodnoty normalizovaných u nenormalizovaných charakteristik drsnosti povrchu a lze ji využít i pro moderní statistický a spektrální hodnocení textury povrchu.

Realizace metody zabezpečuje dotkový profilometr, který se skládá z mechanické a elektronické části. Mechanický signál, generovaný snímacím hrotem sledujícím nerovnosti povrchu měřené plochy, je v indukčností převodníku transformován na signál elektrický, který je dále zpracováván a interpretován jako číselná hodnota zvolené charakteristiky drsnosti povrchu, případně jako grafický záznam profilu nerovností daného povrchu. [1]

Snímání profilu měřeného povrchu může být provedeno jako snímání:

- **Absolutní** – měřicí základnou je velmi přesná přímá nebo tvarová dráha snímače (přednostně, viz ČE EN ISO 4287,4288)
- **Relativní** – měřicí základnou je dráha generovaná kluznou patkou snímače klouzající po měřeném povrchu.

Snímací systém svými vlastnostmi ovlivňuje získaný profil. Kritické jsou zejména:

- Poloměr zaoblení snímacího hrotu
- Vrcholový úhel snímacího hrotu
- Měřicí (přítlačná) síla
- Rychlost změny měřicí síly

Postup měření dotykovým profilometrem

Velikost měřených nerovností musí být přiměřena měřicímu rozsahu snímače (vertikální zdvih). Nastavená hodnota snímané délky by měla zahrnovat pětinašobek základní délky plus dráhu náběhu a doběhu snímače. Měřený objekt musí být, pokud je to možné, upnut, prostorově orientován a snímač musí být vhodně umístěn na měřený povrch. Musí být nastaveny odpovídající pracovní podmínky:

- Měřicí rozsah
- Snímaná délka
- Typ filtru
- Základní délka (cut off) filtru

Vlastní měření drsnosti povrchu obvykle trvá pouze několik sekund (v závislosti na rychlosti posuvu a snímané délce). Podstatně delší bývá doba přípravy měření (nastavená snímače na hodnocený odpich, nastavení výchozí polohy apod.). Dále je nutné přičíst dobu potřebnou pro získání záznamu s číselnými hodnotami měřených parametrů, případně grafického záznamu profilu.

Kalibrace profilometrů (ČSN EN ISO 12179, 5436-1) se provádí pomocí hmotných etalonů,

Plošné hodnocení textury povrchu

Třírozměrné hodnocení textury povrchu (3D) vyžaduje aplikaci použitelných poznatků z dvojrozměrného hodnocení textury povrchu (2D) a zavedení dalších potřebných informací pro úplný popis. Pro úplný prostorový popis nerovnosti povrchu lze aplikovat topografickou metodu využívající spojitý záznam v jednotlivých diskrétně posunutých rovinách řezu (posunutí je řádově v mikrometrech). Zobrazení hodnocené plochy je provedeno v šikmém pohledu. Plošné hodnocení (3D) je realizováno specifickými parametry, která vyžadují použití speciálního softwaru. [1]

4 DIAMANT

Diamant je jedna z krystalických podob alotropických modifikací uhlíku. Uhlík se v přírodě vyskytuje ve dvou modifikacích. V již zmíněné modifikaci diamant, který krystalizuje v krychlové mřížce a v modifikaci – grafit krystalizující v hexagonální krystalové mřížce ve formě desek. Alotropie je vlastnost chemického prvku, která označuje schopnost prvku vyskytovat se v několika strukturně odlišných modifikacích, které se liší typem krystalové soustavy, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. [10]

4.1 Rozdělení a výroba

Obecně se diamanty rozlišují na:

- 1) Přírodní diamanty
- 2) Syntetické diamanty

Přírodní diamanty

Mají mimořádně velkou tvrdost. Proti korundu, který je v Mohsově stupnici na 9. místě je diamant (10. a zároveň poslední místo) stočtyřicetkrát tvrdší.

Technické diamanty se rozdělují do těchto skupin

Karbonado – jsou často nazývané jako černé diamanty, pro svou černou barvu. Mají vysokou tvrdost v porovnání s ostatními skupinami technických diamantů. Vyskytují se velmi vzácně.

Ballasy – vytváří drobné kulovité krystalky. Jsou charakteristické svou vysokou tvrdostí a pevností v porovnání s ostatními druhy technických diamantů. Jejich výskyt je zřídka.

Bort – v průmyslu se využívá na výrobu nástrojů, jako jsou průvlaky, brusné kotouče nebo hroty na měřidla. Do této skupiny patří čiré, barevné, průsvitné i neprůsvitné krystaly. Mají tvar pravidelných mnohostěnů, ale i nedokonalé tvary s různými plochami i oblými stěnami.

Krashing bort – tvoří krystalky nepravidelných kulovitých tvarů. Jsou neprůhledné a obsahují až 20% nečistot. Používají se nejvíce pro výrobu diamantového prachu, který se používá při broušení a leštění.

V oblasti strojírenství se technické diamanty začaly používat nejprve ve formě brusných materiálů nebo past pro broušení velmi tvrdých materiálů. Před nástupem supertvrdých řezných materiálů bylo použití diamantových brusných materiálů jedinou možností, jak obrábět tvrdé materiály.

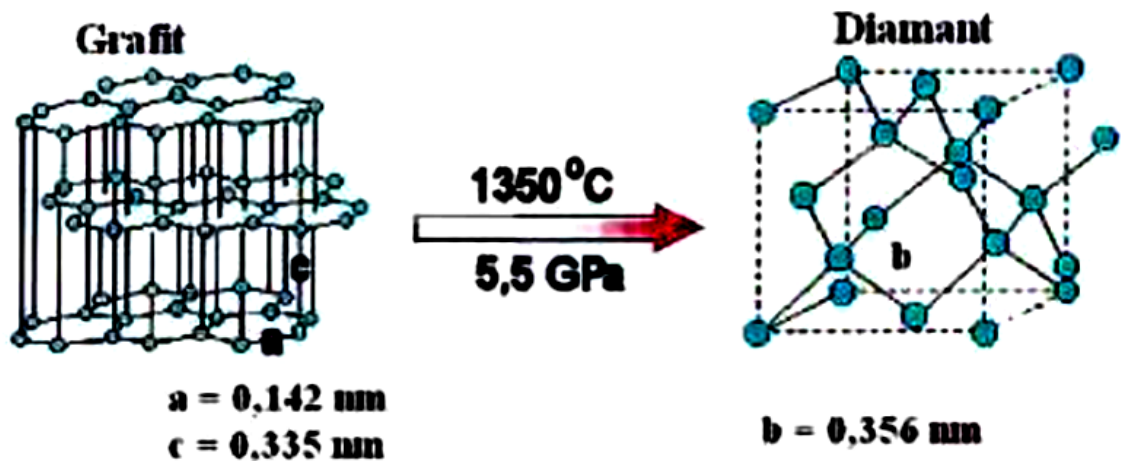
Vzrůstající spotřeba technických diamantů vedla k prvním pokusům výroby diamantu, které vyústily v první úspěšnou syntézu diamantu. Diamantové prášky získané syntézou plně vyhovovaly požadavkům mnoha průmyslových odvětví. [10]

Syntetické diamanty

Po řadě méně či více zdařilých pokusů se podařilo v laboratořích firmy General Electric roku 1955 vyrobit první diamantové zrna. Této úspěšné syntéze předcházely několikaletý vývoj speciálního tlakového zařízení, které bylo klíčovým prvkem pro syntézu. Po letech zkoušek bylo v roce 1954 zkonstruováno zařízení, které potřebné teplo okolo 1800°C a tlaky okolo 6GPa bylo schopno vytvořit a udržet je po určitou dobu konstantní.

V současné době jsou známy tři metody výroby syntetického diamantu.

- 1) Výroba v oblasti termodynamické stability diamantu působením statických tlaků minimálně 6000 MPa a teplot min. 2000K na grafit v době několika sekund bez speciálního prostředí.
- 2) Výroba v oblasti termodynamické stability diamantu působením vysokých dynamických tlaků, kdy přechází grafit na diamant působením rázové detonační vlny, která vytváří potřebný tlak 75000 až 100000 MPa, jako i potřebně vysokou teplotu. Čas působení je jen několik mikrosekund nebo zlomků mikrosekund, proto je takto získaný diamant jemnozrný.
- 3) Výroba v oblasti termodynamické stability grafitu probíhá při atmosférickém (nebo ještě nižším) tlaku a při teplotě 1400 až 1500 K epitaxiálním narůstáním diamantu v zárodcích. [11]



Obr. 18. Přeměna krystalické mřížky diamantu

4.2 Vlastnosti

Diamant, jako jedna z modifikací čistého uhlíku, krystalizuje v kubické soustavě, zatímco grafit, jako polymorfní modifikace uhlíku, krystalizuje v hexagonální soustavě, ve formě desek. Strukturu uspořádání uhlíkových atomů v elementární mřížce diamantu tvoří dvě plošně centrované kubické mřížky, které jsou proti sobě navzájem posunuty ve směru úhlopříčky tělesa o jednu čtvrtinu délky. Příčinou velké tvrdosti je, že se každý atom váže se svými čtyřmi sousedními atomy čtyřmi dvojicemi valenčních elektronů. V běžných rozpouštědlech je diamant nerozpustný. V některých roztavených kovech (železo, kobalt, nikl, platina atd.) se však rozpouští a po jejich ochlazení se z nich vylučuje jako grafit. Tím je zásadně omezeno použití diamantových nástrojů. Při opracování železných materiálů dochází ke zvýšenému opotřebení funkční části nástroje v důsledku difuze uhlíku do materiálu obrobku a současně urychlení grafitizace (přeměna diamantu na grafit) diamantu.

S rostoucí teplotou dochází u diamantu na vzduchu k oxidaci povrchu. Při teplotě 700 °C se spaluje uhlík na oxid uhličitý. Současně s tím dochází ke grafitizaci diamantu, na kterou mají značný vliv nečistoty. Při teplotách nad 850 °C dochází za přítomnosti kyslíku ke vznícení diamantu. [10]

Tab. 1. Vlastnosti diamantu

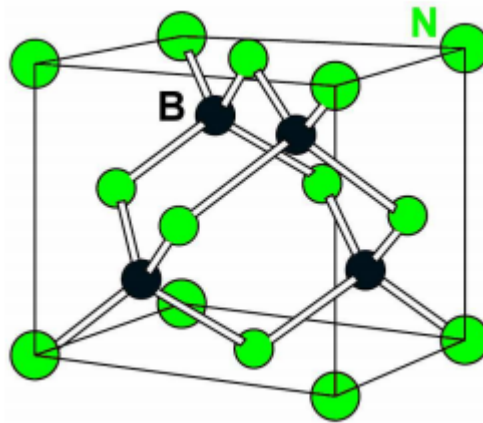
Vlastnost	Hodnota
Krystalická mřížka	Kubická
Mřížková konstanta	b=0,356
Hustota [g/cm ³]	3,5
Tvrдость podle Vickerse	10 000HV
Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	560
Délková roztažnost [K ⁻¹]	0,8*10 ⁻⁶

4.3 Použití

Nejnámější je využití diamantů ve šperkařství. Aby vynikly jejich optické vlastnosti, jsou vybrušovány do tvaru speciálního mnohostěnu – briliantu. Kvalita diamantů se určuje podle karátů, čistoty, barvy a brusů. V průmyslu se diamanty používají hlavně pro svoji tvrdost. Vyrábějí se z nich řezné, vrtné a brusné nástroje, prášky či pasty. Pro tento účel se využívají diamanty pro šperkařství bezcenné (se špatnou barvou, špatnou čistotou), diamantový prach a průmyslově vyráběné diamanty. V současnosti se však objevují i další využití diamantů. Některé modré diamanty jsou přírodní polovodiče, zatímco většina ostatních diamantů jsou výborné rezistory. Nyní je již možné použití diamantu jako polovodiče vhodného pro stavbu mikročipů nebo použití diamantu jako chladiče v elektronice.

5 KUBICKÝ NITRID BORU

Kubický nitrid boru (KNB) je v současnosti druhým nejtvrdějším materiálem. Je to syntetický materiál, který se v přírodě nevyskytuje. Jedná se tedy o syntetický materiál uměle vyrobený z hexagonálního nitridu bóru. Výroba krystalů KNB je uskutečňována použitím podobné technologie jako při produkci syntetického diamantu. KNB je vyráběn transformací hexagonálního nitridu bóru na kubickou formu. Velikost a morfologie krystalů KNB je ovlivňována vzájemným poměrem mezi použitým rozpouštědlem/katalyzátorem, tlakem, teplotou a časem transformace. [13]

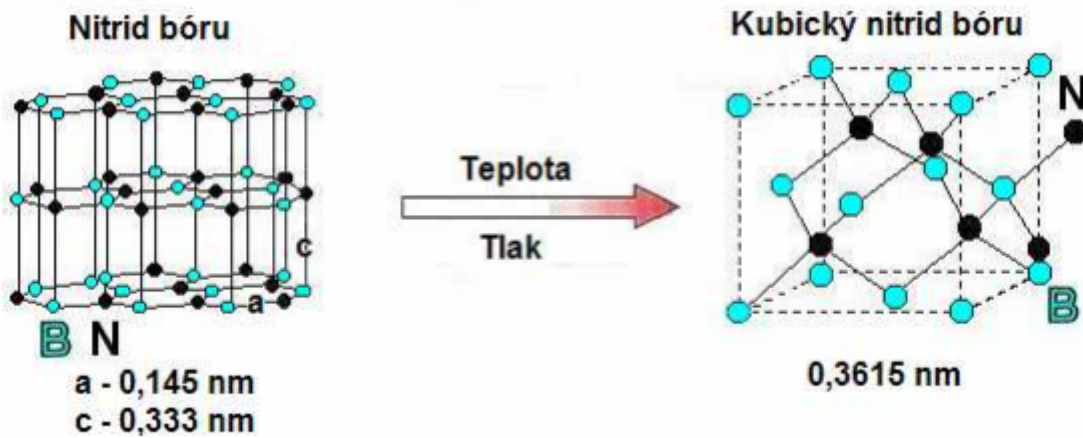


Obr. 19. Krystalická mřížka kubického nitridu bóru

5.1 Výroba

Podobně jako diamant je i KNB vyráběn syntézou a to hexagonálního nitridu boru. KNB se vyrábí v různých kvalitách, velikostech zrna a povlakuje se niklem. Nitrid boru je chemická sloučenina, která se skládá ze 43,6% boru a 56,4 dusíku. Nitrid boru se vícerými vlastnostmi podobá grafitu. Např. je měkký a kluzký. V hexagonálním nitridu boru, stejně jako i v grafitu, jsou plochy lehkého skluzu se slabou vazbou ve směru hrany základní hexagonální soustavy a podobně jako v grafitu se tyto plochy po sobě kloužou. Vzhledem na velkou příbuznost struktur a fyzikálních vlastností grafitu a nitridu boru pro své zbarvení často nazývá bílý grafit. Existuje několik způsobů výroby KNB. Převažujícím způsobem syntézy je přeměna HBN na kubický při vysokých tlacích a teplotách, za přítomnosti rozpouštědla/katalyzátoru. Jinou možností výroby KNB je přímá přeměna (bez rozpouštědla/katalyzátoru) HBN na kubickou modifikaci při vysokých tlacích. Při transformaci HBN

– KNB jsou jako rozpouštědla/katalyzátory používány alkalické kovy, kovy alkalických zemin jejich nitridy či boridy, např. Li_3BN_2 , AlN , AlB_2 a směs AL - MG. [12]



Obr. 20. Přeměna krystalické mřížky při výrobě KNB

5.2 Vlastnosti

Tab. 2. Základní vlastnosti KNB

Vlastnost	KNB
Typ mřížky	Kubická
Délka strany mřížky [nm]	0,3616
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	3,48
Tvrdość podle Knoopu	8000-10000
Tepelná stálost [$^{\circ}\text{C}$]	1500-1600
Počet atomů v 1 cm^3	$1,69 \times 10^{23}$

Výrobou kubického nitridu boru ve speciálním zařízení při teplotách a tlacích přibližně stejných jako při syntetické výrobě diamantu se potvrdila hypotéza o možnosti vzniku kubického nitridu boru s vlastnostmi podobnými, jako má diamant a s parametry krystalické mřížky téměř stejnými, jako má mřížka diamantu. Strukturální mřížku tvoří atomy boru a dusíku (zatím co mřížku diamantu pouze atomy uhlíku). Každý atom boru se váže se čtyřmi atomy dusíku, rozloženými v prostoru na vrcholech čtyřstěnu. Takto se dokázalo, že nitrid boru stejně jako i uhlík, může existovat ve dvou modifikacích, a to v měkké –

hexagonální a tvrdé – kubické. Po získání prvních vzorků se zjistilo, že tvrdost kubického nitridu boru je taková, že s ním lze poškodit diamant a jeho práškem je možné brousit přírodní diamant.

Kubický nitrid boru má oproti diamantu téměř dvojnásobnou tepelnou odolnost. Běžně vydrží kubický nitrid boru teploty 1500 až 1600 °C. Při vyšších teplotách se v přítomnosti vzdušného kyslíku rozkládá na oxidy dusíku a bor. Chemická stálost je u kubického nitridu boru značně lepší než u diamantu. Nerozpouští se v běžných rozpouštědlech ani za vyšších teplot. V roztavených kovech se nerozpouští. Další z předností je vysoká pevnost v ohybu. Dobrá tepelná odolnost a vysoká chemická stálost značně rozšiřuje oblasti použití kubického nitridu boru. [12]

Řezný materiál KNB má některé vynikající vlastnosti:

1. Je možno soustružit nebo frézovat materiály, které již dříve bylo možno pouze brousit. To přináší úspory pracnosti a nákladů.
2. Podstatné zvýšení řezné rychlosti a množství odebraného materiálu za jednotku času.
3. Vzhledem k dlouhé životnosti destičky z KNB se snižují neproduktivní časy na výměnu nástroje.
4. Je možno dosáhnout zvýšené přesnosti obrobku vzhledem k nízkému opotřebení břítu.
5. Je možno dosáhnout vynikající jakosti povrchu, což v některých případech umožňuje eliminovat broušení. [14]

5.3 Použití

Brousicí nástroje z kubického nitridu boru se používají pro ostření řezných nástrojů pro broušení tvrdých materiálů a těžkoobrobitelných materiálů, pro tvarové broušení.

Další oblast, která má vysokou míru využitelnosti nástrojů z kubického nitridu boru, je renovace nástrojů ve tvrdém stavu. Jedná se zejména o nástroje k tváření a to například rovnací kladky, trny pro výrobu rour, zápustky a případně kalibrované válce. Jestliže se k jejich obrábění použije nástroj z KNB je možné je obrábět ve tvrdém stavu. Není nutno žíhat, obrábět a následně opět zušlechťovat. Přitom dochází jednak k úsporám energie,

jednak k úspoře času na renovaci a tím eventuelně k úspoře ze snížené doby prostoje technologického zařízení. [14]

Je známe opracování součástí ze šedé litiny nástroji z kubického nitridu boru. Jde například o soustružení brzdových disků automobilů. Vyvrtávání vložek válců spalovacích motorů, či obrábění otvorů v převodovkách.

V současnosti můžeme získat krystaly kubického nitridu boru až do průměru 6mm. Tak je možné zabezpečit výrobu nožů, fréz a jiných nástrojů na rychlostní obrábění kalených ocelí.

Kubický nitrid boru může frézováním vhodně nahradit broušení, a to zejména kalených ocelí a kalené šedé litiny. Dále jím lze obecně nahradit slinutý karbid při frézování odlitků z šedé litiny nebo bílé litiny. Frézováním tímto materiálem se snadno a rychle odstraní deformace vzniklé kalením.

Použití vysoce pevných a tvrdých materiálů v konstrukci strojů bránily dosud potíže při obrábění a tím pronikavě se snižuje jejich produktivita. Použití KNB odstraňuje tyto potíže. Jeho rozšíření usnadní i zavedení přesného lití s malými přísadkami a vyšší tvrdostí povrchové vrstvy. [15]

6 MATERIÁLY VSTŘIKOVACÍCH FOREM

Formy jsou nákladné nástroje, které se sestávají z více dílčích desek a dalších pomocných součástí. Při návrhu formy je materiál volen s požadavky na vysokou životnost materiálu a snaze o snížení pořizovacích nákladů materiálu forem. Volba materiálu je ovlivněna provozními podmínkami výroby:

- Druhem vstřikovaného plastu
- Přesností a jakostí výstřiku
- Podmínkami vstřikování
- Vstřikovacím strojem

Pro výrobu forem se tedy využívá materiálů, které splňují optimálně tyto provozní podmínky a zároveň jsou ekonomicky výhodné. Výběr materiálu dílčích desek či součástí je dále ovlivněn stykem s taveninou, jejichž vysoká teplota by mohla zapříčinit změny mechanických či fyzikálních vlastností u některých materiálů.

Materiály forem jsou především:

- Oceli vhodných jakostí (konstrukční či nástrojové)
- Neželezné slitiny kovů (Al, Cu,...)
- Ostatní materiály (izolační, tepelně nevodivé – např. reaktoplasty)

Nejvýznamnějším a nejpoužívanějším materiálem pro výrobu forem jsou oceli. Svou pevností a jinými mechanickými či fyzikálními vlastnostmi se dají jen obtížně nahradit. Neželezné slitiny kovů hliníku či mědi bývají používány při výrobě forem především pro kusovou či malosériovou výrobu a pouze pro určité typy polymerů.

Formy pro velkosériovou výrobu jsou vyráběny z ocelí různých jakostí z důvodu různého namáhání desek či součástí formy při plnění požadovaných funkcí ve formě. [17]

6.1 Oceli vhodných jakostí

Jednotlivé díly forem nemají stejnou funkci. Proto vyžadují i svoje specifické požadavky na volbu materiálu, z kterého budou vyrobeny. Jejich výběr a doporučená řada má odpovídat požadované funkci součásti, s ohledem na opotřebení a životnost.

Od použitých materiálů na formy se vyžaduje především:

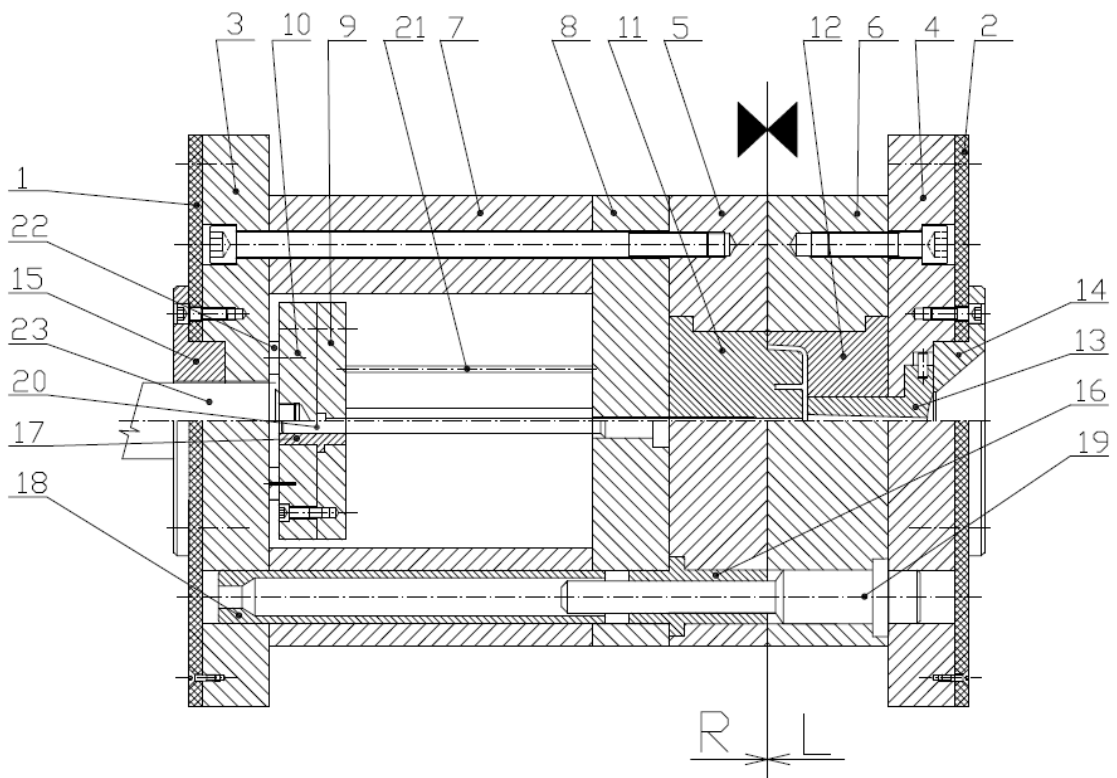
- Dostatečná mechanická pevnost
- Dobrá obrobitelnost

Z hlediska technologie výroby výstřiků má ještě materiál funkčních dílů zajišťovat speciální požadavky na kvalitu struktury, která je dána:

- Dobrou leštitelností a obrusitelností
- Zvýšenou odolností proti otěru
- Odolností proti korozi a chemickým vlivům plasty
- Vyhovující kalitelností a prokalitelností
- Stálostí rozměrů a minimálními deformacemi při kalení
- Vhodnými fyzikálními vlastnostmi

Pro výrobu forem se používají následující skupiny ocelí:

- Oceli konstrukční k použití v přírodním i zušlechtěném stavu
- Oceli k snadnému opracování a tváření, pro cementování a zušlechtování
- Oceli uhlíkové k zušlechtování
- Oceli nástrojové legované se sníženou i velkou prokalitelností a odolností proti oděru
- Oceli k nitridování
- Oceli antikorozi, používané při zpracování plastů, které chemicky ovlivňují ocel
- Oceli martenziticky vytvrditelné s malou deformací při tepelném zpracování a velkou stálostí rozměrů [17]



Obr. 21. Zobrazené a opozicované jednotlivé díly vstříkovací formy

Tab. 3 Doporučené oceli na funkční a pomocné části forem

Pozice	Název	Materiál
3, 4	Kotevní desky	19 083, 19 550, 19 663, 15 260, 11 373, 12 060, 11 600
5, 6	Upínací desky	19 083, 19 550, 19 663, 15 260, 11 373, 12 060, 11 600
7	Rozpěrky	11 373, 11 375, 11 500, 11 600
8	Opěrné desky	12 050, 12 060, 12 061, 11 373, 11 375, 11 500, 11 600
9	Vyhazovací desky kotevní	11 373, 11 375, 11 500, 11 600
10	Vyhazovací desky opěrné	11 373, 11 375, 11 500, 11 600
11, 12	Tvárník a tvárnice	19 191, 19 083, 19 312, 19 314, 19 452, 19 436, 19 550, 19 573, 19 614, 19 665, 19 902, 19 015, 19 486, 19 487, 19 340, 19 435, 17 024, 17 029, 15 340, 14 340, 14 220, 14 221, 12 060, 12 010
13	Vtokové vložky	19 312, 19 314, 19 573, 19 581, 19 486, 19 487, 15 340, 14 340
14, 15	Středící kroužky	12 050, 12 060, 12 061, 11 373, 11 375, 11 500, 11 600
16, 17	Vodící pouzdra	19 083, 19 191, 19 312, 19 314, 14 220, 19 486, 19 487
18	Středící trubky	19 083, 19 191, 19 312, 19 314, 14 220, 19 486, 19 487
19, 20	Vodící čepy	19 083, 19 191, 19 312, 19 314, 14 220, 19 486, 19 487
21	Vyhazovače	19 191, 19 312, 19 421, 19 452, 19 732
22	Dorazy	11 600, 11 700, 19 083, 19 312, 19 550, 12 060
23	Táhlo	11 373, 11 375, 11 500, 11 600

6.2 Neželezné slitiny kovů

6.2.1 Slitiny hliníků

Formy ze slitin hliníku a některých dalších kovů mají své speciální použití. Nejsou tak pevné a odolné proti opotřebení jako oceli. Zato mají jiné dobré vlastnosti (tepelnou vodivost, korozivzdornost), které lze s výhodou u forem využít.

Používají se např. formy pro strukturní pěny. Zde je vyžadován intenzivní chladicí účinek, dobrá chemická odolnost proti korozi i ostatním činidlům, vznikajícím při vstřikování plastů s nadouvadlem.

Pro výrobu funkčních dílů forem se osvědčila válcovaná slitina 424203.6, u které se může dosáhnout poměrně vysoké pevnosti vytvrzením. Odlévané materiály se používají již méně. U nich není lehké docílit hladký a bezporézní povrch. Poréznost se projevuje u materiálu i u temperačních kanálů. Proto se do takových odlitků zalévají, nebo vkládají měděné chladicí trubky. [17]

6.2.2 Slitiny mědi

Na výrobu forem se mimo oceli začínají více prosazovat slitiny mědi. Nejen pro chladicí trny tenkých tvárníků, ale i na tvarové vložky, vytáčeční matice a šrouby, vyhazovací kolíky, vodící a středící pouzdra, různá vedení apod. To proto, že mají některé výhody oproti ocelím. Jsou to především velmi dobrá tepelná vodivost, dobrá chemická odolnost, dobré kluzné vlastnosti. Vhodným využitím těchto vlastností se dosáhne zkrácení pracovního cyklu vstřikování (kratší chladicí časy), vyšší kvalita výstřiku (výhodnější technologické časy), vyšší funkční bezpečnost (hladší plochy, vhodnější kluzné vlastnosti).

Čistá měď jako materiál se používá málo. Pro funkční díly se častěji používají nejrůznější slitiny mědi s jinými kovy. Tím se vlastnosti Cu poněkud mění. Při volbě optimální slitiny záleží na tom, která kritéria je nutno upřednostnit. [17]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce byl výzkum broušení materiálů, z nichž jsou vyráběny jednotlivé díly vstříkovacích forem a to kotouči z diamantu a kubického nitridu bóru.

Teoretická část diplomové práce je věnována teorii broušení, doprovodných jevů při broušení, broušicích strojů a nástrojů a také jakosti a hodnocení povrchu po broušení. Teoretická část dále obsahuje výrobu, vlastnosti a použití diamantu a kubického nitridu bóru. Jsou zde popsány i materiály z nichž jsou vstříkovací formy vyráběny.

Praktická část diplomová práce byla věnována analýze a výzkumu závislostí změn technologických podmínek při broušení na velikosti řezných sil, jakosti povrchu a kmitání u třech broušicích kotoučů.

V praktické části byly provedeny následující měření či návrhy:

- 1) Měření řezných sil při broušení pro různé technologické podmínky
- 2) Měření jakosti povrchu (R_a , R_z , R_t , R_{mr}) po broušení při různých technologických podmínkách
- 3) Měření kmitání při broušení pro různé technologické podmínky
- 4) Návrh konstrukce orovňovacího přípravku pro orovňování diamantového kotouče a kotouče z kubického nitridu bóru

Pro broušení a následný výzkum byly použity materiály, z nichž se vyrábí vstříkovací formy. Jednalo se o materiál **19 436.4** (tvárník, tvárnice, vtoková vložka, desky, vyhazovače aj.), **14 109.4** (desky, vodící čepy, vodící pouzdra aj.), **Epoxidová pryskyřice** (izolační desky) a **Dural** (používaný pro menší, jednodušší či levnější formy).

Broušicí kotouče byly zkoumány celkem tři. Materiál zrn broušicích kotoučů byl **diamant**, **kubický nitrid bóru** a **bílý korund**. Všechny materiály forem byly broušeny těmito třemi broušicími kotouči při různých technologických podmínkách.

V prvním případě zůstávala konstantní hloubka úběru $a_p = 0,01\text{mm}$ a měnila se velikost posuvové rychlosti:

- 1) $v_p = 2,5 \text{ m/min}$
- 2) $v_p = 12,5 \text{ m/min}$
- 3) $v_p = 20 \text{ m/min}$
- 4) $v_p = 22,5 \text{ m/min}$

V druhém případě byla konstantní posuvová rychlost $v_p = 16,5\text{m/min}$ a měnila se hloubka úběru:

- 1) $a_p = 0,005 \text{ mm}$
- 2) $a_p = 0,01 \text{ mm}$
- 3) $a_p = 0,02 \text{ mm}$
- 4) $a_p = 0,04 \text{ mm}$

8 CHARAKTERISTIKA BROUSICÍCH KOTOUČŮ A BROUŠENÝCH MATERIÁLŮ

8.1 Použité brousicí kotouče

Pro broušení byly použity následující brousicí kotouče:

- 1) **A 99B 80 Is(K) 9 V**
- 2) **B107 K100 B-III**
- 3) **D100 K100 B-VI**

Tab. 4. Charakteristika brousicích kotoučů

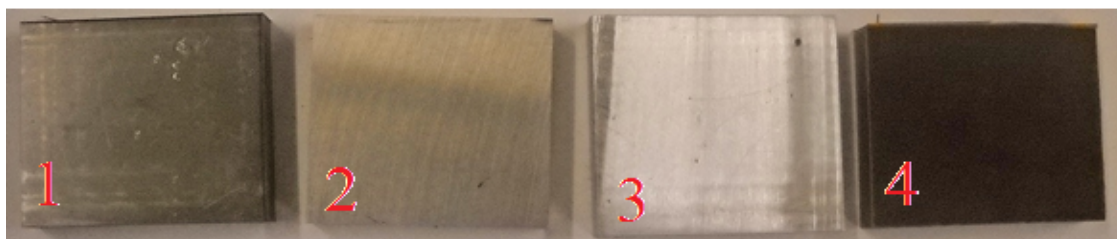
Označení kotouče	typ zrna	zrnitost	Tvrдость	Pojivo
A 99B 80 Is(K) 9 V	bílý korund	jemná	měkký	V – keramické
B107 K100 B-III	kubický nitrid boru	jemná	měkký	B – pryskyřičné
D100 K100 B-VI	diamant	jemná	tvrdý	B - pryskyřičné

Z Tab.4. lze vidět, že se brousicí kotouče liší především v typu zrna a tvrdosti. Všechny brousicí kotouče mají jemnou zrnitost. Zrnitost u kotouče B107 K100 B-III reprezentuje číslo 107 dle ISO 6106, které v normě ČSN 224015 představuje hodnotu 80 (stejně jako u kotouče se zrny z bílého korundu) – jemná zrnitost. U kotouče D100 K100 B-VI je zrnitost dána číslem 100 dle ČSN 224015 – jemná zrnitost. Další odlišností u těchto brousicích kotoučů je použití pojiva, kotouč se zrny z bílého korundu má pojivo keramické, zatímco kotouče z diamantu a kubického nitridu bóru mají pojivo pryskyřičné.

8.2 Broušené materiály

Pro výzkum broušení materiálů dílů forem byly použity dva ocelové materiály (oba kalené), jeden materiál ze slitiny hliníku a jeden polymerní materiál:

- 1) 19 436.4
- 2) 14 109.4
- 3) Dural
- 4) Epoxidová pryskyřice



Obr. 22. Broušené materiály používané při výrobě forem

Rozměry všech vzorků byly jednotné a to 50x50x10 mm.

8.2.1 Ocel 19 436

Oceli třídy 19 jsou oceli nástrojové. Požaduje se u nich vysoká tvrdost a pevnost, dostatečná houževnatost, odolnost proti opotřebení, vhodná prokalitelnost a leštitelnost. Různým chemickým složením a vhodným tepelným zpracováním lze u nástrojových ocelí měnit jejich vlastnost v širokém rozsahu. Oceli třídy 19 se dělí na oceli legované a nelegované.

Ocel 19 436 je vysoce legovaná chromová ocel s velkou prokalitelností. Je vhodná ke kalení v oleji a na vzduchu. Obsahuje 1,8 až 2,05% C, 0,2 až 0,45% Mn, 0,2 až 0,45% Si a 11 až 12,5% Cr.

Vlastnosti této oceli jsou vysoká odolnost proti opotřebení, dobrá řezivost, velmi vysoká pevnost v tlaku. Ocel je citlivá na rychlý a nestejněměrný ohřev, vhodná ke kalení na sekundární tvrdost (možnost nitridování).

Tato ocel se používá na nástroje pro stříhání za studena, nástroje pro tváření, protlačování. Ocel je také vhodná při výrobě malých forem s vysokou životností pro tváření plastických a práškových hmot, skla, porcelánu a keramických materiálů. [15]

8.2.2 Ocel 14 109

Oceli třídy 14 jsou legované Cr, Mn, Si popřípadě ještě Ni, Al, Ti. Jsou vhodné k cementování, zušlechťování nebo povrchovému kalení. Mají zvýšenou prokalitelnost. Patří mezi jedny z nejdůležitějších legovaných ocelí.

Ocel 14 109 tvoří zvláštní skupinu, vyžaduje se u nich velká metalurgická čistota (sleduje se u nich hlavně velikost a tvar nekovových vměstků, zejména siřičku a oxidů – Al_2O_3), tvrdost a odolnost proti opotřebení. Obsahují asi 1,1% C, 0,8 až 1,6% Cr a asi 1% Mn. Vyznačují se vysokou tvrdostí a vysokou pevností v tlaku. Dále je tato ocel dobře tvárná za tepla a obrobitelná. Jsou vhodné na valivá ložiska. Zároveň se tento materiál označuje jako etalonový materiál pro broušení. [15]

8.2.3 Dural

Dural je obchodní označení pro různé slitiny obvykle 90–96 % hliníku a 4–6 % mědi s menšími přísadami mědi, hořčíku, manganu aj. Oproti čistému hliníku je dural jen nepatrně těžší, ale až pětikrát pevnější v tahu i tvrdší. Pevnost i tvrdost se zvyšuje tepelným opracováním a zušlechťováním, podobně jako u ocelí. Velmi snadno se obrábí, spojuje svařováním v ochranné atmosféře, pájením s pomocí speciálních tavidel, nýtováním nebo lepením.

Dural je chemicky odolný a dá se velmi dobře povrchově upravovat a barvit. Nedostatkem duralových slitin je malá schopnost tlumit otřesy a pohlcovat rázy, neboť mají malou anelasticitu.

Broušený materiál má označení Dural 7022 T 651 nebo také obchodní označení Certal. Tento materiál má po vytvrzení vysokou pevnost 555MPa, přičemž napětí v kluzu tohoto materiálu činí 495MPa a tvrdost až 170 HB. Jak již bylo zmíněno, používá se tento materiál ve vytvrzeném stavu. Má střední odolnost proti korozi a svařitelnost. Je velmi dobře obrobitelný a lešitelný. Také se dá dobře eloxovat.

8.2.4 Epoxidová pryskyřice

Na bázi epoxidů se vyskytuje celá řada modifikovaných typů. Ve vytvrzeném stavu mají epoxidové pryskyřice výborné fyzikální i chemické vlastnosti. Za studena se vytvrzují tzv. polyethylenpolyaminy (např. DETA, TETA) a dalšími alifatickými i cyklickými polyaminy. Epoxidové pryskyřice ve vytvrzeném stavu lépe odolávají agresivním činidlům než polyesterové pryskyřice. Odolávají vodě, ovšem dlouhodobé působení horké vody způsobuje bobtnání a pokles mechanických vlastností (rázové houževnatosti a pevnosti v tahu). Epoxidové pryskyřice mají také značnou odolnost vůči kyselinám, vodným roztokům zásad, solí, alkoholům a dalším. Jejich tepelná odolnost je relativně velká. Z velkého počtu různě modifikovaných epoxidových pryskyřic lze pro venkovní použití doporučit zejména licí pryskyřice a epoxidové lamináty. Přes všechny vzhledové změny se obvykle mechanické vlastnosti epoxidové pryskyřice nemění, takže vhodně zvolené materiály slouží jako výrobky velmi odolně vůči povětrnostnímu stárnutí. U některých typů, u kterých dochází ke změně mechanických vlastností účinkem povětrnosti, většinou dochází ke štěpení vazeb, které vede ke snížení stupně zesílení. Z důvodu výborných fyzikálních i chemických vlastností se epoxidová pryskyřice využívá u vstřikovacích forem jako izolační deska. [18]

9 VYHODNOCENÍ ŘEZNÝCH SIL

Broušení materiálů dílů forem (19 436.4, 14 109.4, Dural, Epoxidová pryskyřice) probíhalo na brusce BRH 20.03 F. Všechny tyto materiály byly postupně broušeny broušícími kotouči z diamantu, kubického nitridu boru a bílého korundu. Pro broušení byly použity různé technologické podmínky:

Konstantní hloubka úběru $a_p = 0,01 \text{ mm}$ a změna velikosti posuvové rychlosti:

1) $v_p = 2,5 \text{ m/min}$ 2) $v_p = 12,5 \text{ m/min}$ 3) $v_p = 20 \text{ m/min}$ 4) $v_p = 22,5 \text{ m/min}$

Konstantní posuvová rychlost $v_p = 16,5 \text{ m/min}$ a změna hloubky úběru:

1) $a_p = 0,005 \text{ mm}$ 2) $a_p = 0,01 \text{ mm}$ 3) $a_p = 0,02 \text{ mm}$ 4) $a_p = 0,04 \text{ mm}$

Při všech technologických podmínkách byly vzorky broušeny na sucho, bez použití chladící či řezné kapaliny, bez vyjiskřování všemi broušícími kotouči a pomocí dynamometru byly snímány složky řezných sil F_p (radiální složka řezné síly) a F_c (tangenciální složka řezné síly). Pro následné statistické vyhodnocení řezných sil byly hodnoty řezných sil při všech technologických podmínkách měřeny minimálně pětkrát.

9.1 Bruska BRH 20.03 F

Bruska BRH 20.03F je rovinná bruska s horizontálním vřetenem a pravoúhlým stolem.



Obr. 23. Rovinná horizontální bruska BRH 20.03F

Je určena pro broušení rovinných a tvarových ploch součástek z oceli litiny a ostatních kovových i nekovových materiálů, u kterých se vyžaduje dosažení vysoké přesnosti a kvality zpracování. Brousí se převážně obvodem brousícího kotouče. Broušené součástky podle svých rozměrů, tvaru a materiálu mohou být upínané přímo na elektromagnetickou desku, nebo prostřednictvím vhodných upínačů.

Bruska pracuje v uzavřeném automatickém pracovním cyklu. K řízení automatického cyklu je bruska vybavena číslicovou indikací NV 300E fy FAGOR, která slouží k odměřování dráhy svislého a příčného posuvu při práci v ručním režimu a k řízení posuvu v automatickém pracovním cyklu.

Z hlediska koncepce se bruska BRH 20.03F vyznačuje tím, že stůl vykonává podélný pohyb po vedení vyhotoveném na předním loži a příčný posuv vykonává brusný vřeteník spolu se stojanem, ve kterém je vedení pro jeho svislý posuv. Hydraulický agregát a skříň elektriky tvoří samostatné celky umístěné mimo stroj. Bruska také může pracovat s ruční obsluhou v uzavřeném nebo neuzavřeném automatickém cyklu. [16]

Tab. 5. Některé technické parametry brusky BRH 20.03F

Výška stroje [mm]	2240
Hmotnost stroje [kg]	1860
Rozměry brousícího kotouče [mm]	250 x 20-50 x 76
Pracovní plocha stolu [mm]	200 x 630
Rychlost stolu plynule regulovatelná [m/min ⁻¹]	1-23
Otáčky brousícího vřetená [min ⁻¹]	2550

9.2 Tenzometrický dynamometr

Měření řezných sil F_p , F_c bylo provedeno na dvousložkovém tenzometrickém dynamometru. Tenzometrický dynamometr byl upnut na pracovní stůl brusky BRH 20.03.F a do něj byly postupně upínány kostky všech dříve zmiňovaných broušených materiálů. Pomocí kabelů byl dynamometr spojen s měřicím přístrojem Spider 8, který pomocí softwaru v PC umožňuje konfiguraci měření, zobrazení řezných sil (F_p , F_c) ve formě grafu, ukládání těchto grafů v podobě textového souboru s číselnými hodnotami řezných sil v jednotlivých časech a analýzu naměřených dat.



Obr. 24. Tenzometrický dynamometr

Hodnoty řezných sil byly poté statisticky vyhodnoceny a to pomocí:

1) **Odhad aritmetického průměru** (15):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (15)$$

kde: \bar{X} - odhad aritmetického průměru F_c, F_p ,

X_i - jednotlivá hodnota F_c, F_p z celkového počtu hodnot i

n – počet hodnot výběru

2) **Odhad směrodatné odchylky** (16):

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - \bar{X}}{n-1} \quad (16)$$

kde: \bar{S} - odhad směrodatné odchylky

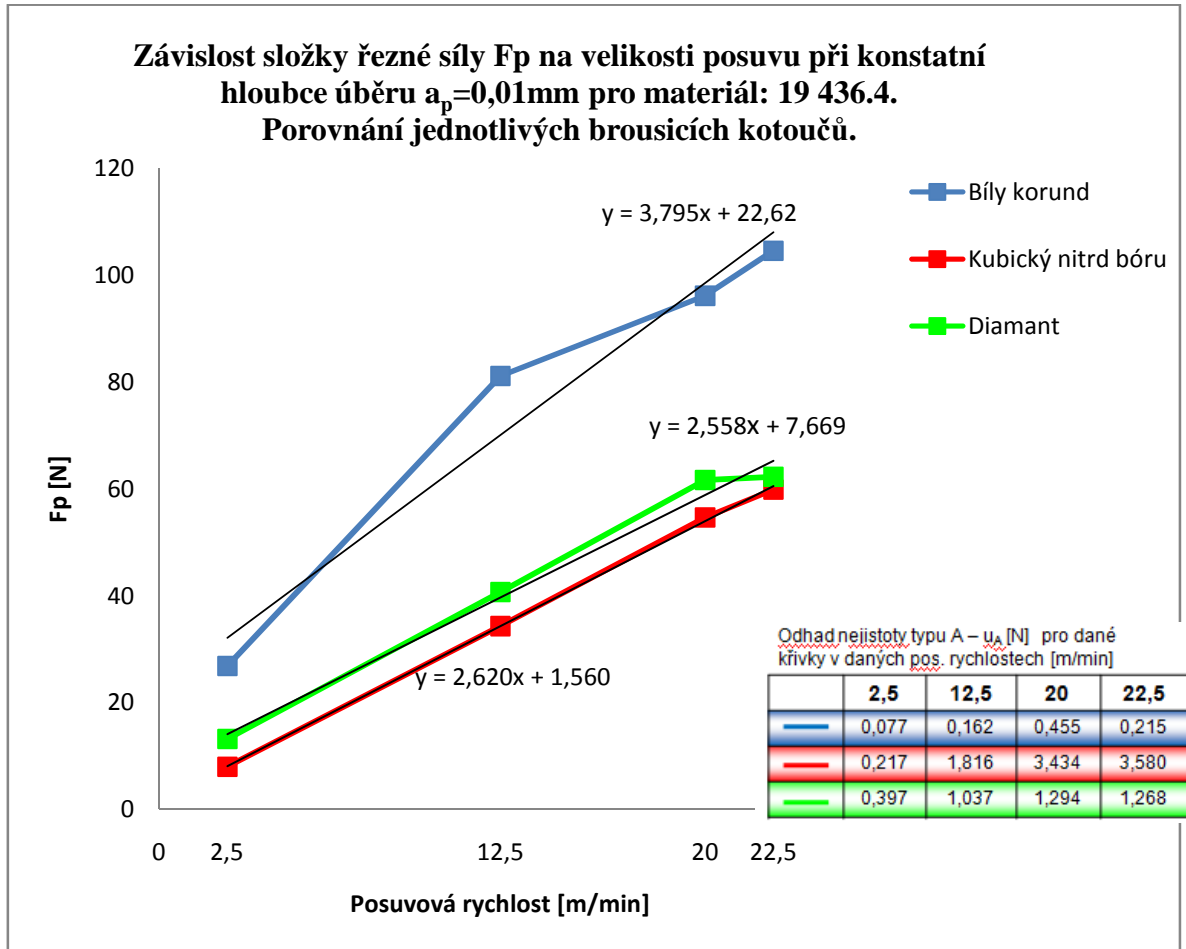
3) **Odhad standardní nejistoty typu A** (17):

$$u_A^- = \frac{\bar{S}}{\sqrt{n}} \quad (17)$$

kde: u_A^- - odhad standardní nejistoty typu A

9.3 Materiál: 19 436.4

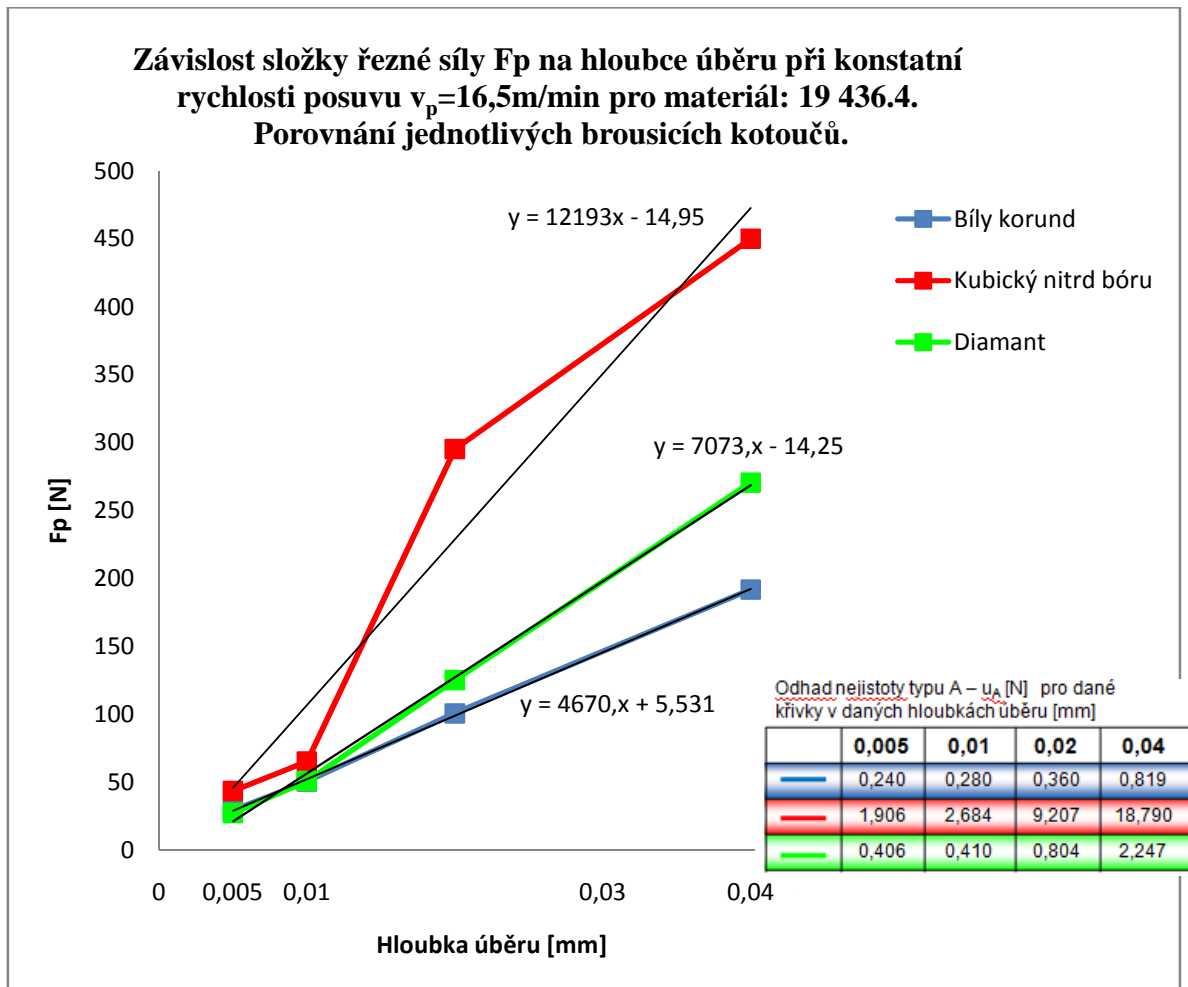
9.3.1 Vyhodnocení řezné síly F_p při změně posuvové rychlosti



Obr. 25. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál 19 436.4

Z Obr. 25. vyplývá, že se zvyšující se posuvovou rychlosti při konstantní hloubce úběru $a_p=0,01$ mm se složka řezné síly F_p zvyšuje u všech brousicích kotoučů, tzn. čím vyšší je posuvová rychlost, tím větší je složka řezné síly F_p . Dále lze vidět, že při všech posuvových rychlostech je dosahováno nejvyšších hodnot u brousicího kotouče se zrný z bílého korundu. Při broušení dochází také k rychlému ohřevu broušených ploch, což není příznivé pro materiály cementované a kalené (14 109.4, 19 436.4) a to i při krátkodobém ohřevu nad 150°C , kdy dochází k popuštění a poklesu tvrdosti. Tyto vysoké teploty mohou způsobit zvýšení tahových pnutí a může také docházet ke vzniku trhlinek v povrchové vrstvě, proto je možno použít kotouče s jemnými zrný, aby bylo tomuto jevu zabráněno.

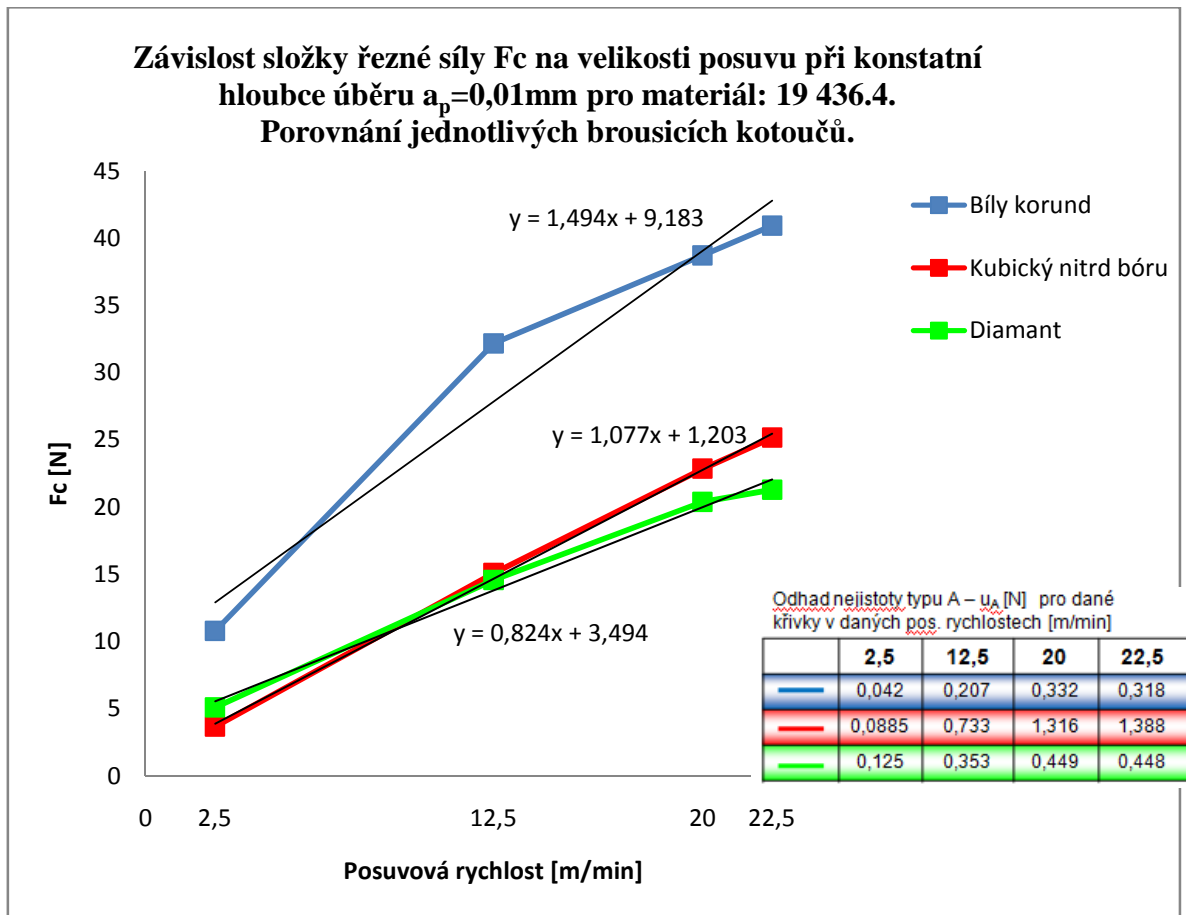
9.3.2 Vyhodnocení řezné síly F_p při změně hloubky úběru



Obr. 26. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál 19 436.4

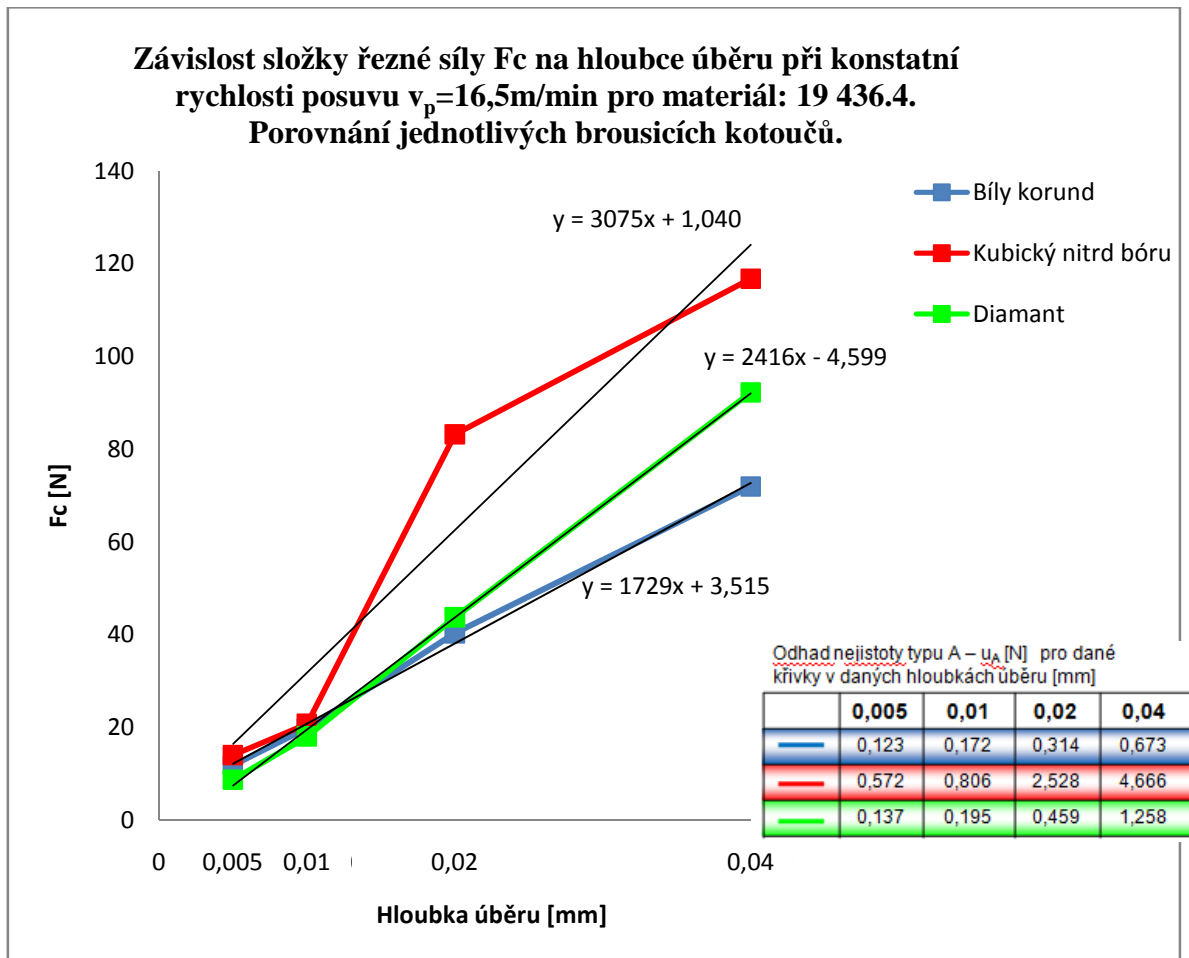
Se zvyšující se hloubkou úběru se pro materiál 19 436.4 zvyšují u všech kotoučů i velikosti složky řezné síly F_p . Při nižších hloubkách úběru (0,005mm a 0,01mm) se velikosti řezných sil u všech brousících kotoučů velice podobají. Při vyšších hloubkách úběru lze pozorovat rapidní nárůst složky řezné síly F_p u brousících kotoučů se zrn z tvrdých materiálů, jako jsou kubický nitrid boru a diamant. Měkčí brousící kotouč z bílého korundu takovýto rapidní nárůst nezaznamenává, a proto je vhodnější při takto velkých hloubkách úběru použít měkčí brousící kotouč. Při broušení výrobku z materiálu 19 436.4, který má velkou tvrdost a malou stykovou plochu, je lépe použít kotouče s menší pórovitostí. Pro broušení s velkou hloubkou úběru je pak lépe použít kotouče s hrubšími zrn, především jednalo-li by se o broušení výrobku či dílu s velkou styčnou plochou.

9.3.3 Vyhodnocení řezné síly F_c při změně posuvové rychlosti



Obr. 27. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál 19 436.4

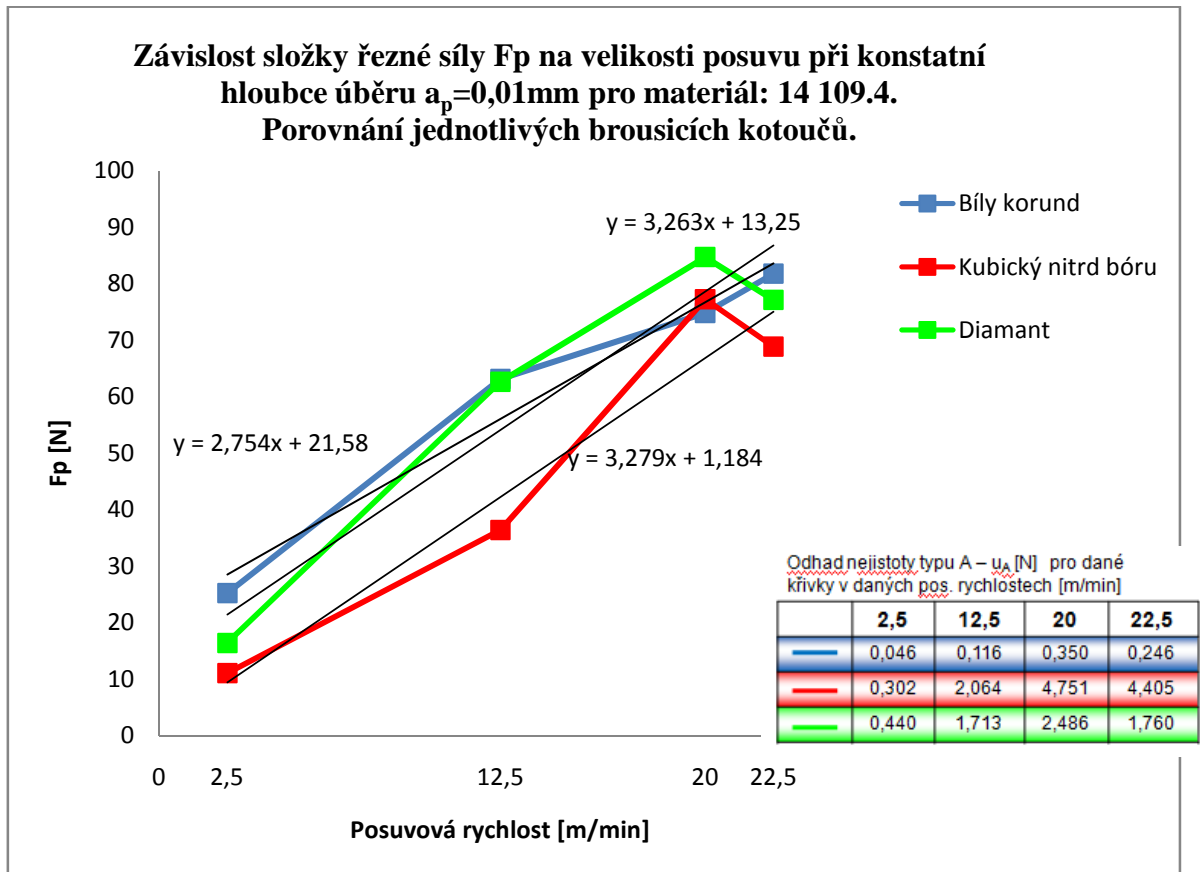
Tangenciální složka řezných sil F_c měla u materiálu 19 436.4 podobný průběh jako radiální složka řezné síly F_p . Z Obr. 27. lze vidět, že s rostoucí posuvovou rychlostí roste i složka řezné síly F_c . Velikost tangenciální složky řezné síly je v porovnání s radiální o takřka polovinu menší. Nejvyšších hodnot sil bylo naměřeno u kotouče se zrny z bílého korundu a to při všech posuvových rychlostech. Kotouč se zrny z diamantu a kubického nitridu bóru dosahují velikosti sil téměř o polovinu menší. Při úběru $a_p=0,01$ mm je tedy pro materiál 19 436.4, z hlediska velikosti řezných sil (F_c i F_p), lépe použít brousící kotouče s tvrdšími zrny. Pro vyšší posuvové rychlosti (20 a 22,5 m/min) při broušení výrobků s velkou stykovou plochou, je lépe použít kotouče s hrubším zrnem. Brousící kotouč se zrny z bílého korundu je lépe použít pro materiály houževnaté než pro tvrdé kalené materiály, chceme-li dosáhnout co nejlepších jakostí a co nejnižších hodnot složek řezných sil, které silně ovlivňují i velikost tepla vzniklého při broušení.

9.3.4 Vyhodnocení řezné síly F_c při změně hloubky úběruObr. 28. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál 19 436.4

Při konstantní velikosti posuvové rychlosti a změně hloubky úběru lze pozorovat, že u menších hloubek úběru vycházely tangenciální složky řezných sil všech brousicích kotoučů podobně, což je patrné z Obr. 28. Rapidní změna nastává při velkém úběru $a_p=0,2$ mm a $a_p=0,04$ mm. Nejvyšších hodnot dosahoval kotouč se zrný z kubického nitridu boru a o něco menší pak se zrný z diamantu. Hodnoty složek řezných sil F_c jsou v porovnání se složkou řezné síly F_p při stejných podmínkách vícenásobně menší. Nejnižších hodnot zde dosahoval kotouč se zrný z bílého korundu, z čehož plyne, že při velkých hloubkách úběru je lépe použít kotouč s měkčími zrný. I u těchto sil lze pozorovat již dříve zmiňovanou zákonitost, že se vzrůstající hloubkou úběru vzrůstá i velikost složky řezné síly F_c . U velkých hloubek úběru docházelo u všech broušených materiálů také k nárůstu kmitání brousicího kotouče, především u kubického nitridu boru a diamantu, což lze vidět i na nárůstu hodnot nejistoty typu A.

9.4 Materiál: 14 109.4

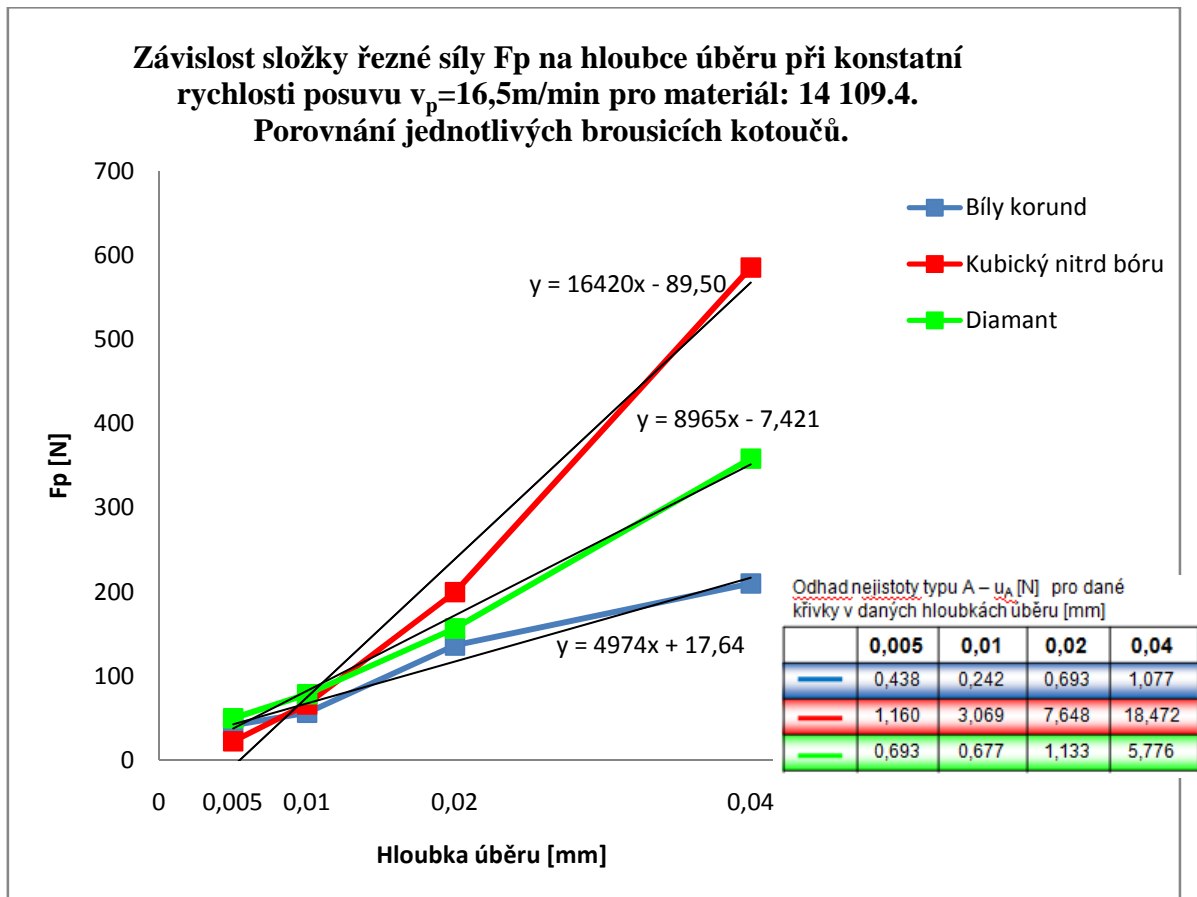
9.4.1 Vyhodnocení řezné síly F_p při změně posuvové rychlosti



Obr. 29. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál 14 109.4

Při broušení materiálu 14 109.4 dosahovaly velikosti řezných sil u všech brousicích kotoučů podobných hodnot. S vyšší rychlostí posuvu roste i velikost radiální složky řezné síly. Nejvyšší hodnoty lze poté pozorovat u kotouče se zrní z diamantu. U kotouče se zrní z diamantu a kubického nitridu došlo dokonce k poklesu při nejvyšší posuvové rychlosti $v_p=22,5$ m/min. Tato skutečnost je zapříčiněna již pouze malou změnou rychlosti posuvu o to pouze o hodnotu 2,5 m/min a možnou náhodnou chybou při měření a následným statistickým vyhodnocením. Materiál 14 109.4 je také kalený, proto se musí brát ohled na vyšší teploty při broušení, následné snížení tvrdosti a pevnosti při popuštění u těchto teplot, které mají za následek zvýšení tahových pnutí a vznik trhlinek na povrchu. V případě, kdy by tato nežádoucí skutečnost nastala, je možné použití brousicích kotoučů s jemnějšími zrní, aby se takovým to jevům předešlo. Při vysokých posuvových rychlostech, zvláště pak u velkých styčných ploch, je lépe použít brousicí kotouče s hrubším zrnem.

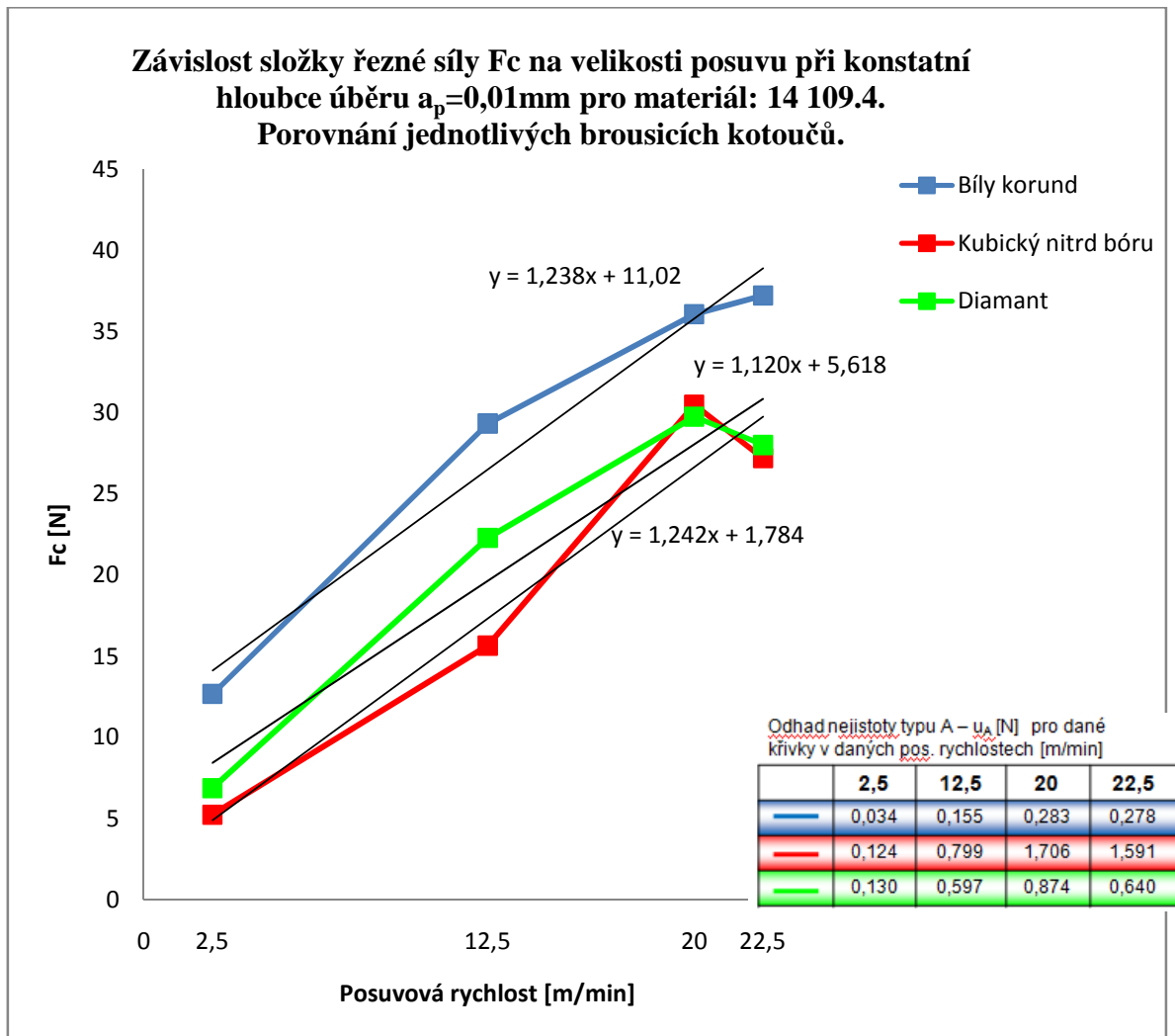
9.4.2 Vyhodnocení řezné síly F_p při změně hloubky úběru



Obr. 30. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál 14 109.4

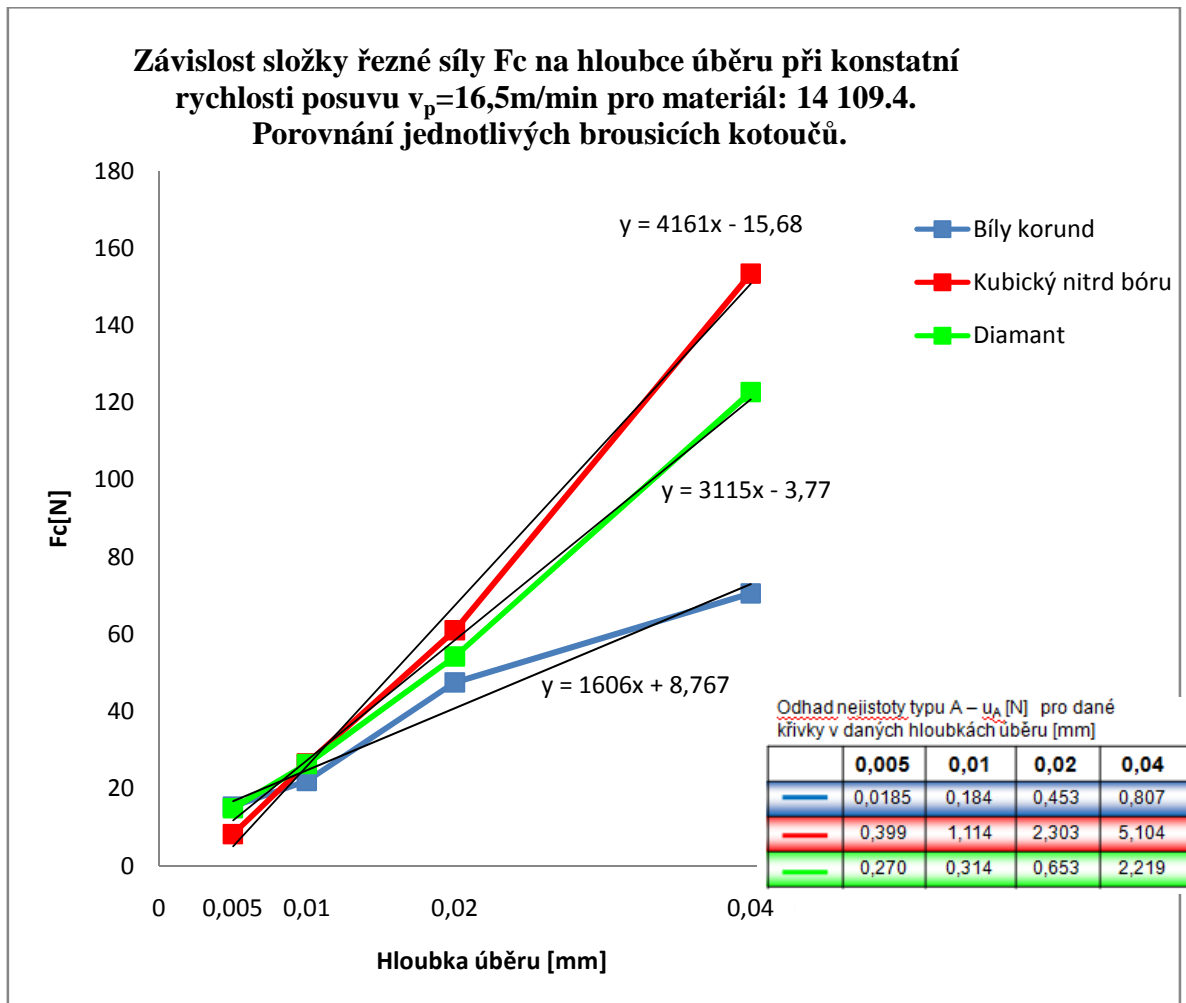
Z Obr. 30 lze vidět, že s rostoucí hloubkou úběru roste i velikost radiální složky řezné síly F_p . Při nižších hloubkách úběru je velikost sil u všech brousících kotoučů podobná. Se zvyšující se hloubkou úběru u materiálu 14 109.4 dochází k nárůstu řezných sil F_p u kotoučů s tvrdšími zrny (kubický nitrid boru, diamant), stejně jako u materiálu 19 436.4. Proto je u větších hloubek úběru pro materiál 14 109.4 lepší použít kotouč s měkčími zrny. Při vysoké hloubce úběru docházelo zároveň k velkému kmitání kotoučů, což zapříčiňuje velké hodnoty nejistoty typu A. Další skutečností při broušení takto velkých hloubek úběru bylo velké zahřátí broušeného vzorku, který na určitých místech vykazoval i spálená místa. Tato skutečnost je nežádoucí z důvodu možného popouštění materiálu, které má za následek snížení tvrdosti a zvýšení tahových napětí (pnutí) a vznik trhlinek. Pro snížení velikosti vzniklého tepla při broušení je vhodně použití brousících kotoučů s jemnějšími zrny. Pokud by nedocházelo k příliš velkému zahřátí součásti při broušení, je pro velké hloubky úběru (0,02 a 0,04mm) lépe použít kotouče s hrubším zrnem.

9.4.3 Vyhodnocení řezné síly F_c při změně posuvové rychlosti



Obr. 31. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál 14 109.4

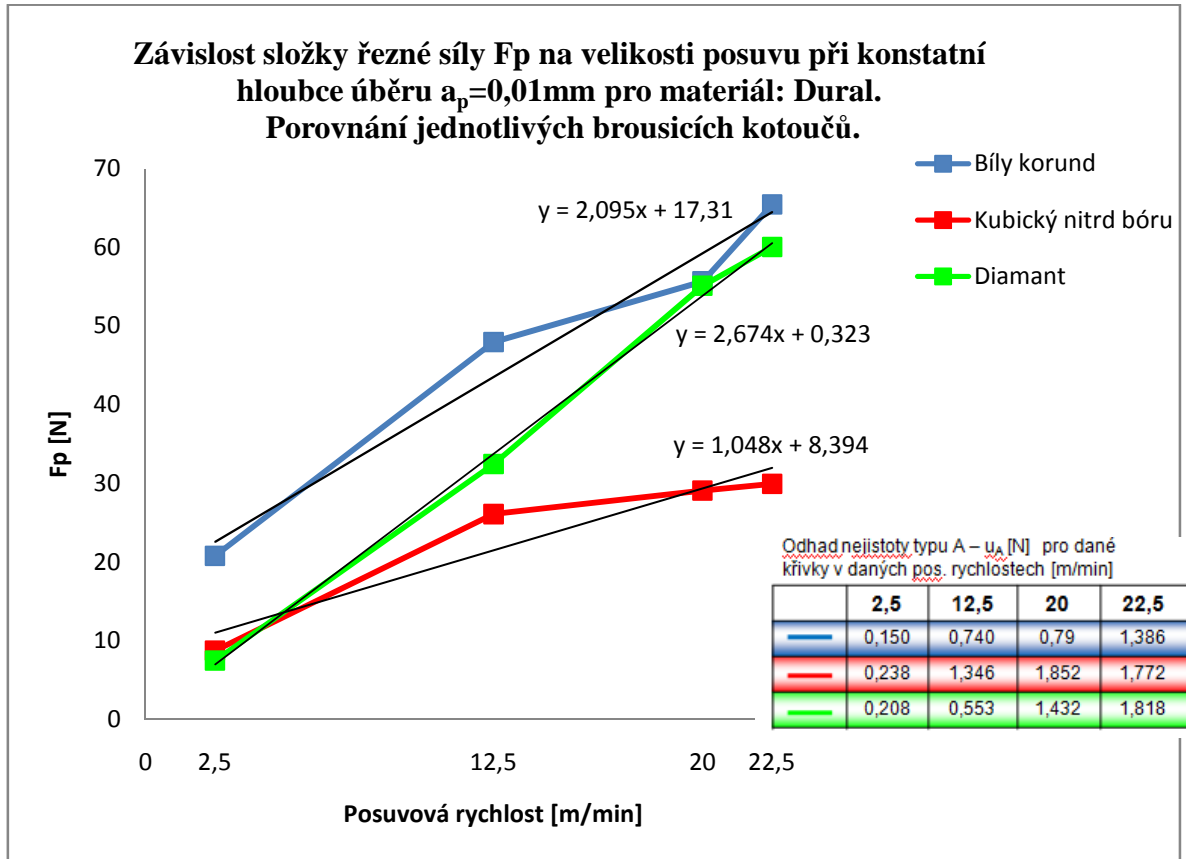
Tangenciální složky řezných sil byly zaznamenány nejvyšší u brousicího kotouče se zrny z bílého korundu. Kotouče se zrny tvrdých materiálů dosahují u materiálu 14 109.4 menších hodnot. Stejně jako u radiálních řezných sil F_p u tohoto materiálu došlo u nejvyšší posuvové rychlosti 22,5 m/min k poklesu složky řezné síly F_c u kotoučů z diamantu a kubického nitridu bóru. Až na tuto skutečnost lze z Obr. 31. pozorovat, že s rostoucí posuvovou rychlostí se velikost složky tangenciální síly F_c u všech brousicích kotoučů zvyšuje. Velikost tangenciální složky řezné síly F_c je oproti radiální složce řezné síly F_p zhruba poloviční. Materiál 14 109.4 je materiál kalený a tedy i tvrdý, při snaze docílit co nejlepších jakostí povrchu by proto bylo vhodné použít hutnější kotouče.

9.4.4 Vyhodnocení řezné síly F_c při změně hloubky úběruObr. 32. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál 14 109.4

Velikost složky řezné síly F_c se s rostoucí hloubkou úběru zvyšuje. Lze pozorovat, že i pro tangenciální silu F_c platí, že při malých hloubkách úběru jsou hodnoty všech brousících kotoučů podobné. Větší změna nastává až při větších hloubkách úběru, kdy lze vidět, že kotouče se zrnny tvrdých materiálů (kubický nitrid boru, diamant) zaznamenávají větší nárůst složky řezné síly F_c oproti měkkému brousícímu kotouči se zrnny bílého korundu. Při takto velkých hloubkách úběru jako je 0,04 mm, je proto z hlediska velikosti, řezných sil lépe použít měkkí brousící kotouče nebo také brousící kotouče s hrubšími zrnny. Docházelo-li by ovšem vlivem velikosti řezných sil, které mají silnou spojitost s velikostí vzniklého tepla, k nárůstu tepla, bylo by nutné pro snížení tepla použít naopak kotouč s jemnějšími zrnny.

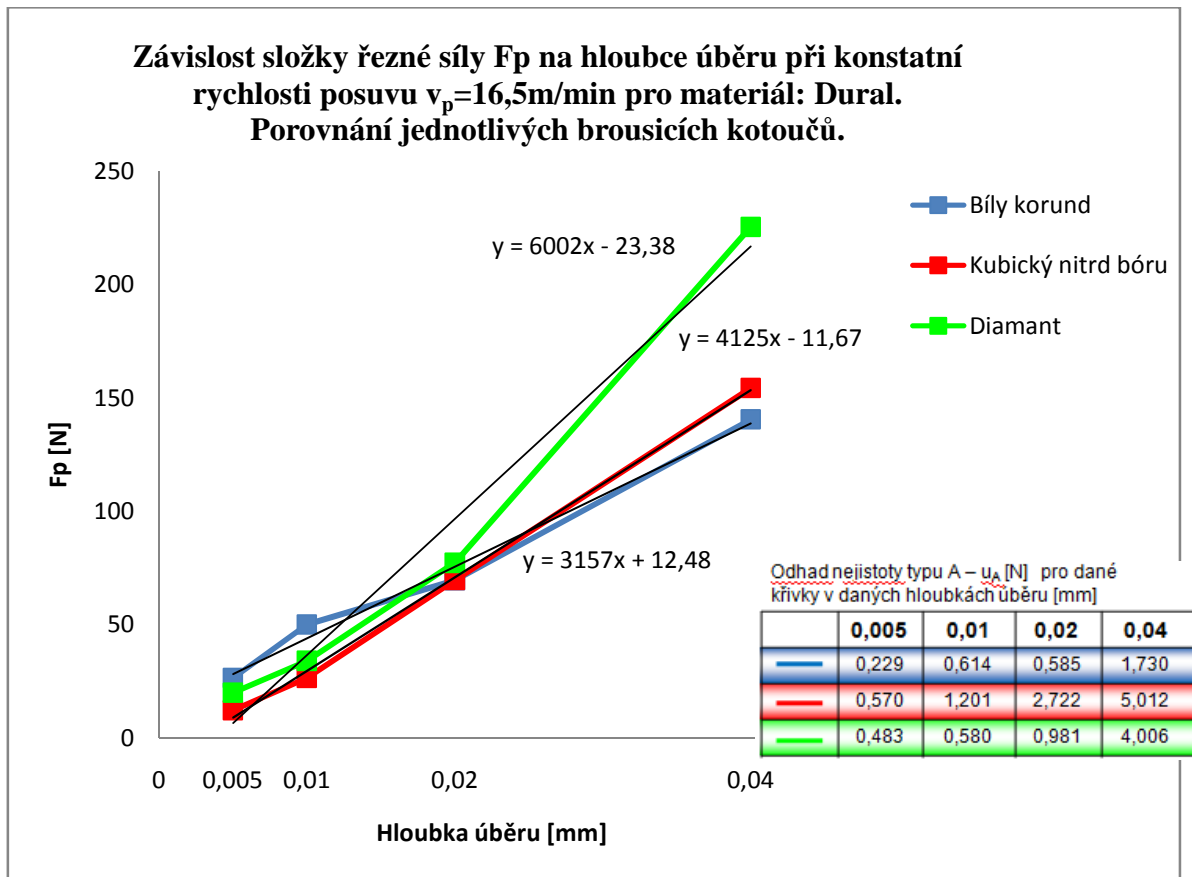
9.5 Materiál: Dural

9.5.1 Vyhodnocení řezné síly F_p při změně posuvové rychlosti

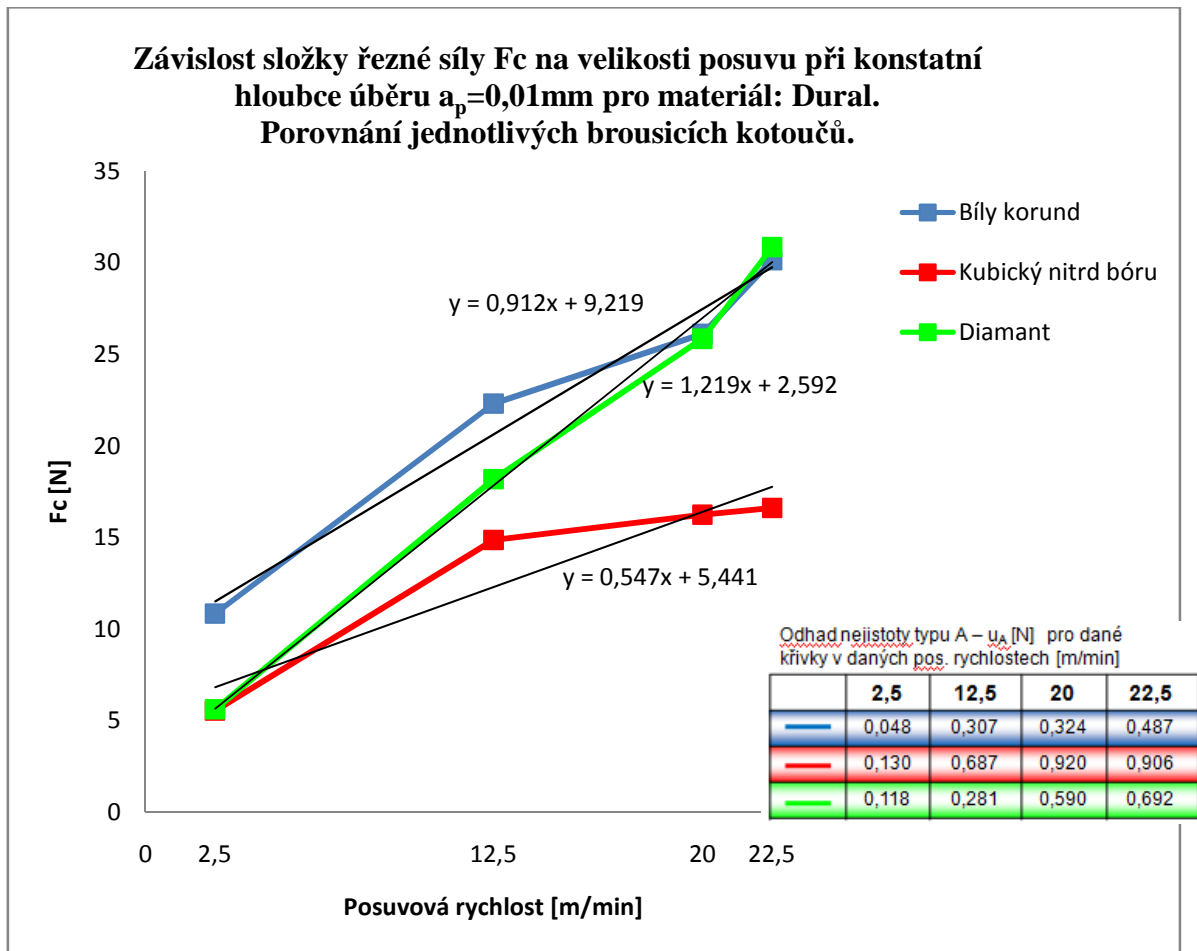


Obr. 33. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál Dural

Řezná síla F_p se u materiálu Dural zvyšovala s rostoucí posuvovou rychlostí. Nejnižších hodnot dosahoval u tohoto materiálu kotouč se zrný z kubického nitridu bóru a diamantu. Nejvyšších hodnot dosáhl kotouč se zrný z bílého korundu. Pro tento materiál je tedy z pohledu velikosti radiální řezné síly F_p i při vyšších posuvových rychlostech a relativně nízké hloubce úběru $a_p=0,01\text{mm}$ lépe použít brousicí kotouče se zrný z tvrdších materiálů. Dural, který má nižší tvrdost a pevnost nežli ocelové materiály, dosahoval také nižších hodnot složek řezných sil. Při vysokých posuvových rychlostech jako je $v_p=22,5\text{m/min}$ je lépe použít kotouče s hrubším zrnem. Materiál dural nevykazoval po broušení příliš dobrých jakostí povrchu. Toto bylo zapříčiněno nedefinovanou špatně oddělitelnou třískou, která byla v určitých místech vtlačována do materiálu zpět a v určitých místech způsobovala vznik rýh na povrchu. Tento materiál by bylo tedy nutné brousit následným broušením s vyjiskřováním.

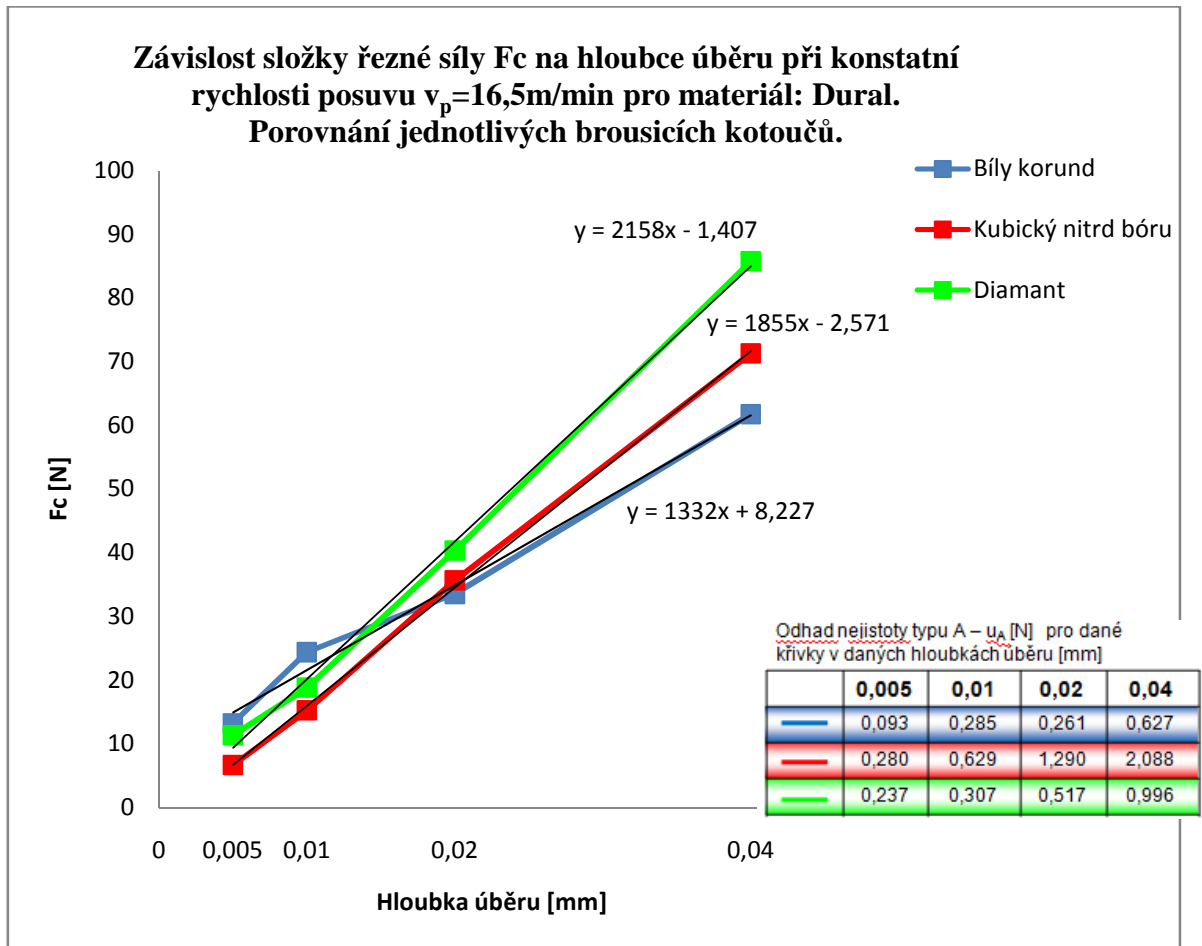
9.5.2 Vyhodnocení řezné síly F_p při změně hloubky úběruObr. 34. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál Dural

Při změně hloubky úběru při broušení materiálu duralu lze z Obr. 34. vidět, že při nižších hloubkách úběru byly hodnoty radiální složky řezné síly F_p u všech brousicích kotoučů podobné. U nejvyšší hloubky úběru ($a_p=0,04$ mm) složky řezné síly F_p u brousicích kotoučů z tvrdších materiálů (převážně diamant) více rostly na rozdíl od brousicího kotouče se zrnky z bílého korundu. U takto velkých hloubek úběru je tedy lépe použít měkkých brousicích kotoučů, jako je bílý korund. Dále lze vidět, že nejmenších hodnot řezných sil bylo dosaženo při malých hloubkách úběru. Nejvyšších hodnot pak bylo zaznamenáno u velké hloubky úběru $a_p=0,04$ mm. Lze tedy říct, že se vzrůstající hloubkou úběru roste i radiální složka řezné síly F_p . U materiálu Duralu nedocházelo k tak razantním nárůstům tepla vzniklého při broušení jako u kalených ocelových materiálů. Není zde proto, ani tak velké riziko změn mechanických vlastností vlivem tepla, jako u ocelových materiálů. V případě nutnosti snížení vzniklého tepla, které úzce souvisí s velikostí řezných sil, by bylo lépe použít brousicí kotouč s jemnějšími zrnky.

9.5.3 Vyhodnocení řezné síly F_c při změně posuvové rychlostiObr. 35. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál Dural

Nejvyšších hodnot tangenciální složky řezné síly F_c bylo zaznamenáno u všech brousících kotoučů při nejvyšší rychlosti posuvu $v_p=22,5$ m/min. Tangenciální složka řezné síly při broušení tohoto materiálu při snižování rychlosti posuvu klesala. Nejvyšších hodnot tangenciální složky řezné síly F_c bylo zaznamenáno u kotouče se zrnny z bílého korundu. Brousící kotouč se zrnny z kubického nitridu bóru pak dosahoval hodnot nejnižších. Tato skutečnost již byla zaznamenána i u ocelových materiálů. Při vyšších rychlostech posuvu dosahoval kubický nitrid bóru nejlepších výsledků i u radiální složky řezné síly, následovaný brousícím kotoučem z diamantu. Lze tedy říci, že z hlediska řezných sil se pro tento materiál při vysokých rychlostech posuvu uplatňují lépe brousící kotouče z tvrdých materiálů. Pro vysoké posuvové rychlosti je lépe využít brousících kotoučů s hrubším zrnem. Při nutnosti snížit z určitých důvodů teplo vzniklé při broušení je naopak nutné použít jemnější brousící kotouče.

9.5.4 Vyhodnocení řezné síly F_c při změně hloubky úběru

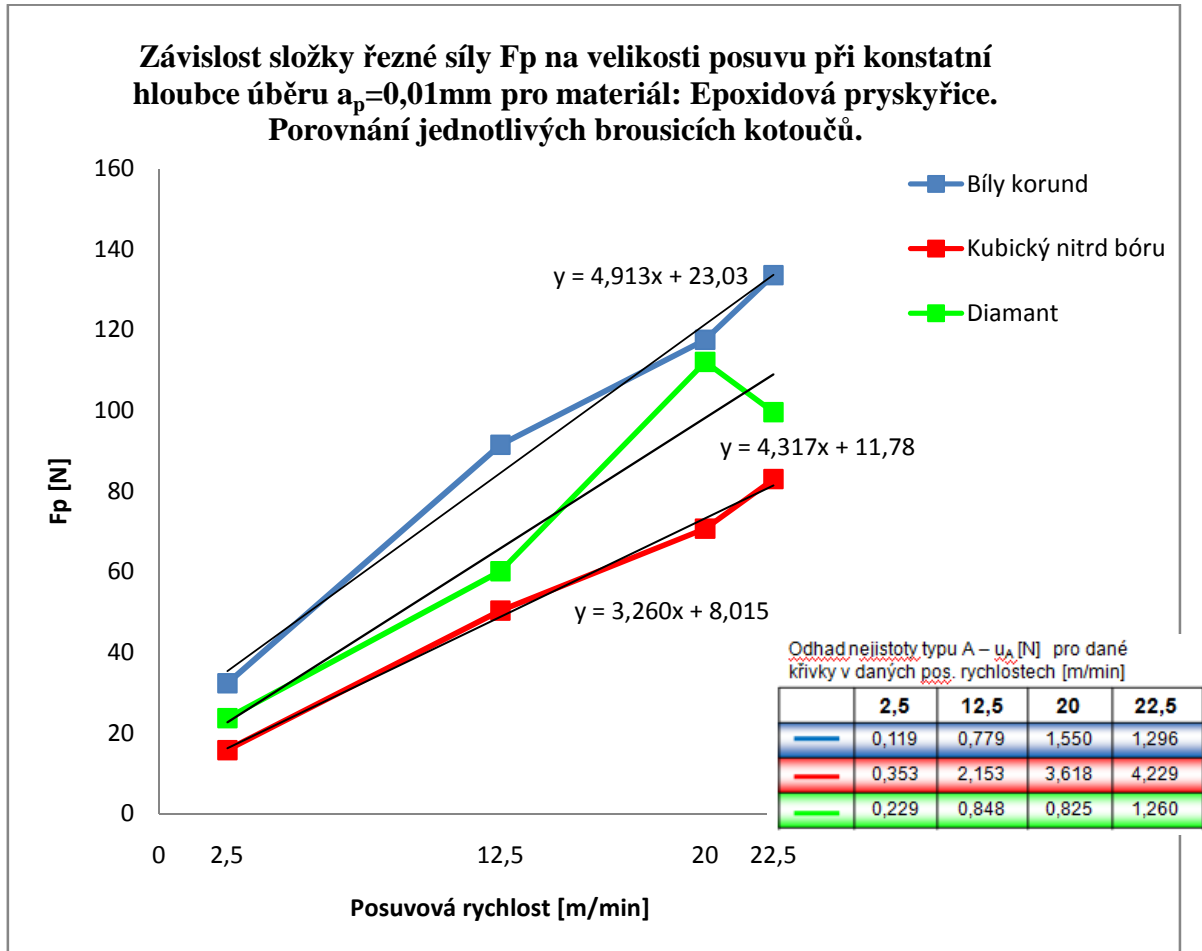


Obr. 36. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál Dural

Materiál dural je oproti materiálům ocelovým méně tvrdý a proto i hodnoty řezných sil byly u tohoto materiálu zaznamenány nižší. I z tohoto grafu pozorovat již dříve zmiňovanou zákonitost, že s rostoucí hloubkou úběru roste tangenciální složka řezné síly F_c . Nejvyšší hodnoty u tangenciální složky řezné síly bylo při změně hloubky úběru zaznamenáno u diamantu a následně kubického nitridu bóru. Tato skutečnost platí především pro velkou hloubku úběru $a_p=0,04$ mm. Při ostatních hloubkách úběru dosahovaly všechny tři brousící kotouče podobných hodnot. Lze tedy říci, že při velkých hloubkách úběru při broušení tohoto materiálu je lépe použít měkčí kotouč, jako je kotouč se zrní z bílého korundu. Při vyšších hloubkách úběru měla vliv na hodnotu řezných sil i velikost kmitání při broušení, zvláště při nejvyšší hloubce úběru $a_p=0,04\text{mm}$.

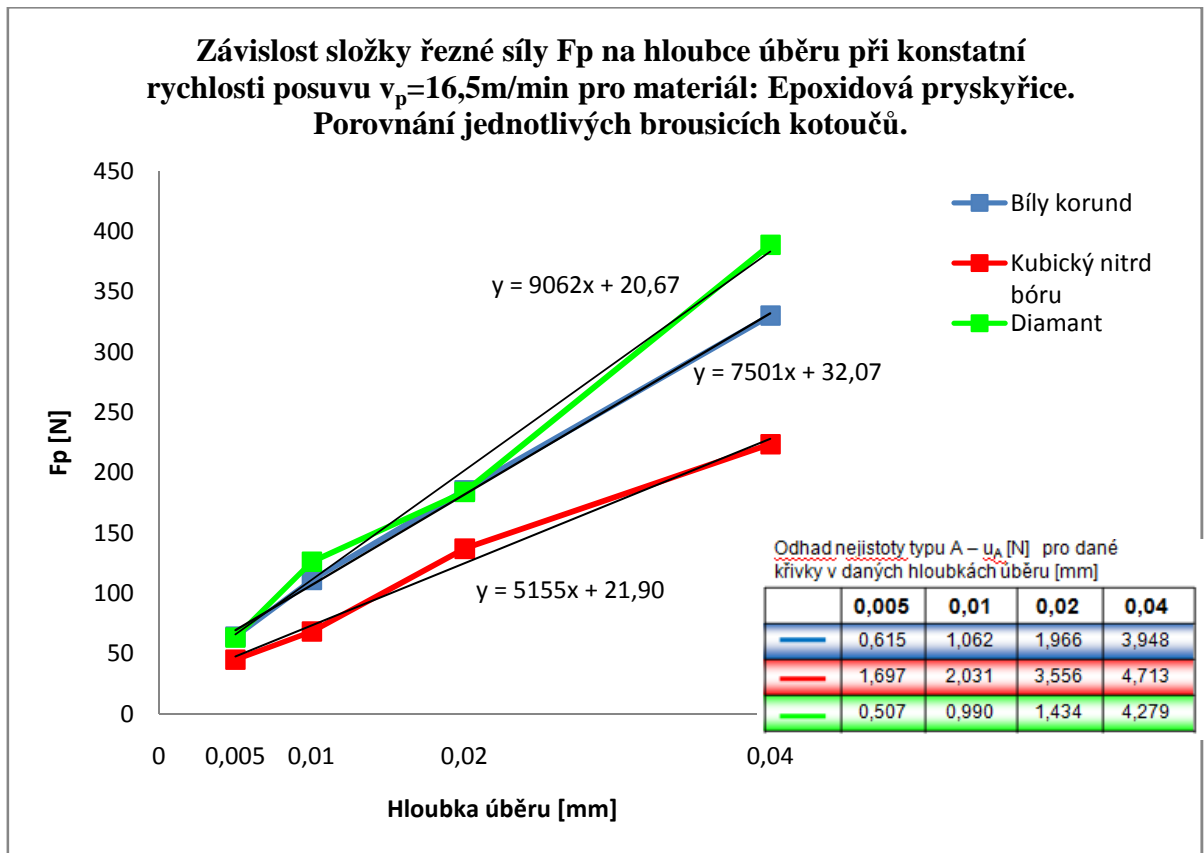
9.6 Materiál: Epoxidová pryskyřice

9.6.1 Vyhodnocení řezné síly F_p při změně posuvové rychlosti

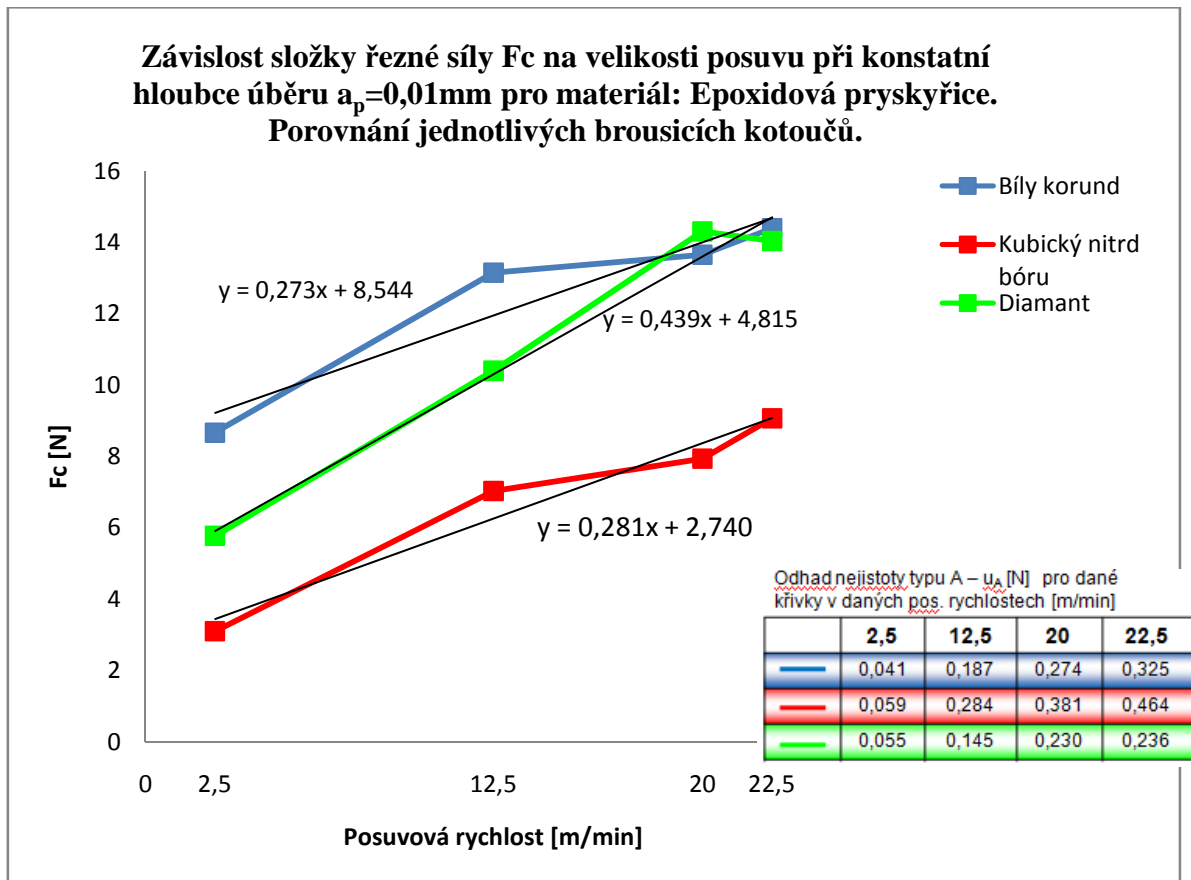


Obr. 37. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál Epoxidová pryskyřice

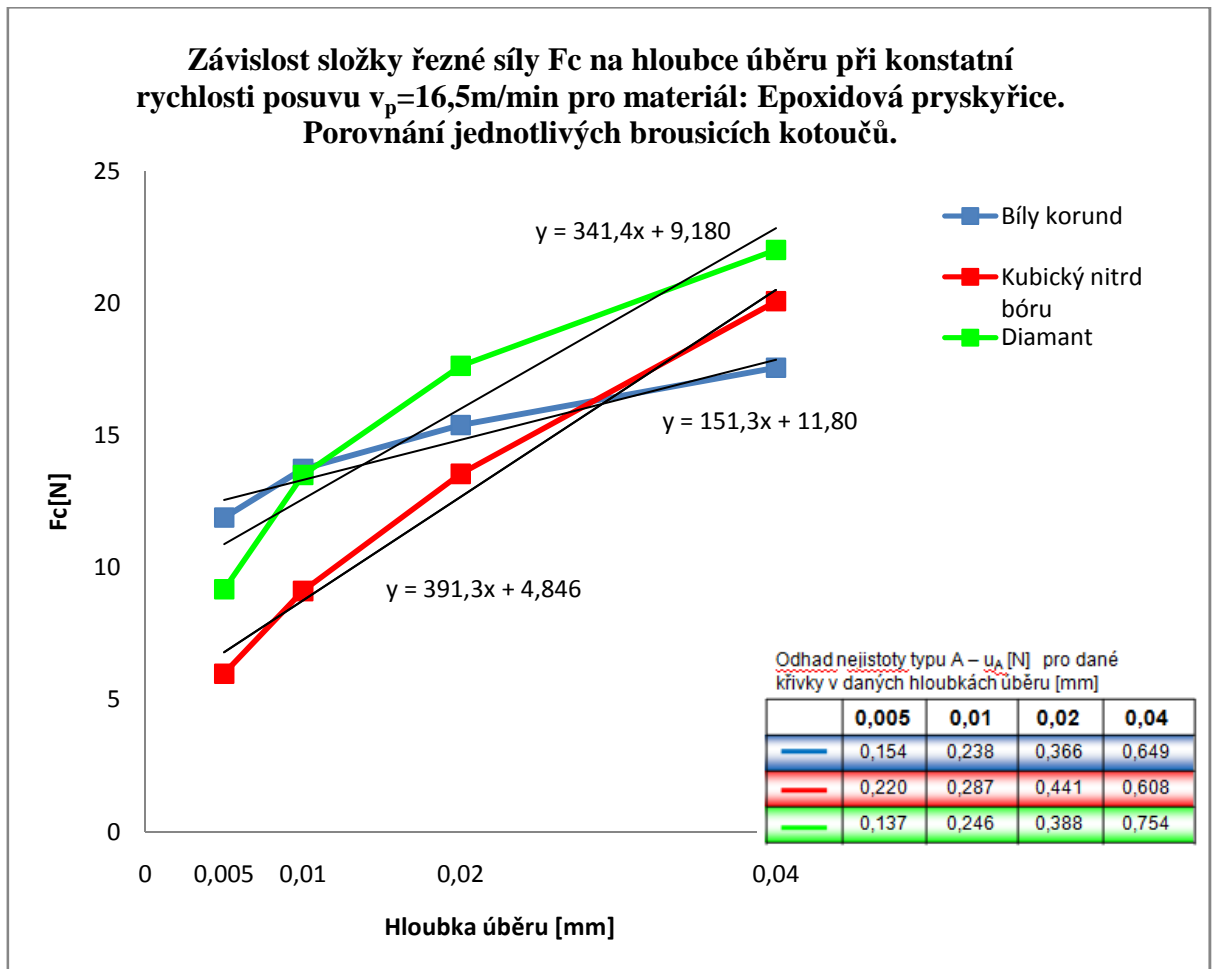
Podobně jako u předchozích materiálů i u epoxidové pryskyřice dosahoval nejvyšších hodnot řezných sil F_p při změně posuvové rychlosti za konstantní hloubky úběru brousící kotouč se zrný bílého korundu. Nižších hodnot řezných sil F_p bylo dosaženo u tvrdších brousících materiálů (kubický nitrid bóru, diamant). Nejnižší radiální složky řezné síly F_p bylo dosaženo při nízké posuvové rychlosti $v_p=2,5$ m/min. S rostoucí posuvovou rychlostí pak řezné síly rostly. U diamantu došlo při nejvyšší posuvové rychlosti $v_p=22,5$ m/min k poklesu. Tato skutečnost může být zapříčiněna chybou měření a následným statistickým vyhodnocením, jelikož posuvové rychlosti 20 m/min a 22,5 m/min vykazovaly podobné velikosti složky řezné síly F_p . Až na tuto skutečnost i u tohoto materiálu platí zákonitost, že s rostoucí posuvovou rychlostí roste i velikost radiální složky řezné síly F_p .

9.6.2 Vyhodnocení řezné síly F_p při změně hloubky úběruObr. 38. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál Epoxidová pryskyřice

Z Obr. 38. lze vidět, že pro epoxidovou pryskyřici vyšly hodnoty složky řezné síly F_p nejnižší pro brousící kotouč se zrní kubického nitridu bóru. Naopak nejvyšší řezné síly dosahuje kotouč diamantový. Tato skutečnost je zapříčiněna především tvrdostí kotouče. Pokud bychom chtěli dosáhnout při velkých hloubkách úběru nižších hodnot složky řezné síly F_p , bylo by nutno použít hrubší kotouče. Epoxidová pryskyřice se využívá ve vstřikovacích formách jako izolace. Má tedy nízký součinitel přestupu tepla a nevede příliš dobře teplo, a proto ani zkušební vzorek nebyl po broušení zahřát na takovou teplotu jako vzorky ocelové. Je tedy vhodné při tak vysokých hloubkách úběru jako je $a_p=0,04\text{mm}$ použít kotouč s hrubšími zrní. Při nutnosti snížení vzniklého tepla by bylo nutné použít jemnější brousící kotouč. Z grafu lze dále vidět, že s rostoucí hloubkou úběru se u všech brousících kotoučů zvyšuje i složka řezné síly F_p .

9.6.3 Vyhodnocení řezné síly F_c při změně posuvové rychlostiObr. 39. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál Epoxidová pryskyřice

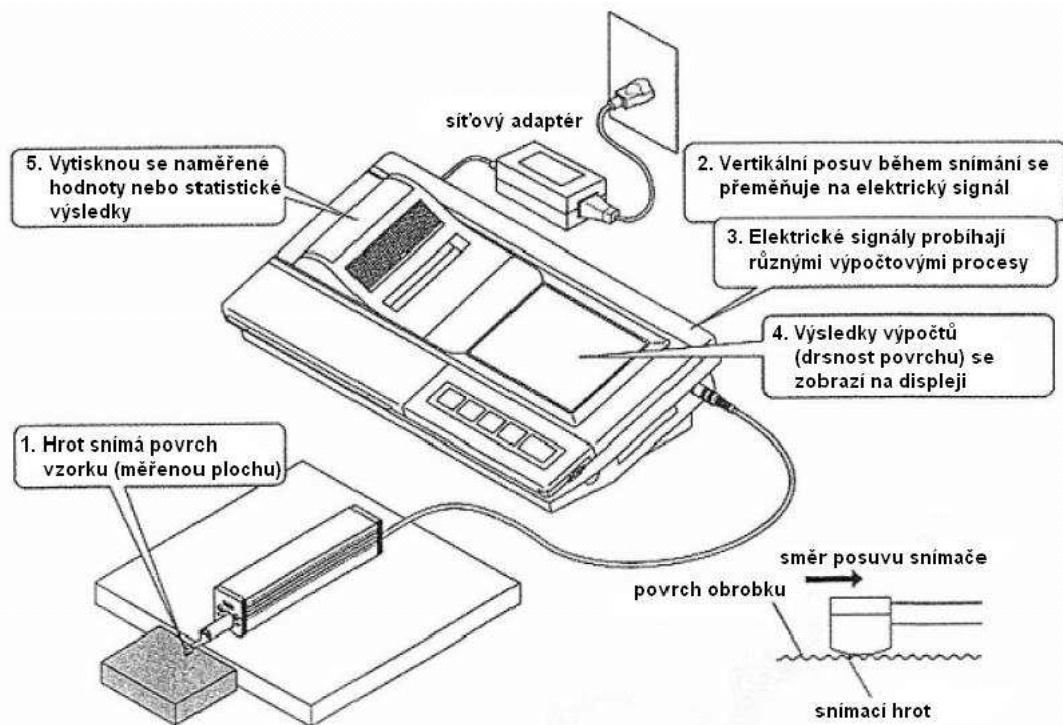
Materiál epoxidová pryskyřice má výrazně menší tvrdost a pevnost oproti materiálům ocelovým, proto byly naměřené složky řezných sil F_p i F_c výrazně nižší než u těchto tvrdých kalených materiálů. Z grafu lze vidět, že nevyšší hodnoty složky řezné síly F_p bylo dosaženo u měkkého kotouče se zrní z bílého korundu. Pro většinu technologických podmínek je proto pro tento méně tvrdý materiál z epoxidové pryskyřice lépe použít kotouče se zrní tvrdých materiálů, jako je diamant či kubický nitrid borů. V tomto případě je rovněž nutné podotknout, že tříška při broušení epoxidové pryskyřice byla z povrchu vzorku špatně odváděna a u všech brousicích kotoučů způsobovala přilnutí či zanešení kotouče malou tříškou, jenž se při broušení na sucho nestihla z povrchu broušeného vzorku odstranit a navalovala se tak na kotouč. Pro přesnější vyhodnocení těchto složek řezných sil by tedy bylo nutné po každém broušení kotouč ohrnovat. Při změně posuvových rychlostí si i u tohoto materiálu lze všimnout, že s rostoucí posuvovou rychlostí roste i velikost složky řezné síly F_c .

9.6.4 Vyhodnocení řezné síly F_c při změně hloubky úběruObr. 40. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál Epoxidová pryskyřice

Při porovnání tangenciální složky řezné síly při změně hloubky úběru a konstantní posuvové rychlosti si lze všimnout, že všechny brousící kotouče mají hodnoty této složky řezné síly podobné. Hodnoty této síly jsou ve srovnání s ocelovými materiály či durallem několikánásobně menší z důvodu nižší tvrdosti. Tato skutečnost zapříčinila i to, že se křivky při takto malých rozdílech ve velikosti této síly překrývají. Nejnižší hodnoty ve většině technologických podmínek u tohoto materiálu dosáhl kubický nitrid bóru. Dalším důvodem překmitu těchto křivek je způsobeno již zmiňovaným zanesením kotouče malými měkkými třískami zahřátými na vysokou teplotu, jenž se při broušení na sucho z místa styku brousícího kotouče a broušeného vzorku nedostatečně odváděly, přilnávaly na brousící kotouče a mohli tak následně ovlivnit statistické vyhodnocení hodnot složky řezné síly pro ostatní technologické podmínky. I zde platí zákonitost, že s rostoucí hloubkou úběru roste i velikost složky řezné síly F_c .

10 VYHODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU

Jakost povrchu byla vyhodnocována po broušení u všech broušených materiálů, všemi broušícími kotouči a také všemi již dříve zmíněnými technologickými podmínkami. Z důvodu statistického vyhodnocení jakosti povrchu byly všechny parametry jakosti povrchu měřeny nejméně pětkrát. Pro vyhodnocování jakosti povrchu byl použit přístroj MITUTOYO SJ-301. Tento přístroj je vhodný pro použití měření jakosti povrchu v dílenském prostředí. Snímací hrot přístroje zaznamenává i nejjemnější nepravidelnosti povrchu vzorku. Jakost se vypočítá z vertikálního posuvu snímacího hrotu, ke kterému dochází, když snímací hrot přejíždí přes nepravidelnosti povrchu. Výsledky měření se zobrazí digitálně i graficky na speciální dotekové ovládací obrazovce a pomocí integrované tiskárny lze tyto výsledky vytisknout.

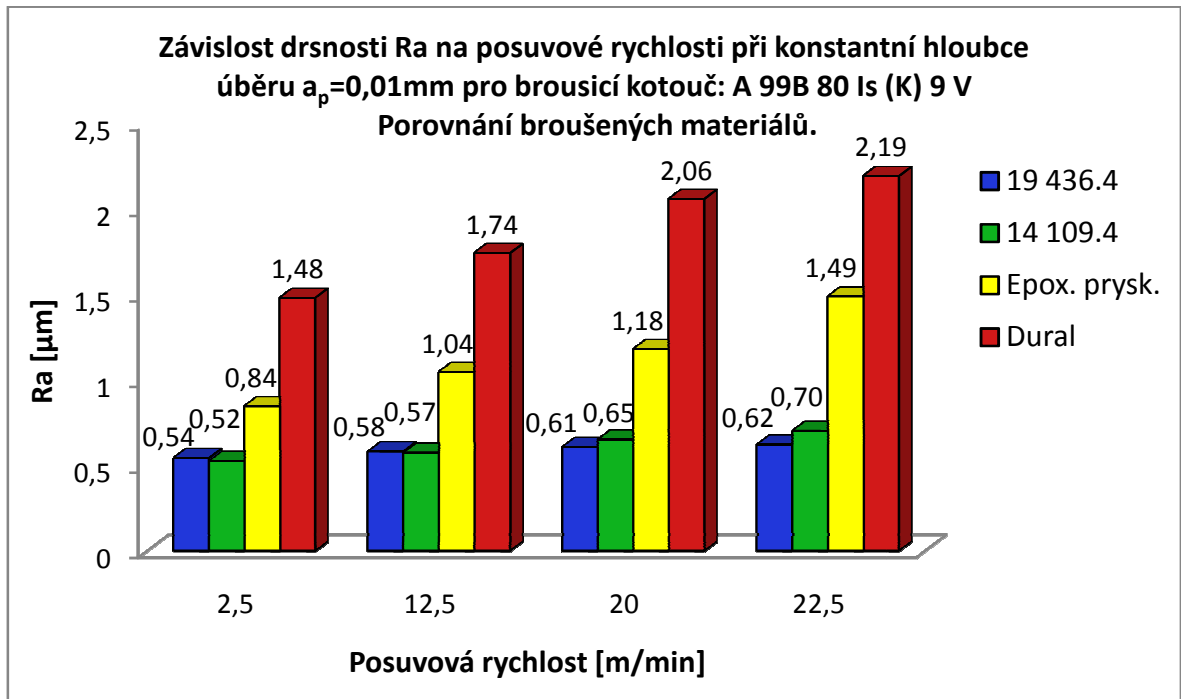


Obr. 41. Schéma přístroje Mitutoyo SJ-301

Měření jakosti povrchu bylo měřeno po broušení danými technologickými podmínkami bez následného broušení s vyjiskřováním. Naměřené hodnoty jakosti povrchu jsou tedy poněkud vyšší než by bylo schopno dosáhnout po následném broušení s vyjiskřováním. Při broušení nebyla též použita žádná procesní kapalina a jakost se tedy vyhodnocovala po broušení na sucho.

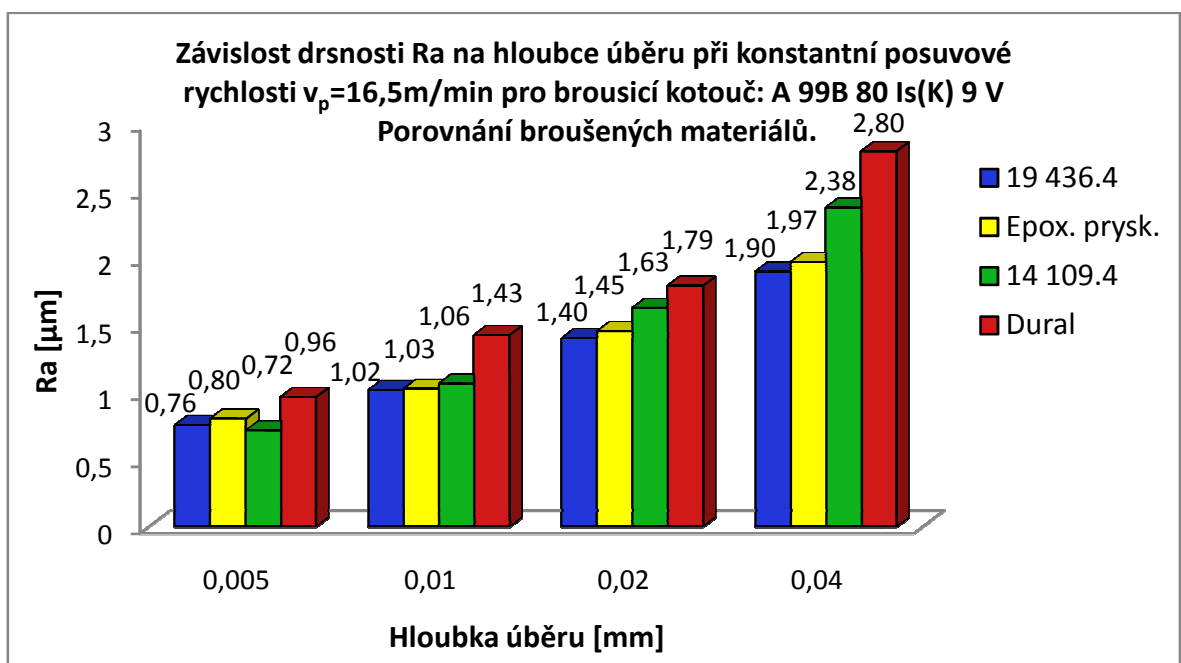
10.1 Brousicí kotouč A 99B 80 Is(K) 9 V

10.1.1 Drsnost Ra při změně posuvové rychlosti



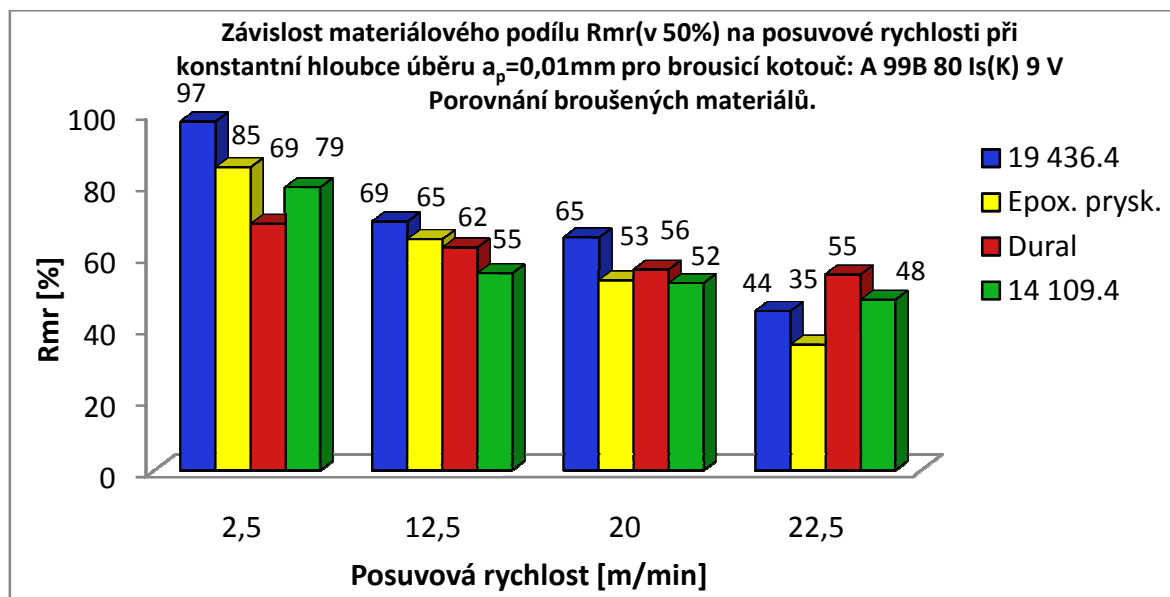
Obr. 42. Vyhodnocení drsnosti Ra – kotouč A 99B 80 Is(K) 9 V

10.1.2 Drsnost Ra při změně hloubky úběru



Obr. 43. Vyhodnocení drsnosti Ra – kotouč A 99B 80 Is(K) 9 V

10.1.3 Materiálový podíl Rmr při změně posuvové rychlosti



Obr. 44. Vyhodnocení materiálového podílu Rmr – kotouč A 99B 80 Is(K) 9 V

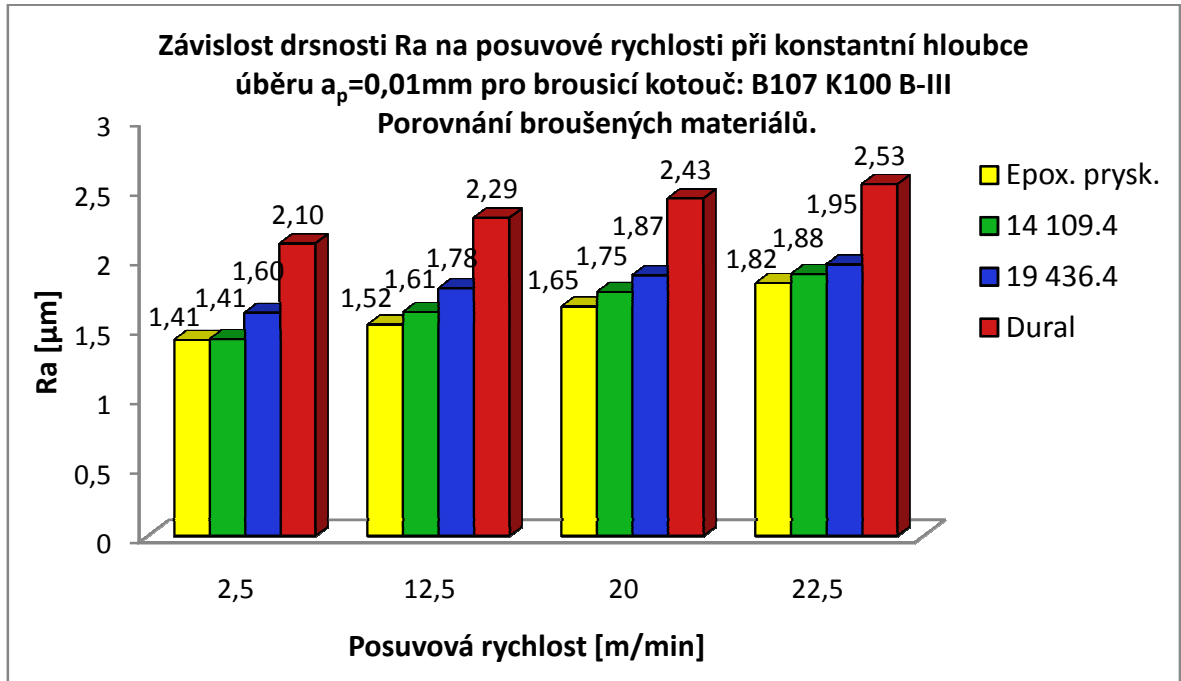
Z Obr. 42. lze vidět, že při změně posuvové rychlosti při broušení brousícím kotoučem A 99B 100 Is(K) 9 V bylo nejnižších hodnot drsnosti R_a dosaženo u ocelových materiálů. Drsnost materiálu dural byla naměřena po broušení těmito technologickými podmínkami vysoká. Lepší jakosti povrchu u tohoto i ostatních materiálu by bylo možné dosáhnout při následném broušení s vyjiskřováním. Všechny hodnoty drsností R_a u všech broušených materiálů se při zvyšující posuvové rychlosti zvyšovaly a jakost povrchu se tedy zhoršovala. Takový trend nárůstu hodnot bylo zaznamenáno i při vyhodnocení drsnosti R_z i R_t , jež jsou vyobrazeny v příloze. Z hlediska co nejlepší jakosti povrchu je tedy lépe kterýkoliv z broušených materiálů, brousit nižší posuvovou rychlostí

Při broušení se změnou hloubky úběru bylo zaznamenáno, že nejvyšších hodnot drsností R_a dosahuje opět materiál Dural. Při rychlosti posuvu $v_p=16,5$ m/min bylo dosaženo nejlepší jakosti povrchu u nejmenší hloubky úběru $a_p=0,005$ mm. Se zvyšující se hloubkou úběru se drsnost R_a zvyšovala u všech materiálů. Lze tedy říct, že s větší hloubkou úběru se drsnost R_a (R_z i R_t vyobrazené v příloze) zvyšuje a jakost povrchu se tedy zhoršuje. Pro dosažení co nejlepší jakosti povrchu je proto vhodné brousit malou hloubkou úběru.

Materiálový podíl byl měřen v 50% hloubky profilu a z Obr. 44. Lze vidět, že se zvyšující se rychlostí posuvu materiálový podíl v dané hloubce u všech materiálů klesal. Z hlediska životnosti dílů či výrobků v praxi je důležité mít materiálový podíl co nejvyšší. Proto je výhodné z hlediska životnosti brousit nižšími posuvovými rychlostmi.

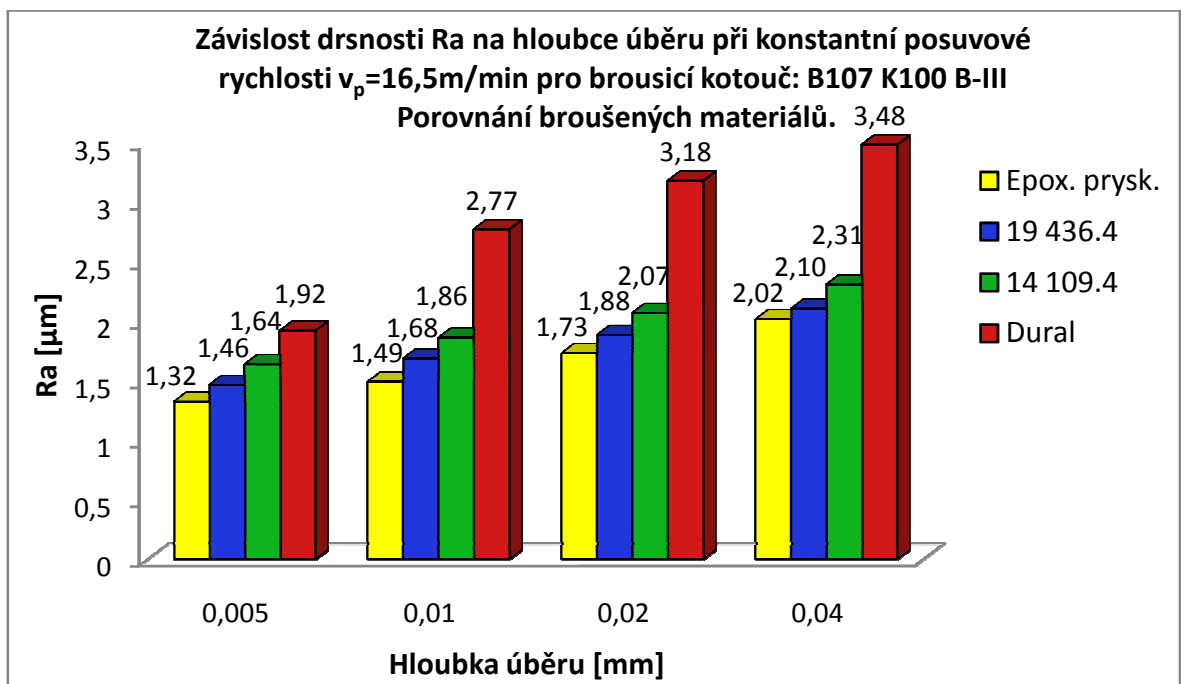
10.2 Brousicí kotouč B107 K 100 B-II

10.2.1 Drsnost Ra při změně posuvové rychlosti



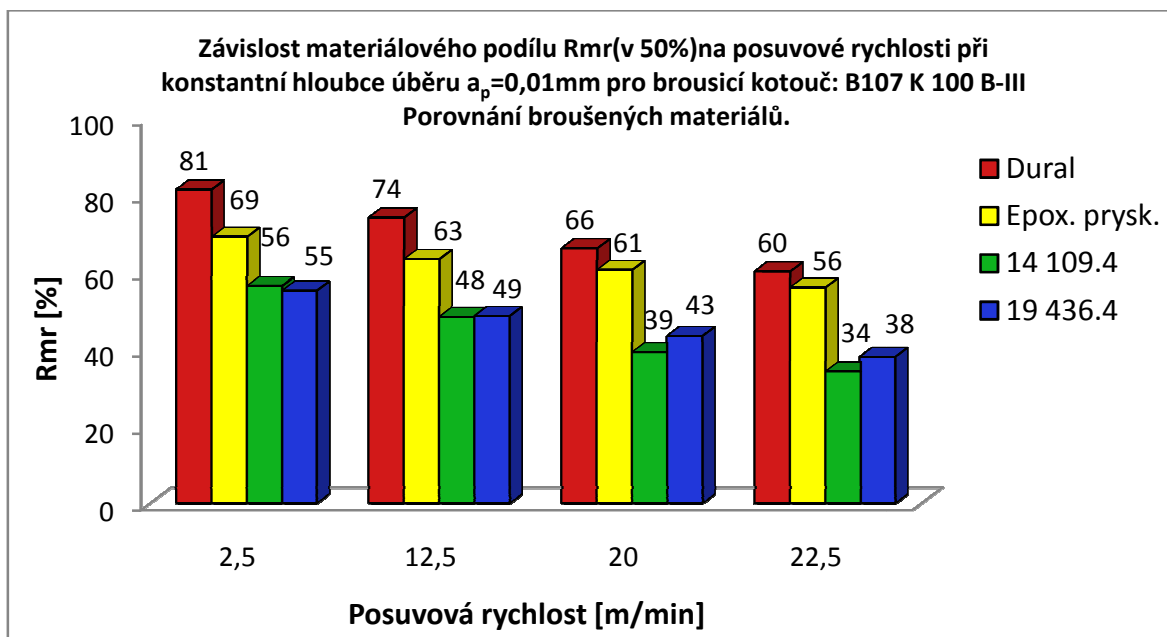
Obr. 45. Vyhodnocení drsnosti Ra – kotouč B107 K100 B-III

10.2.2 Drsnost Ra při změně hloubky úběru



Obr. 46. Vyhodnocení drsnosti Ra – kotouč B107 K100 B-III

10.2.3 Materiálový podíl Rmr při změně posuvové rychlosti



Obr. 47. Vyhodnocení materiálového podílu Rmr – kotouč B107 K100 B-III

Hodnoty drsnosti R_a při broušení kotoučem se zrný z kubického nitridu bóru byly v porovnání s kotouči z bílého korundu a diamantu poněkud vyšší. Tato skutečnost ukazuje, že tento kotouč B107 K100 B-III není z pohledu jakosti povrchu příliš vhodný pro broušení ocelových materiálů. Naměřené hodnoty jsou ovšem měřeny po broušení bez vyjiskřování, proto by se dala jakost povrchu podstatně zlepšit při přebroušení vzorku (výrobku) s vyjiskřováním.

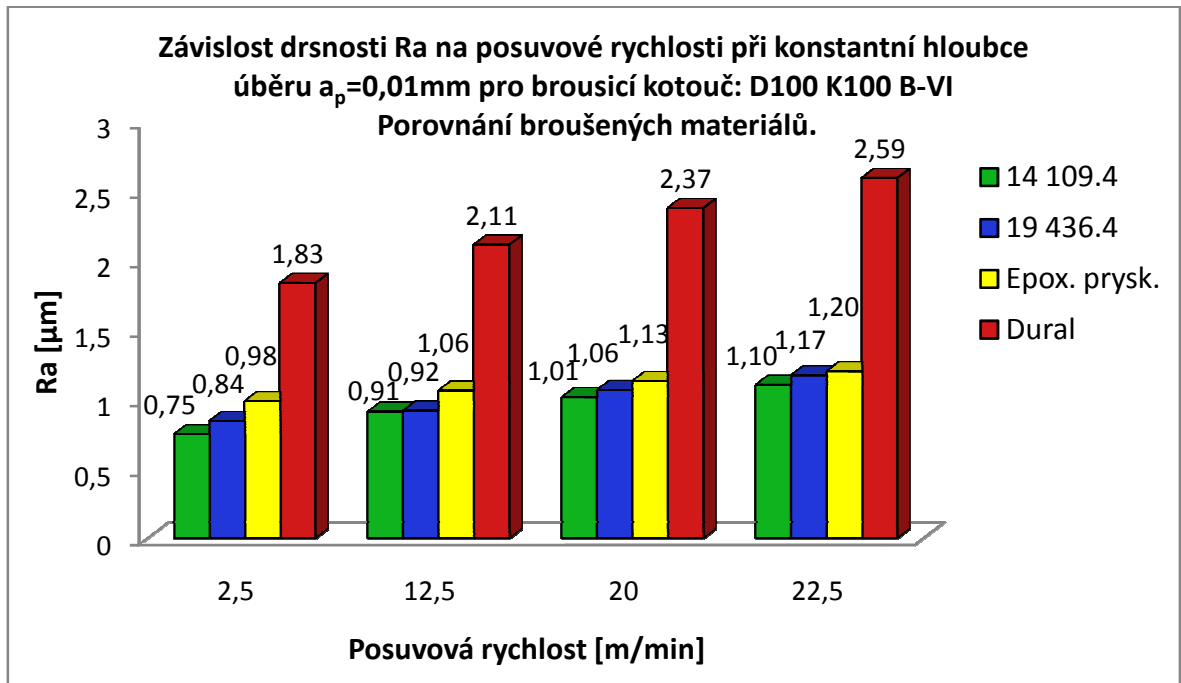
Při změně posuvové rychlosti dosahovala nejlepších jakostí povrchu epoxidová pryskyřice. Podobné hodnoty vykazovaly i ocelové materiály. Nejhorších hodnot bylo dosaženo u duralu. Lze tedy říct, že kotouč se zrný z kubického nitridu bóru se prokázal jako dobrý pro broušení epoxidové pryskyřice. S rostoucí posuvovou rychlostí se i zde velikost drsnosti R_a zvyšovala a jakost tedy zhoršovala.

Z Obr. 46. lze vidět, že se drsnost R_a zvyšuje se zvyšující hloubkou úběru. Se zvyšující se hloubkou úběru při broušení se tedy jakost zhoršuje. Toto potvrzují i naměřené hodnoty R_z a R_t , jež jsou přiloženy v příloze. Nejlepších hodnot zde opět dosahuje epoxidová pryskyřice, kterou těsně následují ocelové materiály.

I u tohoto kotouče se ze zvyšující se posuvovou rychlostí snižuje materiálový podíl u všech broušených materiálů. Je proto z hlediska životnosti dílů lépe brousit nízkou posuvovou rychlostí, pro dosažení co nejvyššího procenta materiálového podílu v dané hloubce.

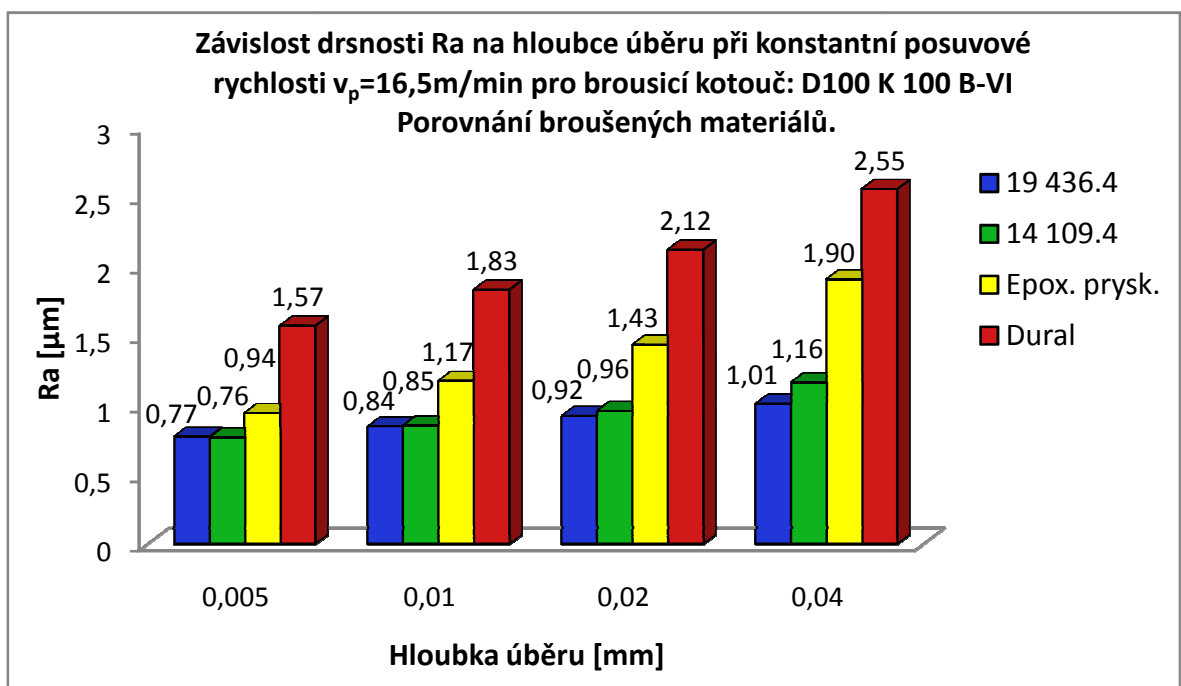
10.3 Brousicí kotouč D100 K100 B-VI

10.3.1 Drsnost Ra při změně posuvové rychlosti



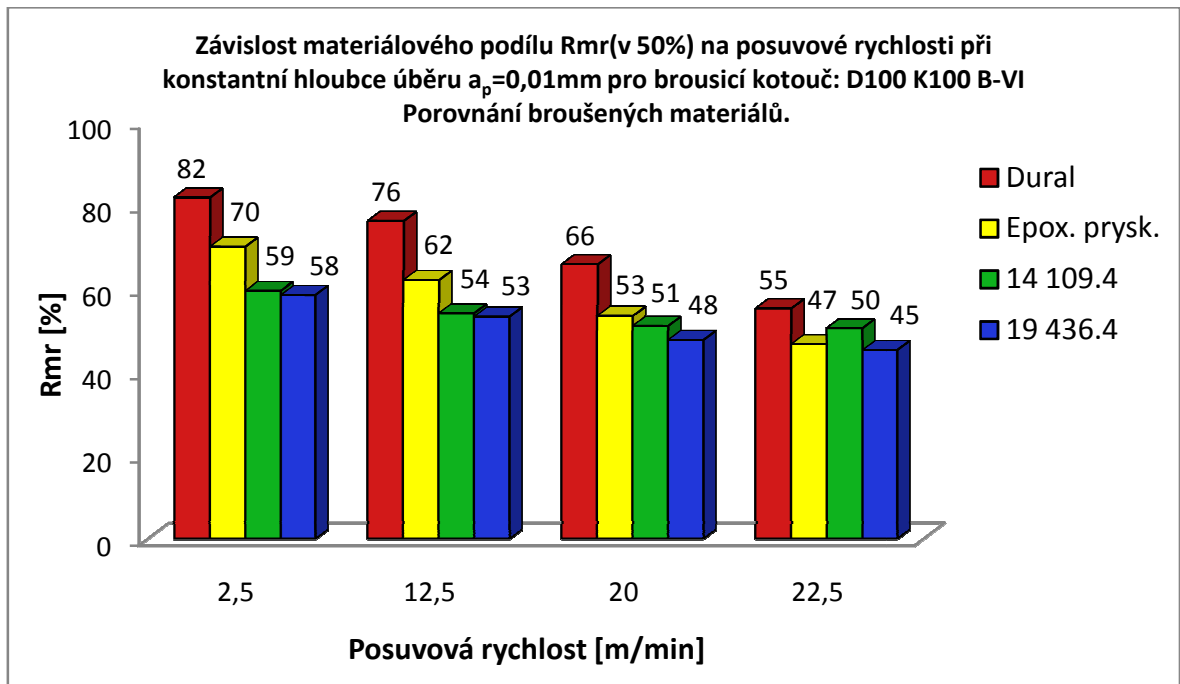
Obr. 48. Vyhodnocení drsnosti Ra – kotouč D100 K100 B-VI

10.3.2 Drsnost Ra při změně hloubky úběru



Obr. 49. Vyhodnocení drsnosti Ra – kotouč D100 K100 B-VI

10.3.3 Materiálový podíl Rmr při změně posuvové rychlosti



Obr. 50. Vyhodnocení materiálového podílu Rmr – kotouč D100 K100 B-VI

Drsnosti u kotouče se zrný z diamantu vyšly ve většině technologických podmínek podobně jako u kotouče se zrný bílého korundu. I u tohoto kotouče by se lepší jakosti povrchu dosáhlo při broušení s vyjiskřováním.

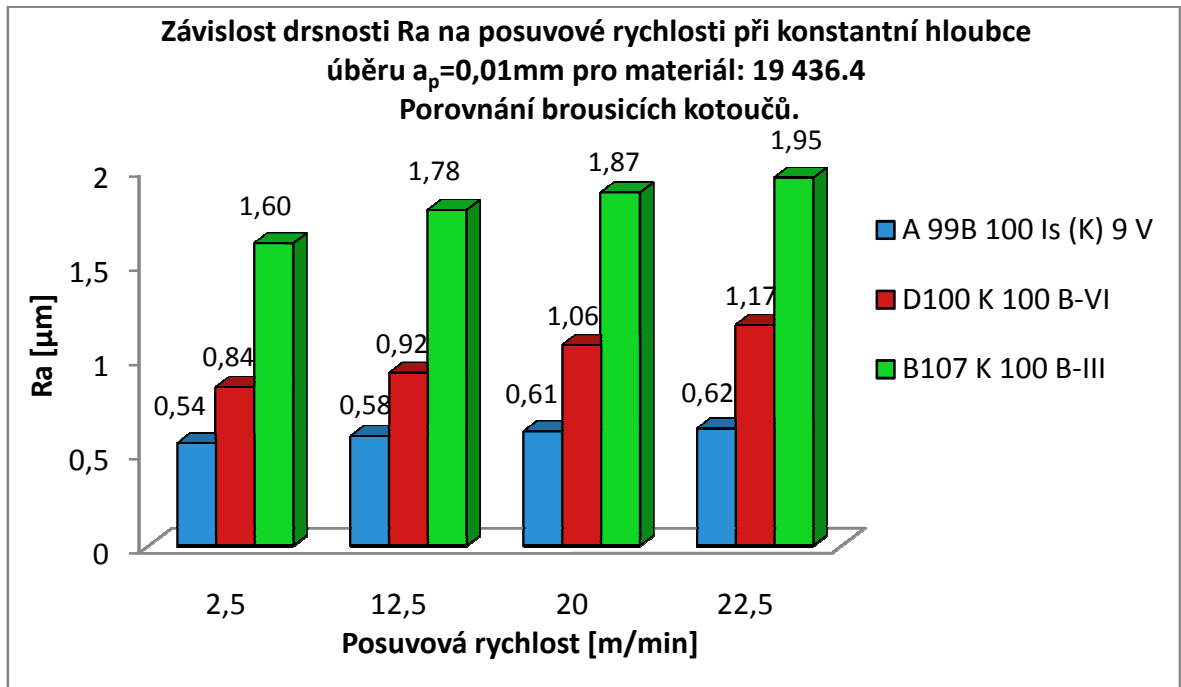
Při konstantní hloubce úběru $a_p=0,01$ mm a změně posuvových rychlostech bylo nejlepších hodnot drsnosti R_a dosaženo u ocelových materiálů. Epoxidová pryskyřice po broušení diamantovým kotoučem dosahovala o něco horší jakost povrchu než ocelové materiály. Materiál dural má jakost povrchů ze všech broušených materiálů nejhorší. Tento materiál by bylo nutné pro lepší jakost povrchu brousit s vyjiskřováním. Nejlepší výsledky jsou u všech materiálů dosaženy u nejnižší posuvové rychlosti. Se zvyšující se posuvovou rychlostí se drsnosti R_a (R_z i R_t v příloze) zvyšovaly a jakost povrchu se tedy zhoršovala.

Podobné výsledky byly naměřeny i při konstantní rychlosti a změně hloubky úběru. Nejlepších drsností a tedy jakosti povrchu bylo naměřeno po broušení diamantem u materiálů ocelových. Nejhorší jakost povrchu měl dural. Se vzrůstající hloubkou úběru se hodnoty drsností R_a (R_z i R_t) u všech materiálů zvyšovaly a zhoršovala se tedy jakost povrchu. Pro nejkvalitnější povrch je tedy nejlepší malá hloubka úběru a malá rychlost posuvu.

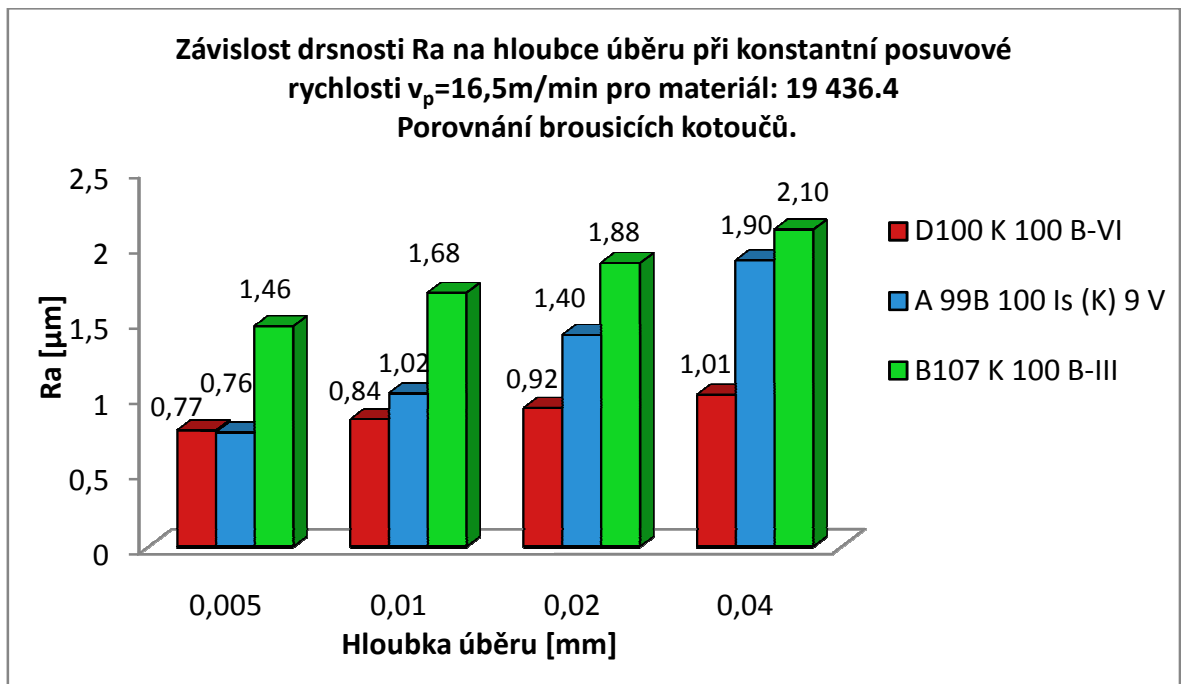
Materiálový podíl i u kotouče z diamantu potvrzuje předchozí tvrzení, že se zvyšující se rychlostí posuvu materiálový podíl v 50% hloubky profilu klesá.

10.4 Porovnání drsnosti Ra mezi jednotlivými brousicími kotouči

10.4.1 Materiál 19 436.4

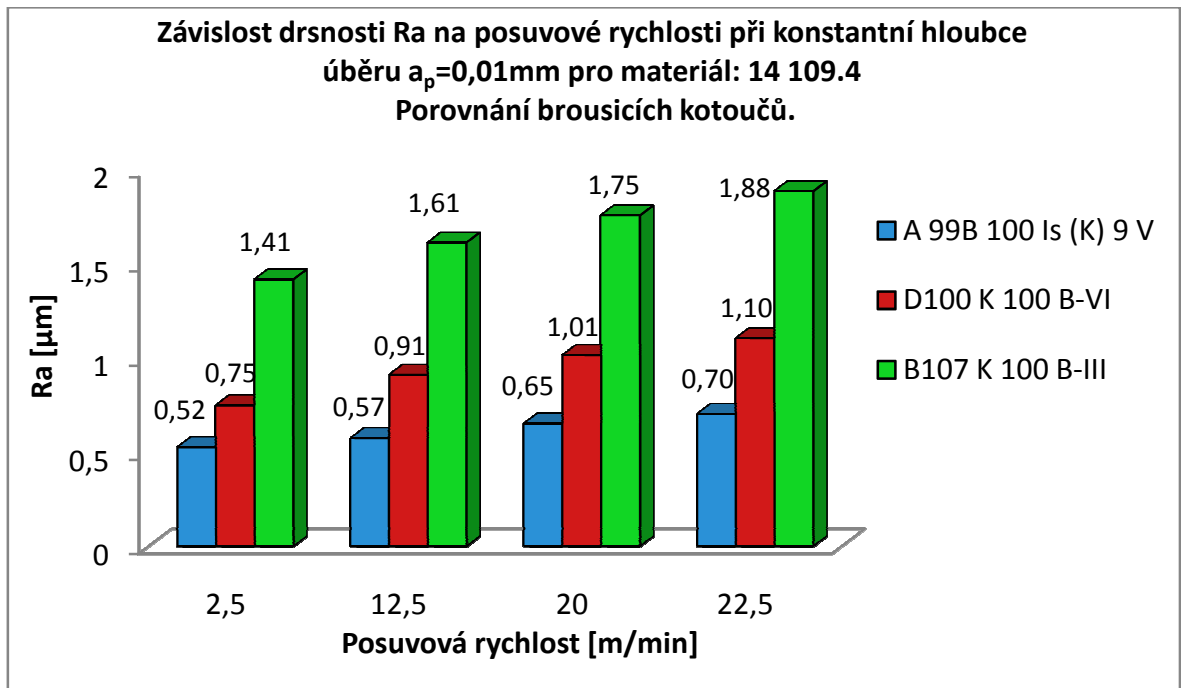


Obr. 51. Porovnání drsnosti Ra mezi brousicími kotouči – materiál 19 436.4

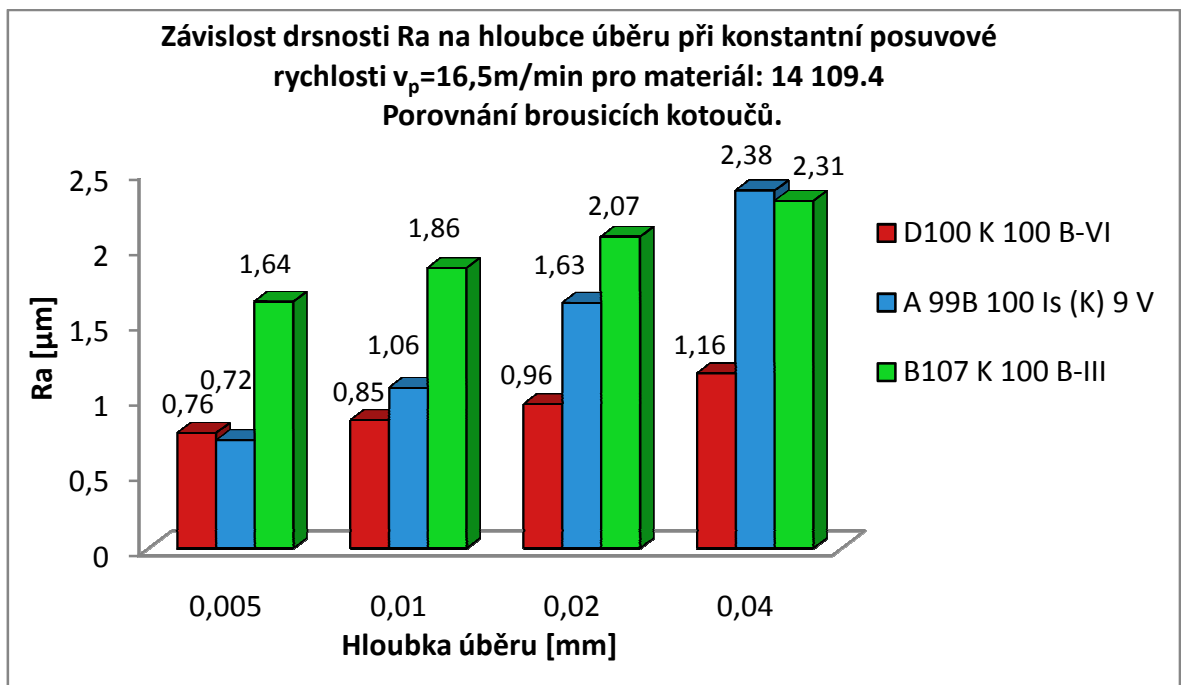


Obr. 52. Porovnání drsnosti Ra mezi brousicími kotouči – materiál 19 436.4

10.4.2 Materiál 14 109.4



Obr. 53. Porovnání drsnosti Ra mezi brousícími kotouči – materiál 14 109.4



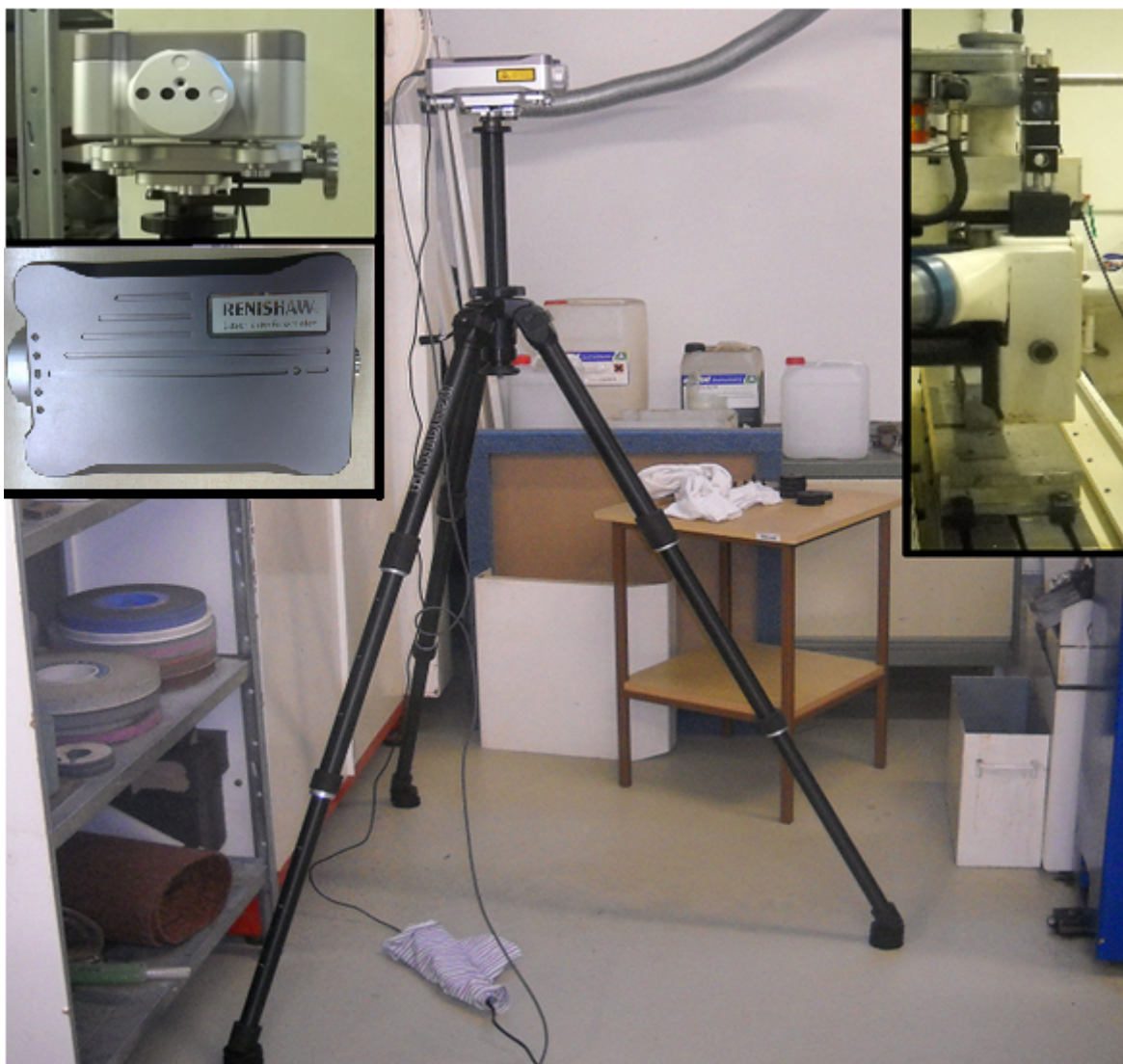
Obr. 54. Porovnání drsnosti Ra mezi brousícími kotouči – materiál 14 109.4

Z grafů závislosti drsnosti Ra na posuvové rychlosti u obou ocelových materiálů, lze vidět, že nejlepších hodnot po broušení dosahoval kotouč se zrný z bílého korundu. Kotouč se zrný bílého korundu je měkký a proto docházelo při broušení k vylamování zrn a samoostření tohoto broušicího kotouče, proto se pro tyto vysoce tvrdé materiály hodí právě tento měkký kotouč z bílého korundu. Nevýhodou u tohoto broušicího kotouče je bohužel vysoké opotřebení při broušení a nutné orovnávání kotouče pro dosažení lepších jakostí povrchu. O něco horší výsledky při změně posuvových rychlostí pak měl kotouč se zrný z diamantu. Tento broušicí kotouč je tvrdý a nedochází u něj k tak razantnímu samoostření jako u zmiňovaného kotouče A 99B 100 Is(K) 9 V, což mělo za následek o něco horší jakost povrchu po broušení. Broušicí kotouč se zrný z kubického nitridu bóru měl jakost povrchu ze všech tří zmiňovaných kotoučů nejhorší. Toto ukazuje na skutečnost, že použitý kotouč B107 K 100 B-III není vhodný pro broušení těchto ocelových materiálů. Naopak srovnatelnou jakost povrchu tento kotouč vykazoval při některých technologických podmínkách u materiálů dural a epoxidové pryskyřice. Tyto grafy jsou přiloženy v příloze. Skutečnost, že tento broušicí kotouč vykazoval horší jakosti lze přiřknout tvaru zrn kubického nitridu bóru, jež jsou oproti diamantu a bílému korundu ostřejší a méně zaoblené. Pro dosažení kvalitnější jakosti povrchu by bylo nutné brousit tímto kotoučem s vyjiskřováním. Při změně hloubek úběru vykazoval nejlepších hodnot kotouč diamantový. Kotouč se zrný z bílého korundu měl jakost povrchu při nižších hloubkách úběru podobnou jako kotouč diamantový. Při vyšších hloubkách úběru se jakost rapidně zhoršovala v porovnání právě s tímto kotoučem. Broušicí kotouč z kubického nitridu bóru měl i při změnách hloubek úběru a konstantní posuvové rychlosti vlastnosti povrchu nejhorší. To jen potvrzuje, že právě tento zvolený kotouč B107 K 100 B-III není nejvhodnější pro broušení těchto ocelových materiálů. Z grafů lze rovněž vidět, že s rostoucí posuvovou rychlostí či hloubkou úběru se jakost povrchu zhoršuje a drsnosti Ra (Rz i Rt) se zvyšují. Pro dosažení nejlepších jakostí povrchu je tedy dobré použít nízkých posuvových rychlostí a malých hloubek úběru. Nutno podotknout, že naměřené hodnoty jakostí povrchu u všech materiálů byly naměřeny pouze po broušení bez vyjiskřování. Pokud by se dále brousil povrch s vyjiskřováním, dosažené hodnoty jakosti povrchu by se zlepšily. Porovnání broušicího kotoučů u materiálu dural a epoxidová pryskyřice měli podobnou zákonitost a jejich grafy jsou vyobrazeny v příloze.

11 VYHODNOCENÍ ZÁVISLOSTI DRSNOSTI NA KMITÁNÍ

Kmitání stroje či nástroje při broušení výrazně ovlivňují celkovou jakost povrchu po broušení. Kmitání stroje (brusky BRH 20.03F) v klidné poloze bylo naměřeno v podstatě zanedbatelné a lze tedy říci, že soustava má pouze určité harmonické vibrace, které jsou spojeny s otáčkami broušicího kotouče. Při broušení byly poté měřeny příčné vibrace při přímém broušení určitého materiálu různými technologickými podmínkami. Tyto podmínky byly stejné jako při vyhodnocování jakosti povrchu či řezných sil a to z důvodu nalezení korelace mezi velikostí kmitání a kvalitou obroběného povrchu.

Příčné kmitání bylo měřeno bezdotykově pomocí laserového přístroje Renishaw XL-80



Obr. 55. Bezdotykový laser Renishaw XL-80

Příčné kmitání bylo měřeno, jak již bylo zmíněno, různými technologickými podmínkami. Tyto podmínky byly shodné s podmínkami broušení, po nichž se následně měřila jakost

povrchu a při nichž byly zároveň měřeny i složky řezných sil F_p , F_c . Technologické podmínky byly dvou druhů. V prvním případě byla ponechána konstantní hloubka úběru $a_p = 0,01\text{ mm}$ a zvyšovala se posuvová rychlost v_p :

- 1) $v_p = 2,5\text{ m/min}$ 2) $v_p = 12,5\text{ m/min}$ 3) $v_p = 20\text{ m/min}$ 4) $v_p = 22,5\text{ m/min}$

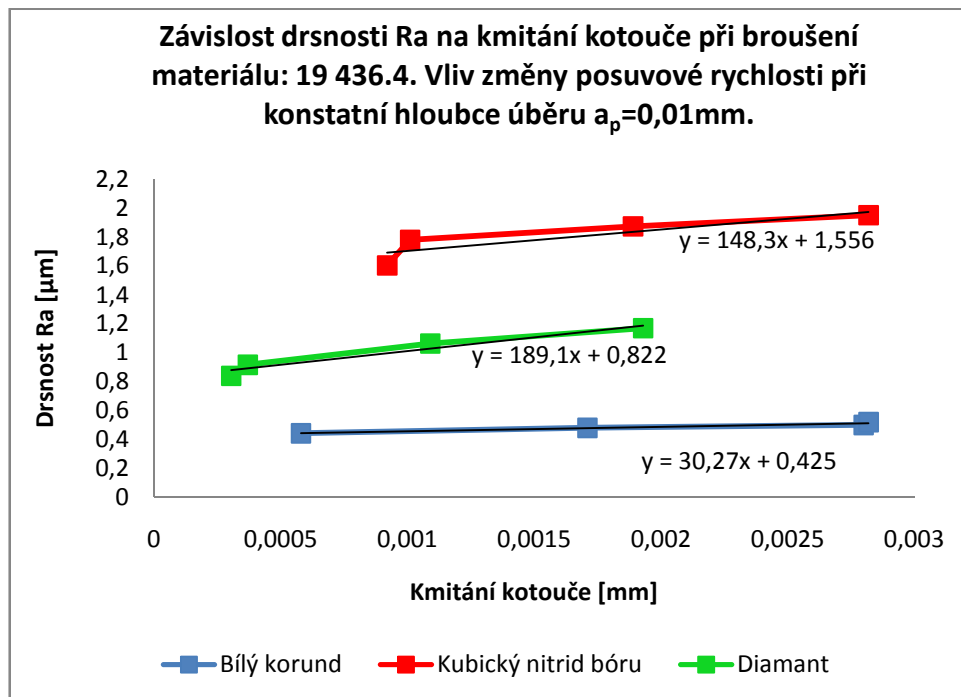
V druhém případě zůstávala konstantní posuvová rychlost a měnila se hloubka úběru a_p :

- 1) $a_p = 0,005\text{ mm}$ 2) $a_p = 0,01\text{ mm}$ 3) $a_p = 0,02\text{ mm}$ 4) $a_p = 0,04\text{ mm}$

Nutno podotknout, že při měření mohlo docházet k chybám náhodného vlivu, jako je chůze v blízkosti přístroje, mazání brusky či jinému nechtěnému rozechvění soustavy. Pro důkladně a lépe statisticky vyhodnotitelné měření by bylo nutné, měření vícekrát opakovat v lepších laboratorních podmínkách, kde by vliv okolí na tento přístroj neměl vliv. Po naměření hodnot, byla amplituda vibrací v časovém úseku při broušení zprůměrována aritmetickým průměrem a v příložených tabulkách na CD byla vyhodnocena i její směrodatná odchylka. Následně byly zhotoveny grafy závislosti drsnosti R_a na kmitání jednotlivých brousících kotoučů při stejných technologických podmínkách.

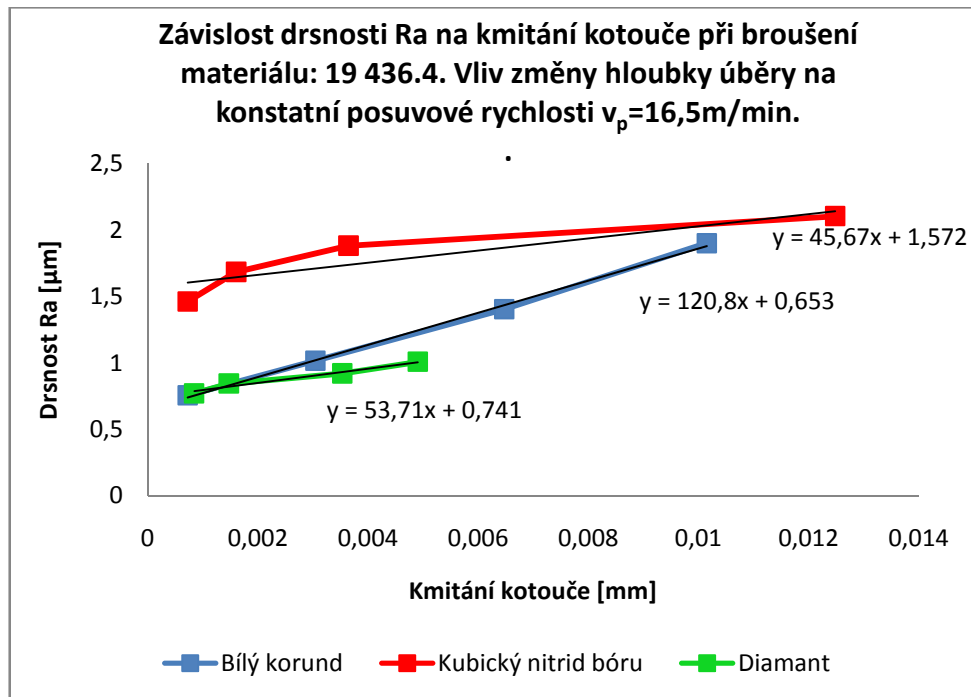
11.1 Materiál: 19 436.4

11.1.1 Vliv změn posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru



Obr. 56. Závislost drsnosti na kmitání při změně posuvové rychlosti – 19 436.4

11.1.2 Vliv změn hloubky úběru při konstantní posuvové rychlosti



Obr. 57. Závislost drsnosti na kmitání – konstantní posuvová rychlost – 19 436.4

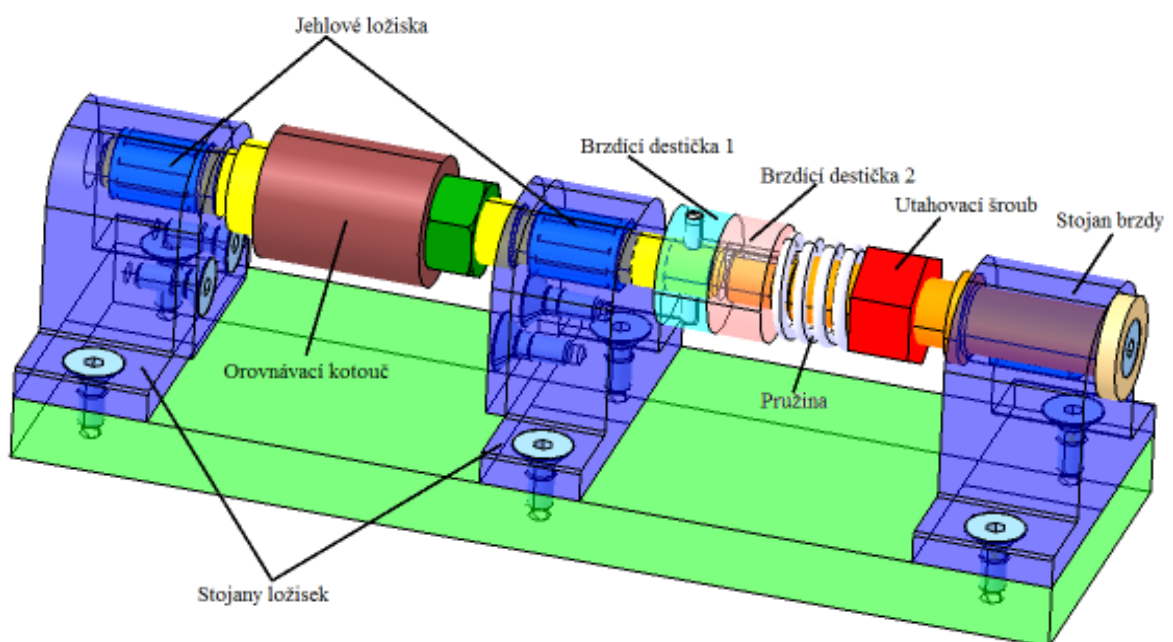
Každý bod na určité křivce představuje velikost drsnosti Ra při určité naměřené hodnotě kmitání. Obě hodnoty každého bodu byly naměřeny při stejných technologických podmínkách. Z přiložených tabulek na CD lze vidět, že s rostoucí posuvovou rychlostí či s rostoucí hloubkou úběru se hodnota drsnosti zvyšuje a také hodnota kmitání roste. Z Obr. 56. lze tedy pozorovat, že s rostoucí hodnotou kmitání, které byly naměřeny při vzrůstající posuvové rychlosti a konstantní hloubce úběru $a_p=0,01\text{mm}$, se u všech brousicích kotoučů zvyšuje hodnota drsnosti a zhoršuje se tedy jakost povrchu. Stejná zákonitost platila i při změně hloubky úběru a konstantní posuvové rychlosti $v_p=16,5\text{ m/min}$. Z tohoto grafu lze také pro další broušení při znalosti velikosti kmitání určitého brousicího kotouče předpovědět přibližnou hodnotu drsnosti tohoto materiálu. Jedná se pouze o předpověď přibližné hodnoty, jelikož nikdy není možnost a schopnost provést dvě stejné měření či zajistit broušení při naprosto stejných technologických podmínkách. U materiálu 14 109.4, duralu či epoxidové pryskyřice vycházely tyto zákonitosti obdobně. Nebo-li při zvyšující se posuvové rychlosti či hloubce úběru při broušení se zvyšovala i hodnota kmitání všech brousicích kotoučů. Toto mělo za následek zvyšování hodnot drsnosti Ra, Rz i Rt, tedy zhoršování jakosti povrchu. Grafy závislostí kmitání na drsnosti Ra byly pro ostatní materiály (14 109.4, dural, epoxidová pryskyřice) vloženy do příloh této diplomové práce.

12 NÁVRH OROVNÁVACÍHO ZAŘÍZENÍ

Během procesu broušení se brousící kotouč postupně opotřebovává, což vede ke změnám provozních podmínek, snížení jeho pracovní schopnosti a zhoršené jakosti povrchu. Opořebení 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 samoostření.

12.1 Orovnání brousících kotoučů

Pro správné vyhodnocení opotřebení brousících kotoučů je nutné každý kotouč před experimentem důkladně orovnat. Měkké kotouče, jako jsou kotouče se zrní z bílého korundu, je možné orovnat pomocí diamantového orovnávače, který je připevněn na brusce BRH 20.03F. Problém nastává u orovnávacích kotoučů s velmi tvrdými zrní, jako je diamant a kubický nitrid bóru. Při opakovaném orovnávacím těchto kotoučů pomocí diamantového orovnávače, by mohlo dojít k poškození či nesprávné funkční činnosti tohoto orovnávače. Pro tyto kotouče byly sestaveny drahé speciální orovnávací stroje. Druhou a levnější z možností je orovnávací kotoučů pomocí jednoduchého orovnávacího přípravku, kde je kotouč orovnávacím pomocí malého orovnávacího kotouče připevněného na hřídeli orovnávacího přípravku.



Obr. 58. Schéma orovnávacího přípravku

Tato hřídel je uložena v jehlových ložiskách. Jehlové ložiska zde byly použity z důvodu prostorové nutnosti, neboť žádný člen orovnávacího přípravku by neměl být vyšší než je samotný orovnávací kotouč, aby nemohlo dojít k jejich náhodnému styku s brousicím kotoučem a poškození.

Způsob orovnání spočívá v přijetí přípravku k otáčejícímu brousicímu kotouči. Brousicí kotouč po dosažení styku s orovnávacím kotoučem začne tento orovnávací kotouč roztáčet. Aby docházelo k orovnávání, je hřídel s orovnávacím kotoučem brzděn brzdovým systémem připevněným na orovnávacím přípravku. Jedna brzdící destička je připevněna k rotující hřídeli, zatímco druhá brzdící destička je připevněna k pevně uložené nerotující hřídeli. Velikost síly styku těchto kotoučů a tedy i velikost tření je regulována pomocí utahovací matice, která utahuje či povoluje pružinu tlačící na nerotující brzdovou destičku, připevněnou pomocí pera (má určitou možnost posuvu). Brzdící destička na rotující hřídeli je naopak připevněna k hřídeli pevně pomocí kolíku. Při utažení šroubu začne tedy pružina tlačít na brzdovou destičku brzdového systému, která tlačí na brzdovou destičku na rotující hřídeli a vlivem styku dochází k tření a tedy i brzdění orovnávacího kotouče připevněného na rotující hřídeli. Brousicí kotouč je následně tímto orovnávacím kotoučem také mírně brzděn a dochází k jeho orovnání.

Tento orovnávací přípravek byl navržen, byly zhotoveny výrobní výkresy a byl nachystán k realizaci výroby. Z časových důvodů ovšem nebylo možno tento přípravek reálně zhotovit. Proto byly brousicí kotouče z diamantu a kubického nitridu bóru během provádění experimentu orovnávány na speciálních orovnávacích strojích, určených právě pro orovnávání těchto kotoučů ze supertvrdých materiálů.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl výzkum broušení materiálů, jež se používají pro výrobu forem a to především kotouči z tvrdých brousících materiálů diamantu a kubického nitridu bóru. Přesněji byl v této diplomové práci zkoumán vliv technologických podmínek při broušení těmito kotouči na velikost řezných sil, jakost povrchu a velikosti kmitání. Součástí této diplomové práce byl také návrh orovnávacího zařízení, nutného pro orovnání těchto brousících kotoučů se zrný tvrdých materiálů, které se běžně na brusce BRH 20.03F orovnat nedají. Pro broušení byly vybrány často používané materiály pro výrobu forem a to 14 109.4, 19 436.4, dural a epoxidová pryskyřice

Všechny tyto materiály forem byly postupně broušeny různými technologickými podmínkami kotouči D100 K100 B-VI – diamantový brousící kotouč, B107 K100 B-III – kubický nitrid bóru a A 99B 80 Is(K) 9 V – bílý korund. Vliv různých technologických podmínek byl poté vyhodnocen pro řezné síly, jakost povrchu a kmitání. Byly navrženy dva druhy technologických podmínek. První druh zkoumal vliv změny posuvové rychlosti, druhé technologické podmínky pak zkoumaly vliv změny hloubky úběru.

Z naměřených dat si lze povšimnout, že jak s rostoucí hloubkou úběru, tak i s rostoucí posuvovou rychlostí se hodnota složek řezných sil F_p i F_c u všech brousících kotoučů zvyšovala. Při změně posuvové rychlosti a relativně nízké hloubce úběru $a_p=0,01$ mm vykazovaly především u vyšších posuvových rychlostí (20 a 22,5 m/min) nižší hodnoty složek řezných sil právě kotouče z tvrdých materiálů, jež byly v této diplomové práci zkoumány. Tato skutečnost je příznivá především z hlediska úzkého vztahu mezi velikostí řezných sil a vzniklým teplem při broušení, které by v určitých případech a převážně u ocelových materiálů, mohlo způsobovat nežádoucí nárůst tahových napětí a vzniku trhlinek na povrchu broušeného materiálu. Proto se tyto kotouče dobře hodí při nízkých hloubkách úběru a vyšších posuvových rychlostech. Naopak tomu bylo ovšem skoro ve všech případech při velkých hloubkách úběru. Kotouče z tvrdých materiálů vykazovaly hodnot složek řezných sil F_p i F_c vyšších než měkkí kotouč z bílého korundu. Při nižších hodnotách hloubek úběru byly hodnoty srovnatelné či v určitých případech i nižší než u bílého korundu. Z pohledu velikosti složek řezných sil se tedy tyto brousící kotouče z tvrdých materiálů nejeví příliš vhodné při broušení velkou hloubkou úběru.

Jakost povrchu byla měřena po broušení stejnými technologickými podmínkami jako při měření složek řezných sil. Nutno podotknout, že hodnoty byly měřeny pouze po broušení

bez vyjiskřování. Tato skutečnost měla za následek mírné zhoršení jakosti povrchu než by bylo při daných technologických podmínkách možno dosáhnout. Jakost povrchu byla následně vyhodnocena parametry Ra, Rz, Rt a Rmr. Při srovnání jakosti povrchu po broušení parametry Ra, Rz a Rt zmiňovanými třemi kotouči se jako nejhorší jevil broušící kotouč z kubického nitridu bóru a to především u ocelových materiálů. Tato skutečnost ukazuje na to, že daný kotouč, s nímž bylo měření prováděno, není příliš vhodný pro broušení ocelových materiálů a lepší uplatnění by mohl najít např. při broušení slinutých karbidů. Nelze ovšem říci, že se kubický nitrid pro broušení těchto materiálů nehodí. Diamantový kotouč pak vykazoval podobně dobrých hodnot drsností Ra, Rz a Rt jako kotouč se zrný bílého korundu. Z pohledu porovnání broušených materiálů, vykazovaly ve většině technologických podmínek nejlepších hodnot drsností Ra, Rz a Rt materiály ocelové a epoxidová pryskyřice. Rapidně nejhorších jakostí povrchu bylo dosaženo u duralu. Tento materiál je ve srovnání s ocelovými měkký, dochází k větší plastické deformaci a tříska se při broušení z místa styku špatně odváděla, vlačovala se nazpět či následně tvořila výstupky či prohlubně. Zdokonalení jakosti povrchu u duralu by bylo dosaženo při následném broušení s vyjiskřováním. Při vyhodnocení materiálového podílu si lze všimnout, že s rostoucí posuvovou rychlostí klesá procento materiálu obsaženého v 50% hloubky po broušení. Vysoké procento materiálového podílu výrazně zvyšuje životnost součástí, tzn. čím více je materiálů v dané hloubce, tím více se zvyšuje nosný podíl povrchu součástí, který silně ovlivňuje životnost dílu. Z naměřených dat lze tedy vidět, že pro co nejvyšší životnost součástí je vhodné brousit nízkou posuvovou rychlostí, čímž se též zvyšuje tlakové zbytkové napětí v obrobeném povrchu.

Dále byl v praktické části této diplomové práce zkoumán vliv kmitání broušících kotoučů na jakost povrchu při broušení. Kmitání bylo měřeno pomocí bezdotykového laseru Renishaw XL-80. Technologické podmínky broušení, při nichž bylo kmitání měřeno, byly shodné s technologickými podmínkami při měření jakosti povrchu a to z důvodu nalezení závislosti mezi kmitáním a naměřenou drsností. Kmitání bylo měřeno zhruba o dvě sekundy před najetím broušícího kotouče na vzorek a dvě sekundy po přebroušení vzorku. Z naměřených dat byly následně vyexportovány a analyzovány pouze hodnoty příčného kmitání při broušení, tedy při styku broušícího kotouče se vzorkem. Tyto data byly následně statisticky vyhodnoceny pomocí aritmetického průměru a směrodatné odchylky. Následně bylo zjištěno, že velikost kmitání se zvyšuje jak s rostoucí hloubkou úběru a_p , tak i se zvyšující se posuvovou rychlostí. Po vyhodnocení dat a vytvoření grafů závislosti drs-

nosti Ra na velikosti kmitání, lze vidět, že s rostoucí hodnotou kmitání brousicích kotoučů při broušení roste i hodnota drsnosti Ra a jakost povrchu se tedy vlivem kmitání zhoršuje. Lze tedy říct, že s rostoucí posuvovou rychlostí a hloubkou úběru se zvyšuje kmitání všech brousicích kotoučů a vliv kmitání má za následek zhoršení jakosti povrchu a zvýšení hodnot Ra, Rz i Rt.

Poslední částí této diplomové práce byl návrh orovnávacího zařízení. Brousicí kotouče z těchto tvrdých materiálů jako je diamant a kubický nitrid bóru mají sice několikanásobně nižší opotřebení a tedy mnohem vyšší životnost než měkký kotouč z bílého korundu, ovšem i tyto kotouče, je nutné z hlediska správné funkčnosti či zkvalitnění jakosti povrchu výrobku, orovnávat. Tyto kotouče ovšem nelze orovnávat běžnými konvenčními způsoby jako měkké kotouče a proto bylo navrženo zmiňované orovnávací zařízení, jehož princip funkce byl v praktické části taktéž popsán. Součástí diplomové práce je i výkresová dokumentace všech dílů potřebných pro zhotovení tohoto orovnávacího zařízení. Z časových důvodů ovšem nebylo možno zcela zkonstruovat, sestavit a zjistit funkčnost tohoto orovnávacího zařízení, jehož realizace by měla být v nejbližší době provedena. Brousicí kotouče z diamantu a kubického nitridu bóru byly tedy pro účel a výzkum této diplomové práce orovnány na speciálním orovnávacím stroji.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Bumbálek, L. aj.: Kontrola a měření. Informatorium Praha. 2009. ISBN 978-80-7333-072-9
- [2] Holešovský, F.: Broušení a jeho vliv na vlastnosti povrchu. VŠB-TU Ostrava. 2007. ISBN 978-80-248-1644-9
- [3] Janáč A. aj.: Technologia obrabania. SVŠT Bratislava. 2004. ISBN 80-227-2031-3
- [4] Kocman, K.; Prokop, J.: Technologie obrábění. 2nd ed. Brno:Cerm,2005
- [5] Lukovics, I.: Progresivní metody dokončování funkčních ploch nástrojů. VŠB-TU Ostrava. 2007. ISBN 978-80-248-2033-0
- [6] Maslov, J.N.: Teorie broušení kovů. 1st ed. SNTL Praha. 1979.
- [7] Neslušán, M. aj.: Experimentálne metody v trieskovom obrábaní. ZU Žilina. 2007. ISBN 978-80-7318-488-9
- [8] Vasilko, K.: Analytická teoria trieskového obrabania. FUT-TU Košice. 2007. ISBN 978-80-8073-759-7
- [9] Vasilko, K.; Bokučava, G.: Brúsenie kovových materiálov. 1st ed. Bratislava: Alfa, 1988.
- [10] Šváral, Š.: Obrábanie nástrojmi z diamantu a kubického nitridu bóru. 1.vyd. Bratislava: Alfa, 1977.
- [11] Nestupa, Z.: Supertvrde materiály. Ostrava: ČVTS, 1989
- [12] Vintr, J.: Bakalářská práce - Supertvrde řezné materiály a jejich efektivní využití. UTB – FT Zlín, 2006.
- [13] Martincová, Z.: Bakalářská práce - Supertvrde řezné materiály a jejich efektivní využití. VUT – FSI Brno. 2008.
- [14] Kolektiv autorů.: Supertvrde materiály. Ostrava: ČSVTS, 1989.
- [15] Čop, J.: Bakalářská práce – Broušení materiálů s využitím kubického nitridu bóru. UTB – FT Zlín. 2010.
- [16] BRH 20.03F, Rovinná horizontální bruska, Návod k použití.
- [17] Bobčík L. a kol.: Formy pro zpracování plastů II.díl – Vstřikování termoplastů. 1. vyd. Brno: Uniplast, 1999.

- [18] Štěpek, J.; Zelinger, J.; Kuta, J.: Technologie zpracování a vlastnosti plastů. 1. vyd.
Praha: SNTL, 1989

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Sz	Skutečný průřez odřezávaného kovu jedním zrnem
h_z	Střední hodnota hloubky odřezávané vrstvy
b	Šířka řezné části zrna
F_{1c}	Řezná síla na jedno zrno
k_b	Měrná řezná síla při broušení
Al_2O_3	Oxid hlinitý
SiO_2	Oxid křemičitý
F_c	Tangenciální řezná síla
F_p	Radiální řezná síla
F_f	Axiální řezná síla
Ra	Střední aritmetická úchylka profilu
Rz	Výška nerovnosti profilu z deseti bodů
Sm	Střední rozteč profilu
S	Střední rozteč místních výstupků
T_p	Nosný podíl
Cr	Chrom
Ni	Nikl
Mn	Mangan
Si	Křemík
Al	Hliník
Ti	Titan
C	Uhlík
a_p	Hloubka úběru
ε	Poměrná deformace

KNB	Cubic boron nitride (kubický nitrid boru)
P_s	Výkon potřebný na otáčení
HRC	Tvrdost podle Rockwella
HSS	High speed steel – rychlořezná ocel
SiC	Karbid křemíku
B_4C	Karbid boru
B_2O_3	Oxid boritý
MPa	Megapascal
K	Kelvin
Li_3BN_2	Nitrid lithno boritý
AlN	Nitrid hlinitý
AlB_2	Borid hlinitý
Cu	Měď

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Schéma fáze broušení.</i>	14
<i>Obr. 2. Model tvoření třísky při broušení</i>	14
<i>Obr. 3. Zjednodušená plocha průřezu řezu při broušení.</i>	15
<i>Obr. 4. Univerzální hrotová bruska</i>	17
<i>Obr. 5. Bezhrotá bruska pro vnější broušení</i>	18
<i>Obr. 6. Vodorovná rovinná bruska s přímočarým vratným pohybem stolu</i>	19
<i>Obr. 7. Svislá rovinná bruska s přímočarým pohybem stolu</i>	20
<i>Obr. 8. Sklíčidlová bruska na díry</i>	20
<i>Obr. 9. Základní způsoby opotřebení kotouče</i>	24
<i>Obr. 10 Značení tvaru, rozměrů a specifikace broušicích nástrojů</i>	26
<i>Obr. 11. Tvar krystalů přírodního diamantu</i>	29
<i>Obr. 12. Charakter textury povrchu</i>	33
<i>Obr. 13. Profil povrchu</i>	35
<i>Obr. 14. Amplitudové parametry R_p, R_v, R_z</i>	36
<i>Obr. 15. Amplitudový parametr R_t</i>	37
<i>Obr. 16. Průměrná šířka prvku profilu drsnosti</i>	38
<i>Obr. 17. Materiálový podíl drsnosti R_{mr}</i>	39
<i>Obr. 18. Přeměna krystalické mřížky diamantu</i>	44
<i>Obr. 19. Krystalická mřížka kubického nitridu bóru</i>	46
<i>Obr. 20. Přeměna krystalické mřížky při výrobě KNB</i>	47
<i>Obr. 21. Zobrazené a opozicované jednotlivé díly vstřikovací formy</i>	52
<i>Obr. 22. Broušené materiály používané při výrobě forem</i>	56
<i>Obr. 23. Rovinná horizontální bruska BRH 20.03F</i>	59
<i>Obr. 24. Tenzometrický dynamometr</i>	61
<i>Obr. 25. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál 19 436.4</i>	62
<i>Obr. 26. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál 19 436.4</i>	63
<i>Obr. 27. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál 19 436.4</i>	64
<i>Obr. 28. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál 19 436.4</i>	65
<i>Obr. 29. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál 14 109.4</i>	66
<i>Obr. 30. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál 14 109.4</i>	67
<i>Obr. 31. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál 14 109.4</i>	68
<i>Obr. 32. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál 14 109.4</i>	69

<i>Obr. 33. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál Dural</i>	70
<i>Obr. 34. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál Dural</i>	71
<i>Obr. 35. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál Dural.....</i>	72
<i>Obr. 36. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál Dural.....</i>	73
<i>Obr. 37. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál Epoxidová pryskyřice</i>	74
<i>Obr. 38. Porovnání velikosti řezných sil F_p pro materiál Epoxidová pryskyřice</i>	75
<i>Obr. 39. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál Epoxidová pryskyřice</i>	76
<i>Obr. 40. Porovnání velikosti řezných sil F_c pro materiál Epoxidová pryskyřice</i>	77
<i>Obr. 41. Schéma přístroje Mitutoyo SJ-301</i>	78
<i>Obr. 42. Vyhodnocení drsnosti R_a – kotouč A 99B 80 Is(K) 9 V.....</i>	79
<i>Obr. 43. Vyhodnocení drsnosti R_a – kotouč A 99B 80 Is(K) 9 V.....</i>	79
<i>Obr. 44. Vyhodnocení materiálového podílu R_{mr} – kotouč A 99B 80 Is(K) 9 V.....</i>	80
<i>Obr. 45. Vyhodnocení drsnosti R_a – kotouč B107 K100 B-III</i>	81
<i>Obr. 46. Vyhodnocení drsnosti R_a – kotouč B107 K100 B-III</i>	81
<i>Obr. 47. Vyhodnocení materiálového podílu R_{mr} – kotouč B107 K100 B-III</i>	82
<i>Obr. 48. Vyhodnocení drsnosti R_a – kotouč D100 K100 B-VI.....</i>	83
<i>Obr. 49. Vyhodnocení drsnosti R_a – kotouč D100 K100 B-VI.....</i>	83
<i>Obr. 50. Vyhodnocení materiálového podílu R_{mr} – kotouč D100 K100 B-VI.....</i>	84
<i>Obr. 51. Porovnání drsnosti R_a mezi brousicími kotouči – materiál 19 436.4</i>	85
<i>Obr. 52. Porovnání drsnosti R_a mezi brousicími kotouči – materiál 19 436.4</i>	85
<i>Obr. 53. Porovnání drsnosti R_a mezi brousicími kotouči – materiál 14 109.4</i>	86
<i>Obr. 54. Porovnání drsnosti R_a mezi brousicími kotouči – materiál 14 109.4</i>	86
<i>Obr. 55. Bezdotykový laser Renishaw XL-80</i>	88
<i>Obr. 56. Závislost drsnosti na kmitání při změně posuvové rychlosti – 19 436.4</i>	89
<i>Obr. 57. Závislost drsnosti na kmitání – konstantní posuvová rychlost – 19 436.4</i>	90
<i>Obr. 58. Schéma orovnávacího přípravku.....</i>	91

SEZNAM TABULEK

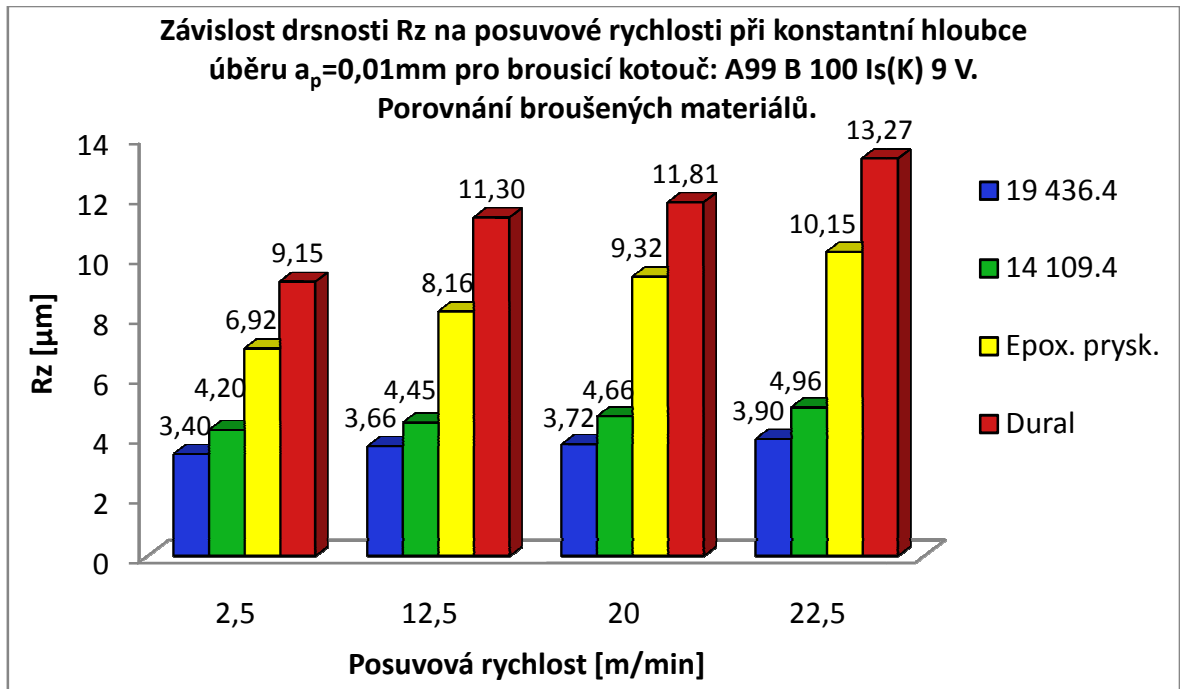
<i>Tab. 1. Vlastnosti diamantu</i>	45
<i>Tab. 2. Základní vlastnosti KNB.....</i>	47
<i>Tab. 3 Doporučené oceli na funkční a pomocné části forem.....</i>	52
<i>Tab. 4. Charakteristika brousicích kotoučů.....</i>	56
<i>Tab. 5. Některé technické parametry brusky BRH 20.03F</i>	60

SEZNAM PŘÍLOH

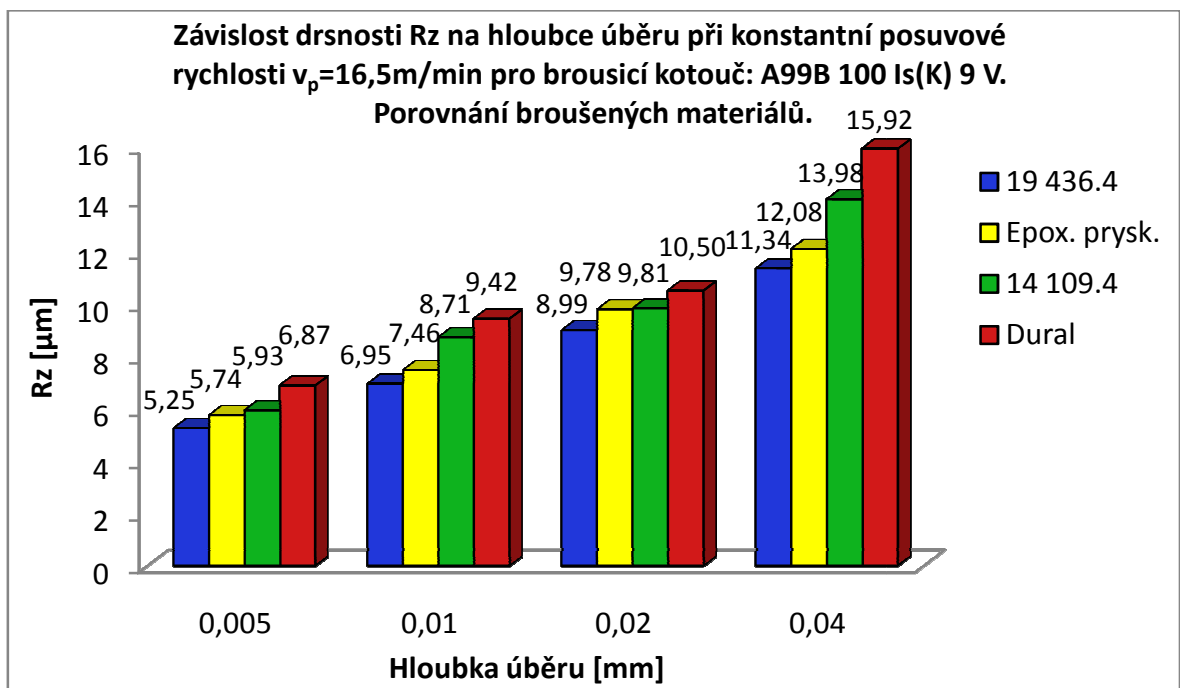
- PI: Porovnání drsnosti Rz jednotlivých materiálů po broušení kotoučem
A 99B 80 Is(K) 9 V
- PII: Porovnání drsnosti Rt jednotlivých materiálů po broušení kotoučem
A 99B 80 Is(K) 9 V
- PIII: Porovnání drsnosti Rz jednotlivých materiálů po broušení kotoučem
B107 K100 B-III
- PIV: Porovnání drsnosti Rt jednotlivých materiálů po broušení kotoučem
B107 K100 B-III
- PV: Porovnání drsnosti Rz jednotlivých materiálů po broušení kotoučem
D100 K100 B-VI
- PVI: Porovnání drsnosti Rt jednotlivých materiálů po broušení kotoučem
D100 K100 B-VI
- PVII: Porovnání drsnosti Ra jednotlivých broušicích kotoučů – materiál: Dural
- PVIII: Porovnání drsnosti Ra jednotlivých broušicích kotoučů – materiál: Epoxidová pryskyřice
- PIX: Závislost drsnosti Ra na kmitání – materiál: 14 109.4
- PX: Závislost drsnosti Ra na kmitání – materiál: Dural
- PXI: Závislost drsnosti Ra na kmitání – materiál: Epoxidová pryskyřice

PŘÍLOHA P I: POROVNÁNÍ DRSNOSTI RZ JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ PO BROUŠENÍ KOTOUČEM A 99B 80 IS(K) 9 V

a) Změna posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru

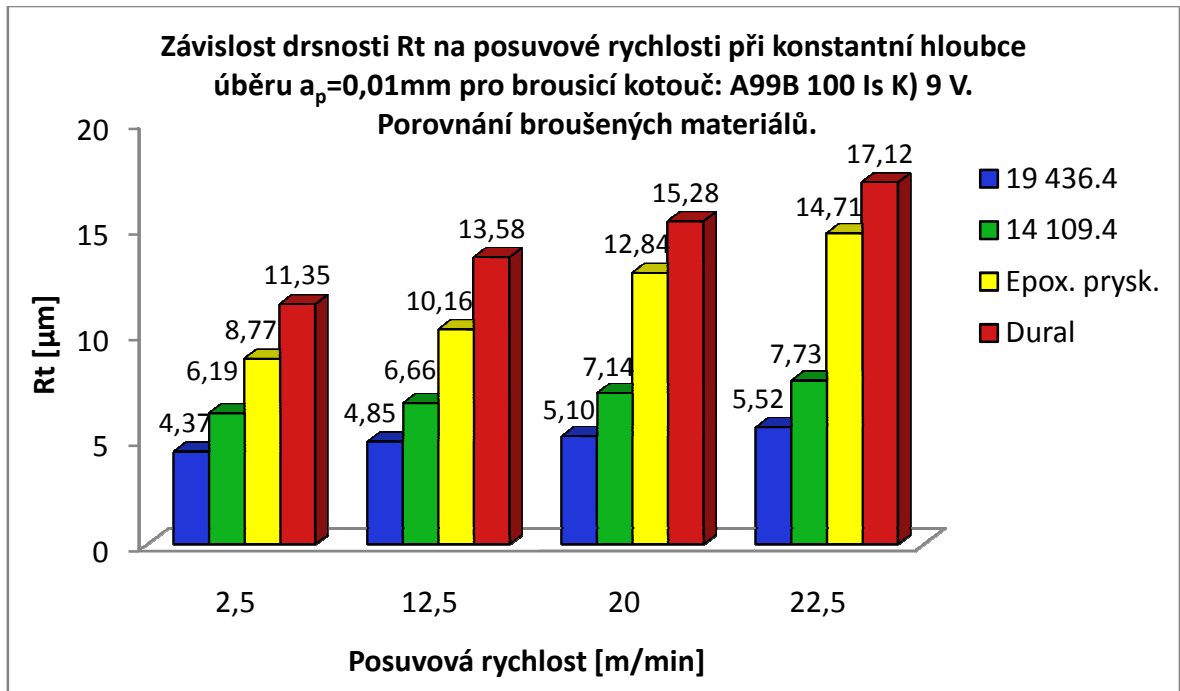


b) Změna hloubky úběru při konstantní posuvové rychlosti

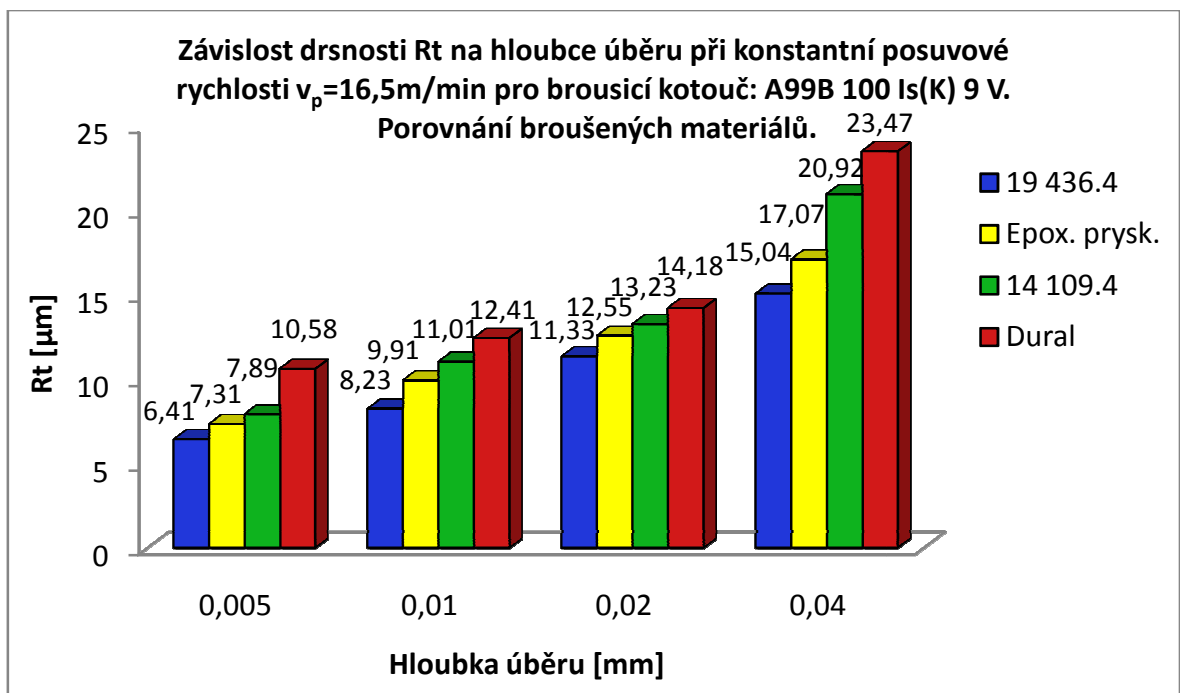


PŘÍLOHA PII: POROVNÁNÍ DRSNOSTI RT JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ PO BROUŠENÍ KOTOUČEM A 99B 80 IS(K) 9 V

a) Změna posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru

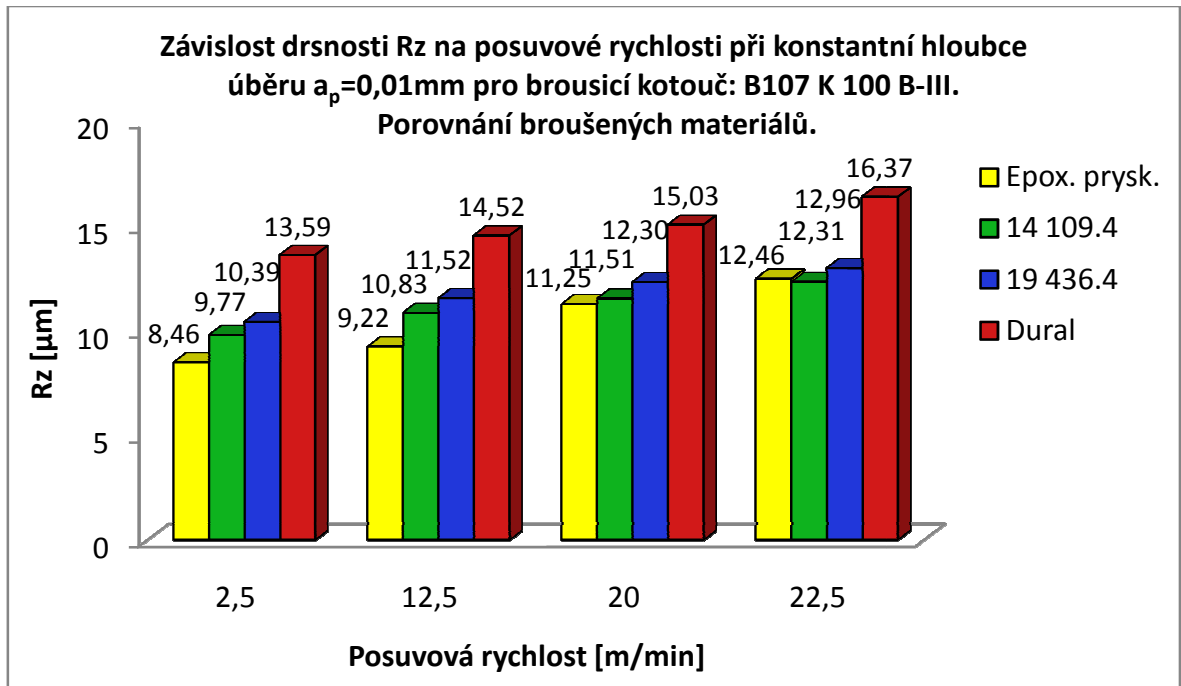


b) Změna hloubky úběru při konstantní posuvové rychlosti

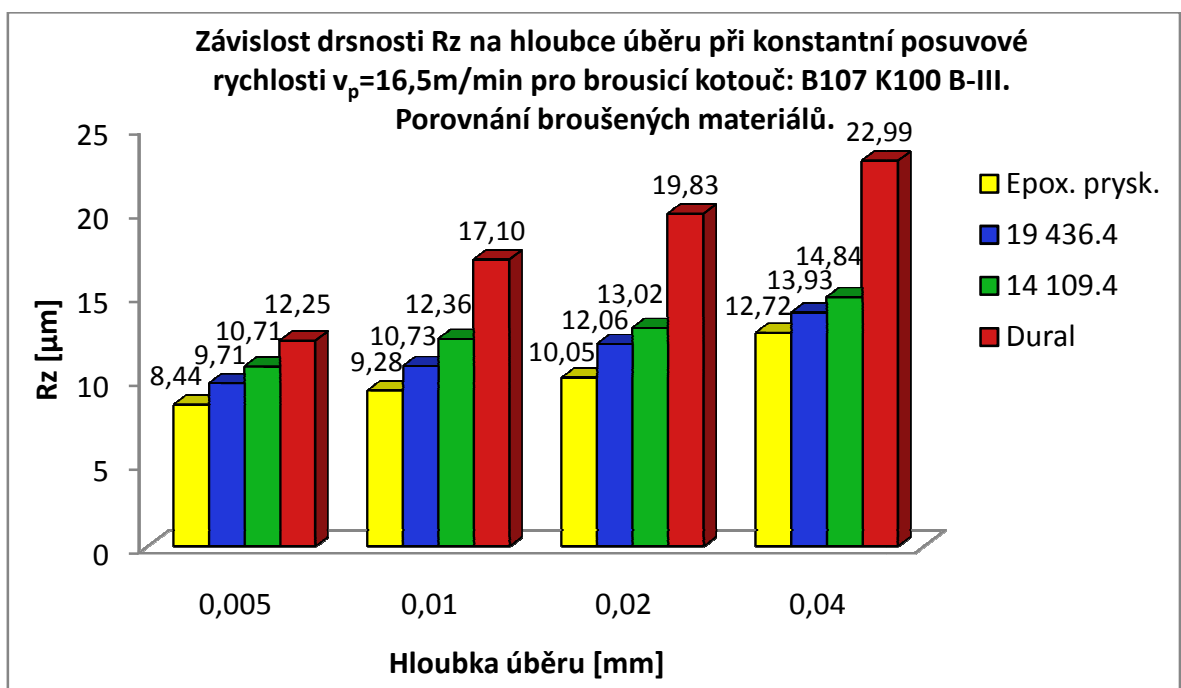


PŘÍLOHA PIII: POROVNÁNÍ DRSNOSTI RZ JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ PO BROUŠENÍ KOTOUČEM B107 K100 B-III

a) Změna posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru

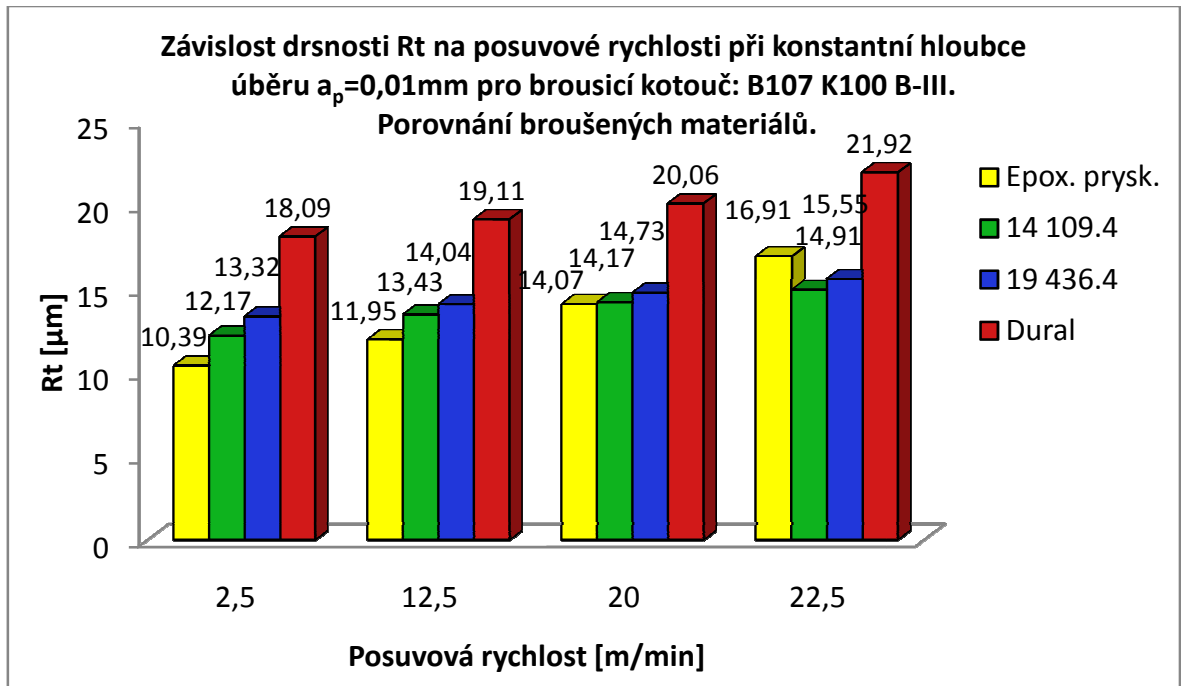


b) Změna hloubky úběru při konstantní posuvové rychlosti

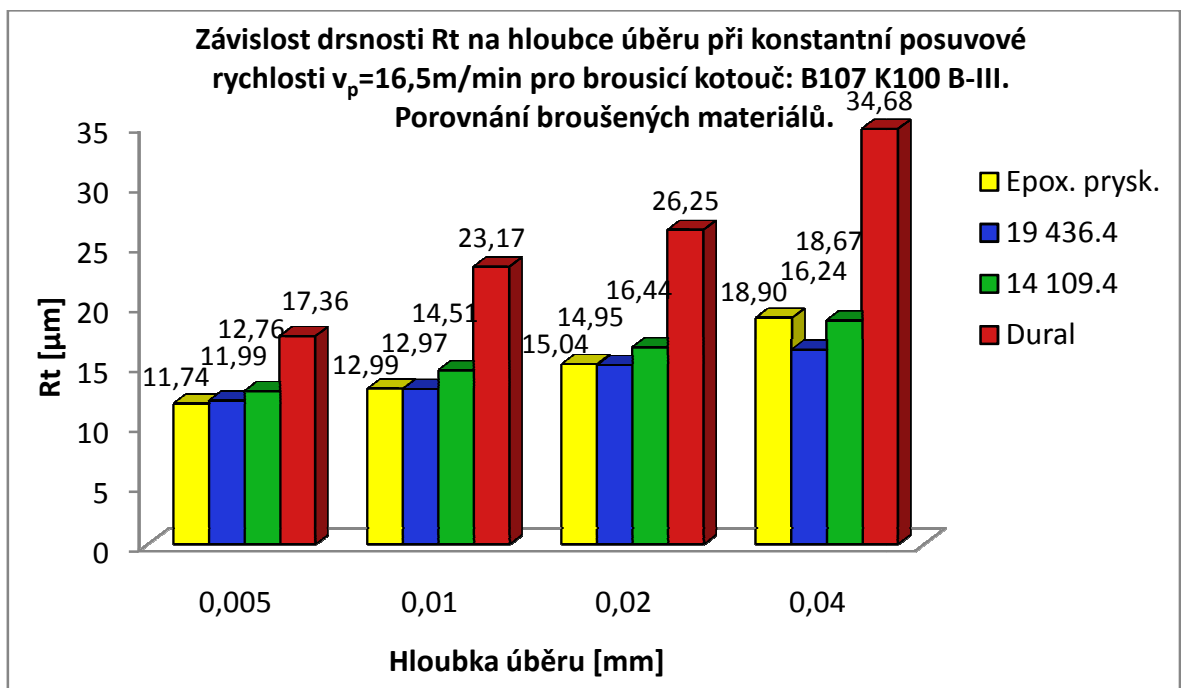


PŘÍLOHA PIV: POROVNÁNÍ DRSNOSTI RT JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ PO BROUŠENÍ KOTOUČEM B107 K100 B-III

a) Změna posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru

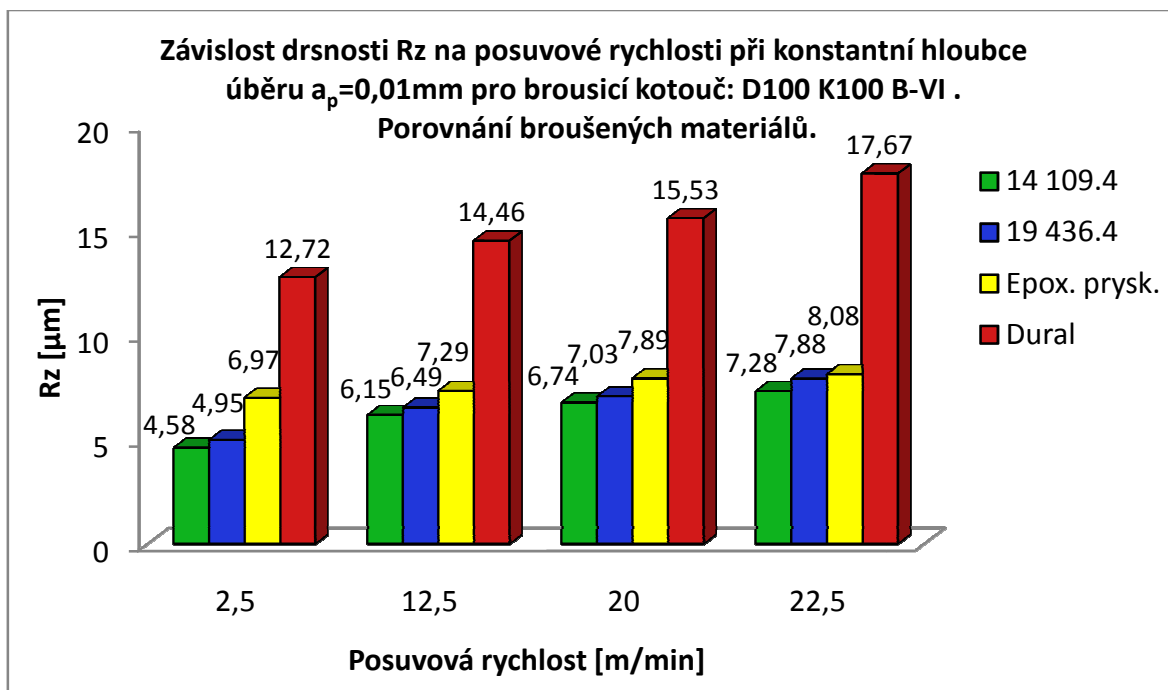


b) Změna hloubky úběru při konstantní posuvové rychlosti

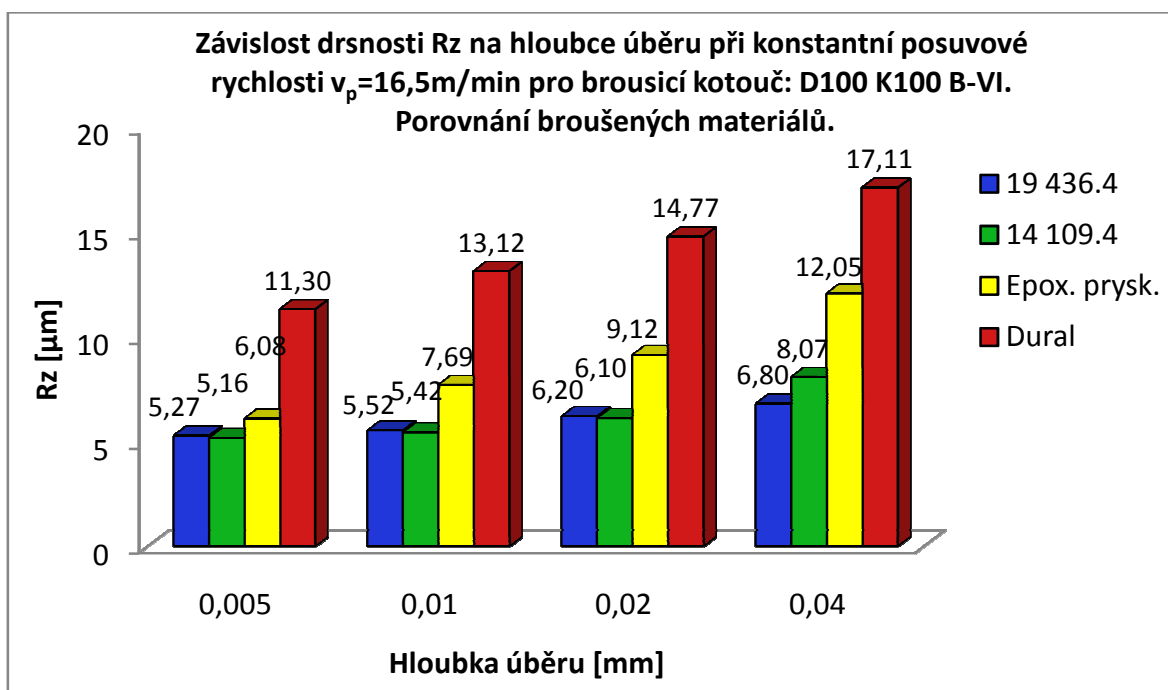


PŘÍLOHA PV: POROVNÁNÍ DRSNOSTI RZ JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ PO BROUŠENÍ KOTOUČEM D100 K100 B-VI

a) Změna posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru

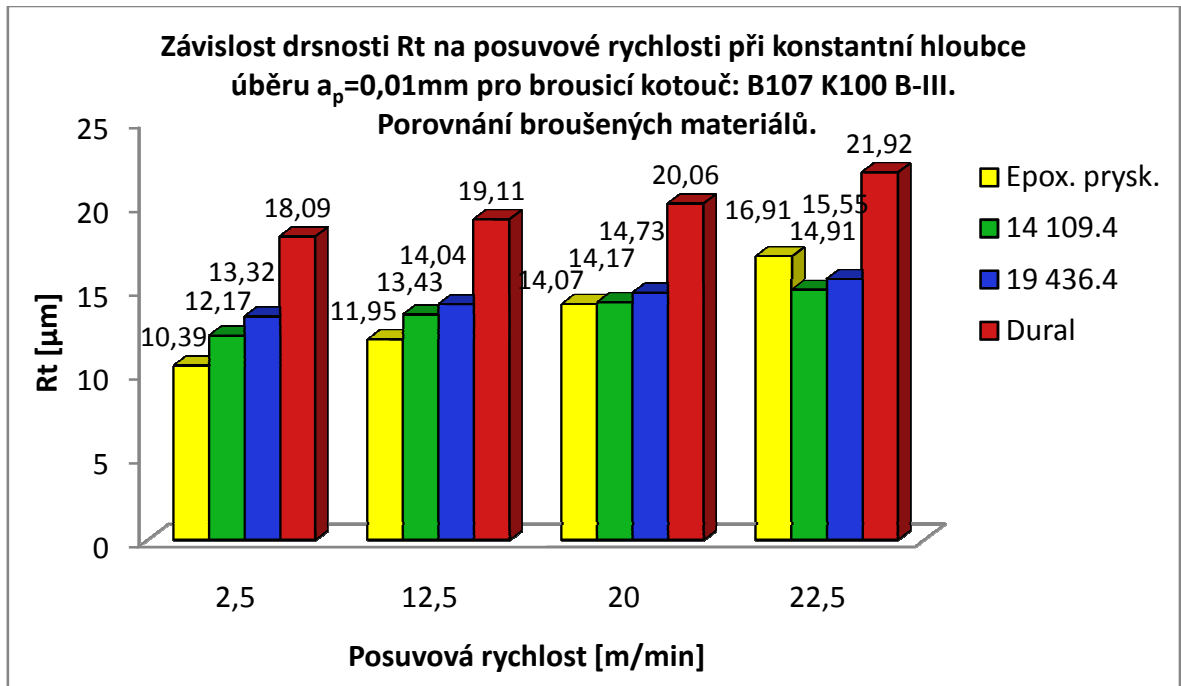


b) Změna hloubky úběru při konstantní posuvové rychlosti

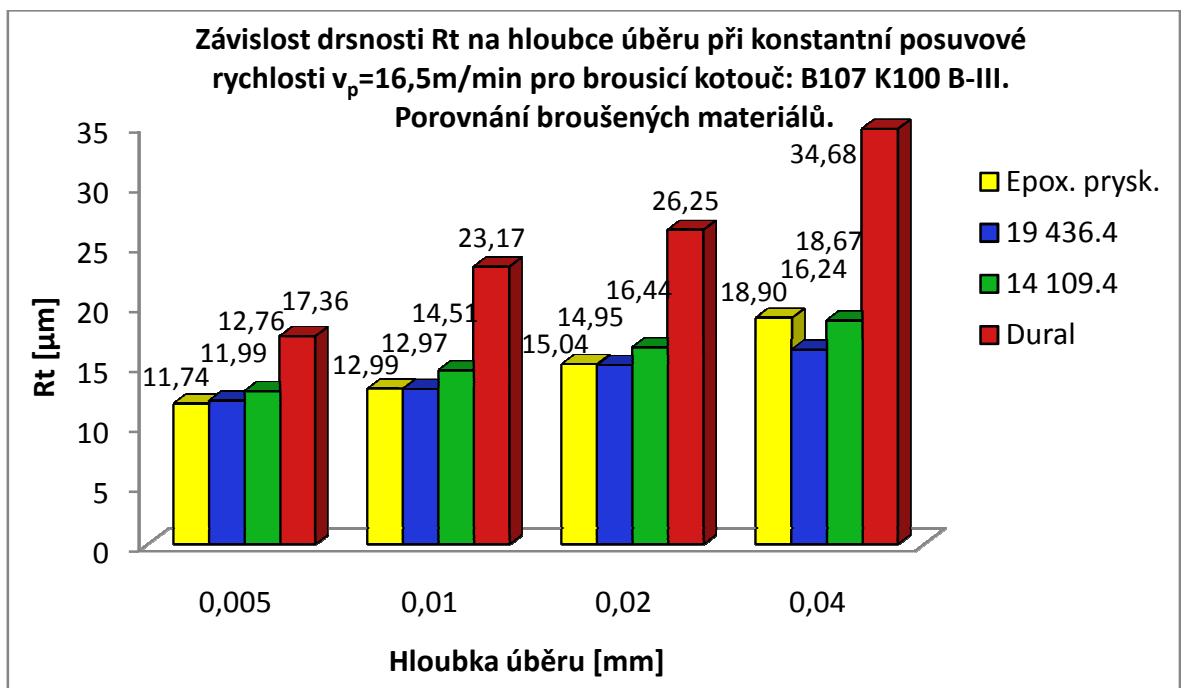


PŘÍLOHA PVI: POROVNÁNÍ DRSNOSTI RT JEDNOTLIVÝCH MATERIÁLŮ PO BROUŠENÍ KOTOUČEM D100 K100 B-VI

a) Změna posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru

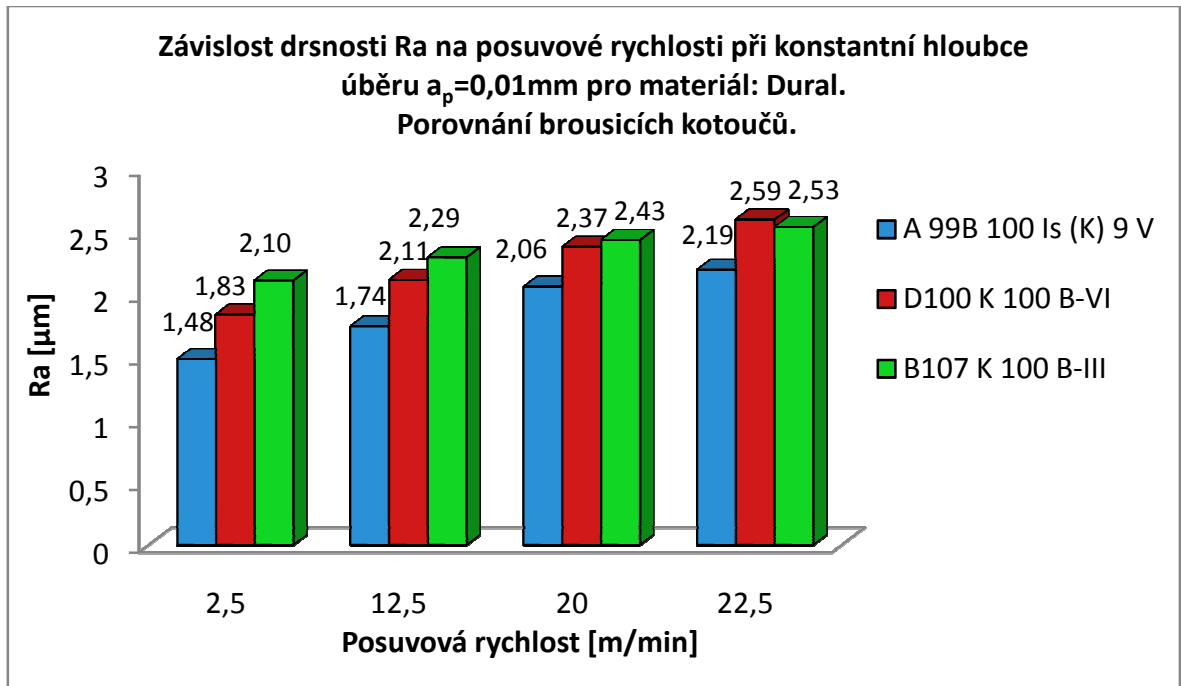


b) Změna hloubky úběru při konstantní posuvové rychlosti

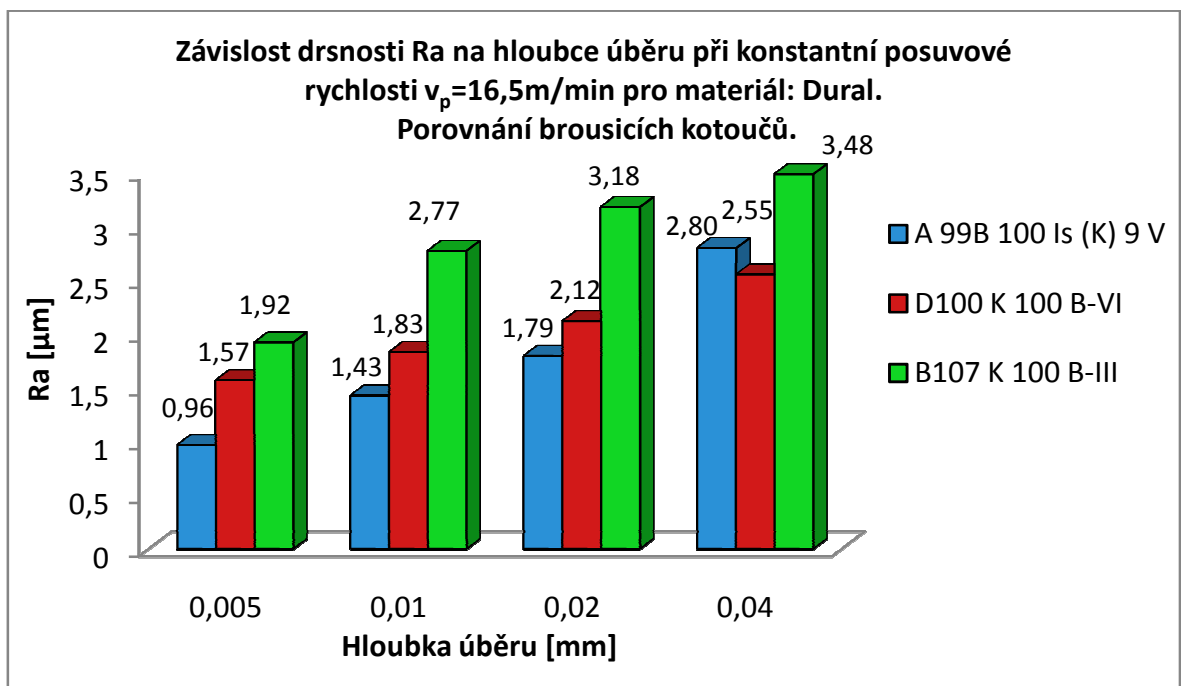


PŘÍLOHA PVII: POROVNÁNÍ DRSNOSTI RA JEDNOTLIVÝCH BROUSICÍCH KOTOUČŮ – MATERIÁL: DURAL

a) Změna posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru

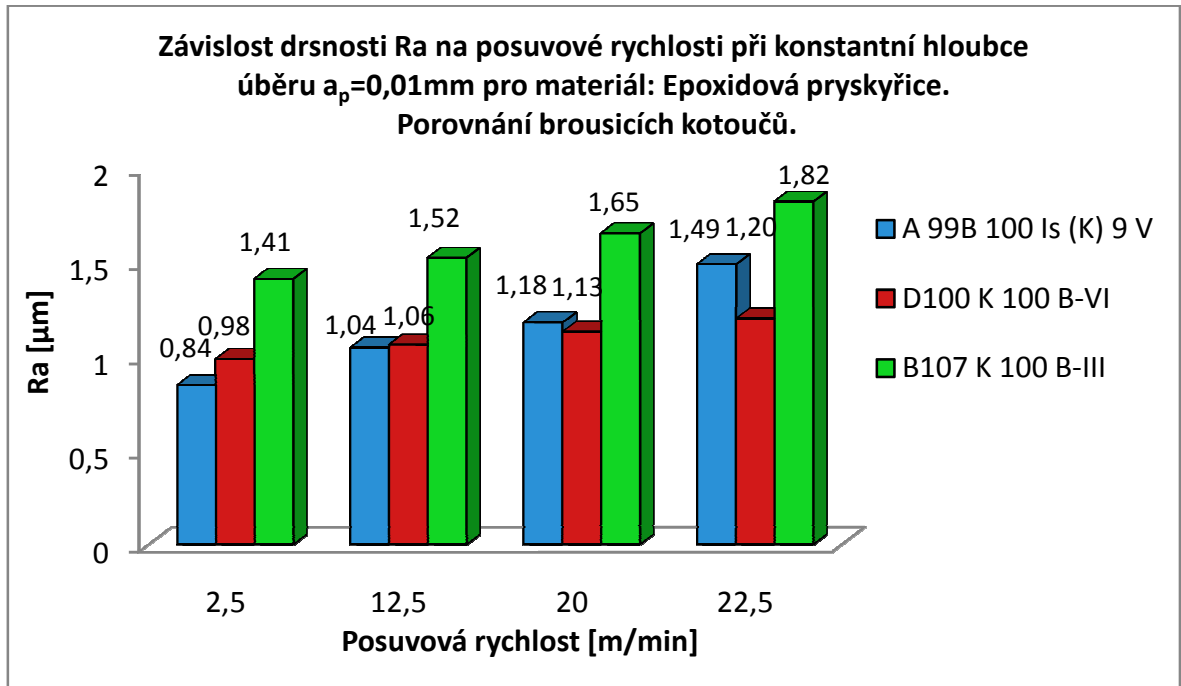


a) Změna hloubky úběru při konstantní posuvové rychlosti

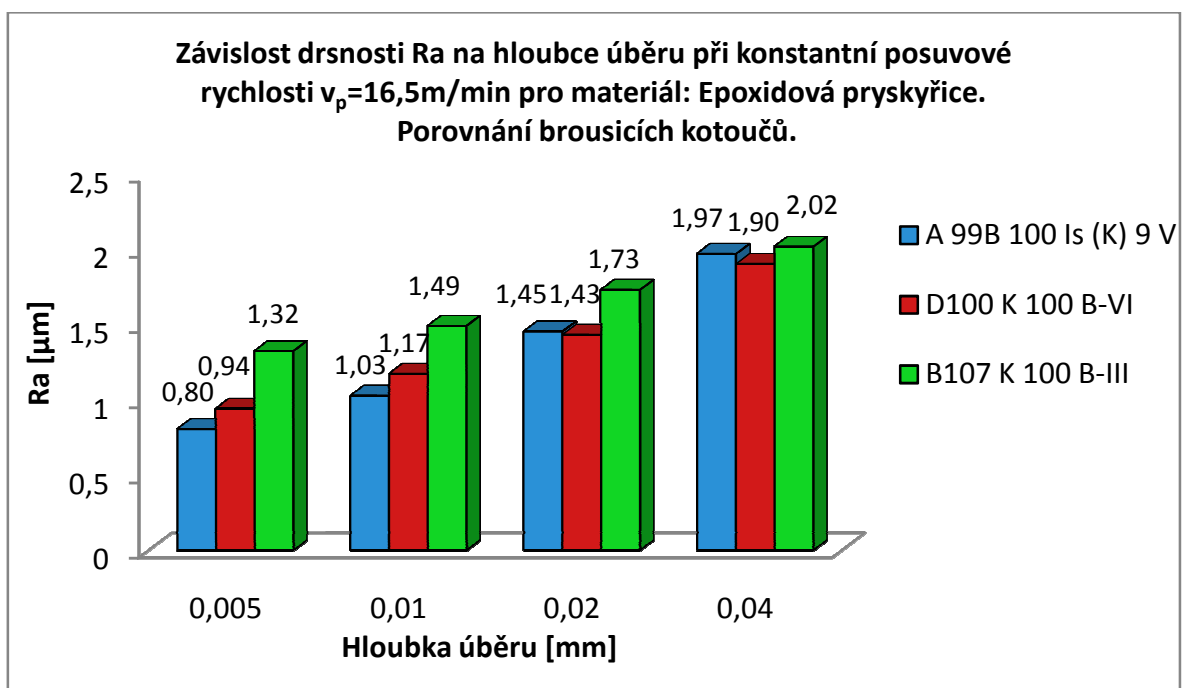


PŘÍLOHA PVIII: POROVNÁNÍ DRSNOSTI RA JEDNOTLIVÝCH BROUSICÍCH KOTOUČŮ – MATERIÁL: EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE

a) Změna posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru

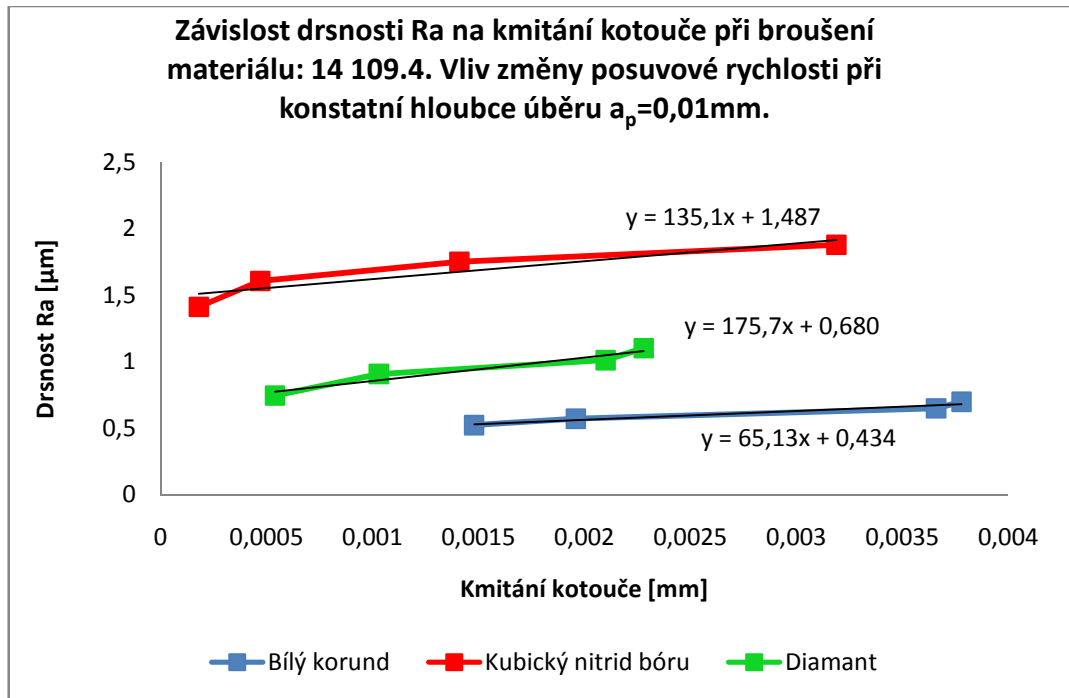


a) Změna hloubky úběru při konstantní posuvové rychlosti

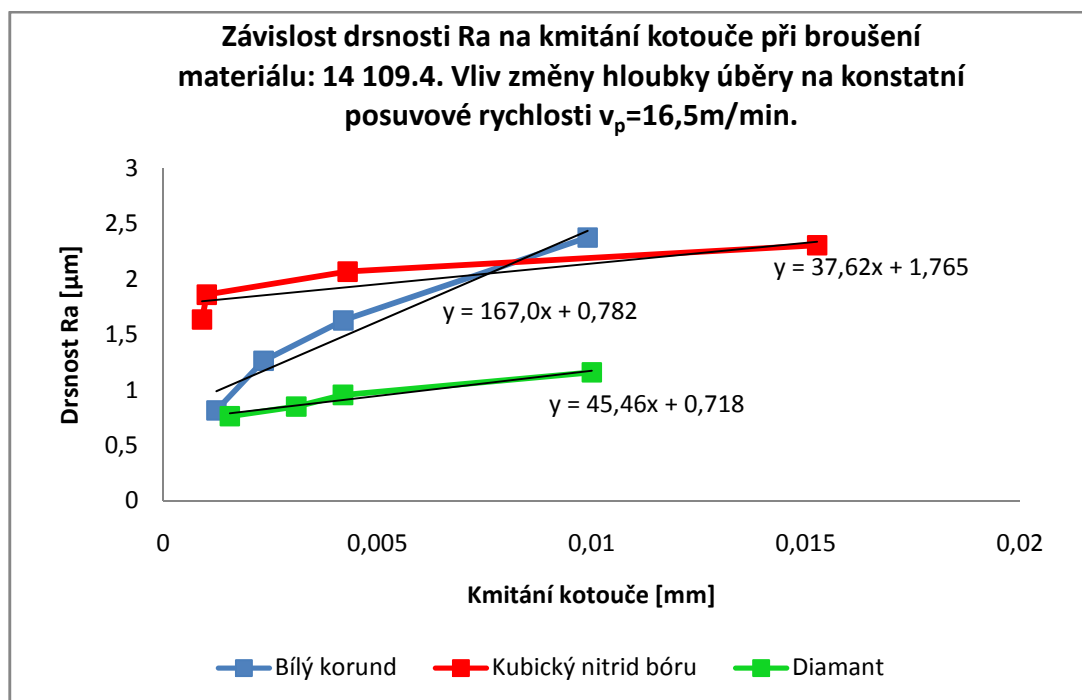


PŘÍLOHA PIX: ZÁVISLOST DRSNOSTI RA NA KMITÁNÍ – MATERIÁL: 14 109.4

a) Vliv změny posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru

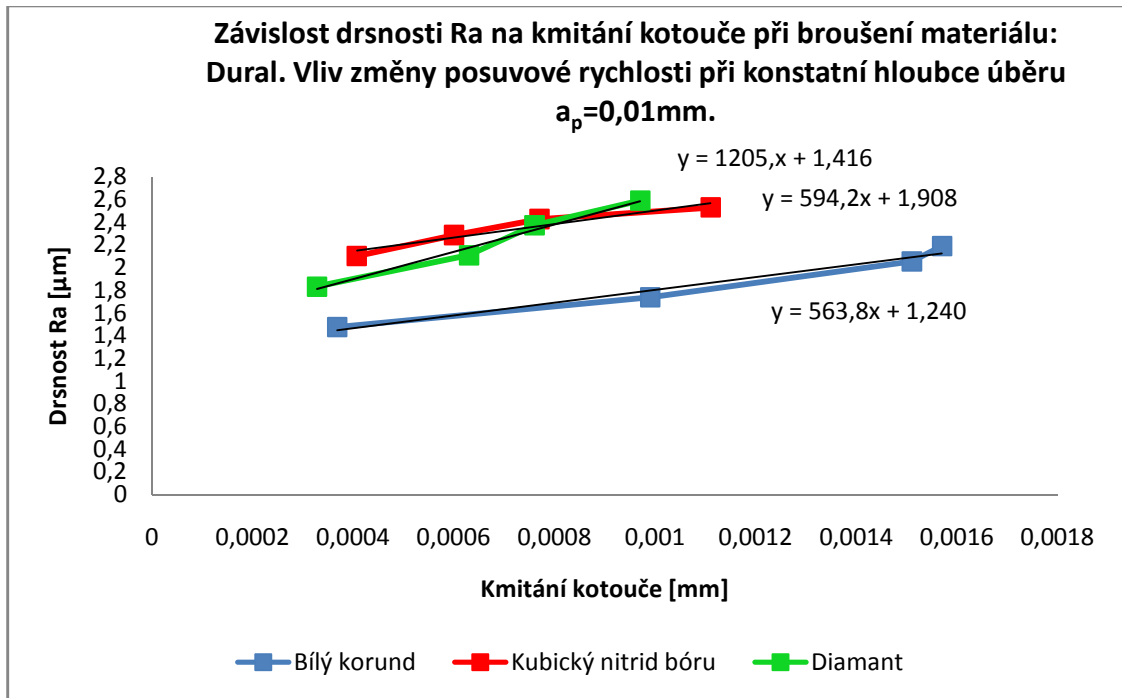


b) Vliv změny hloubky úběry při konstantní posuvové rychlosti

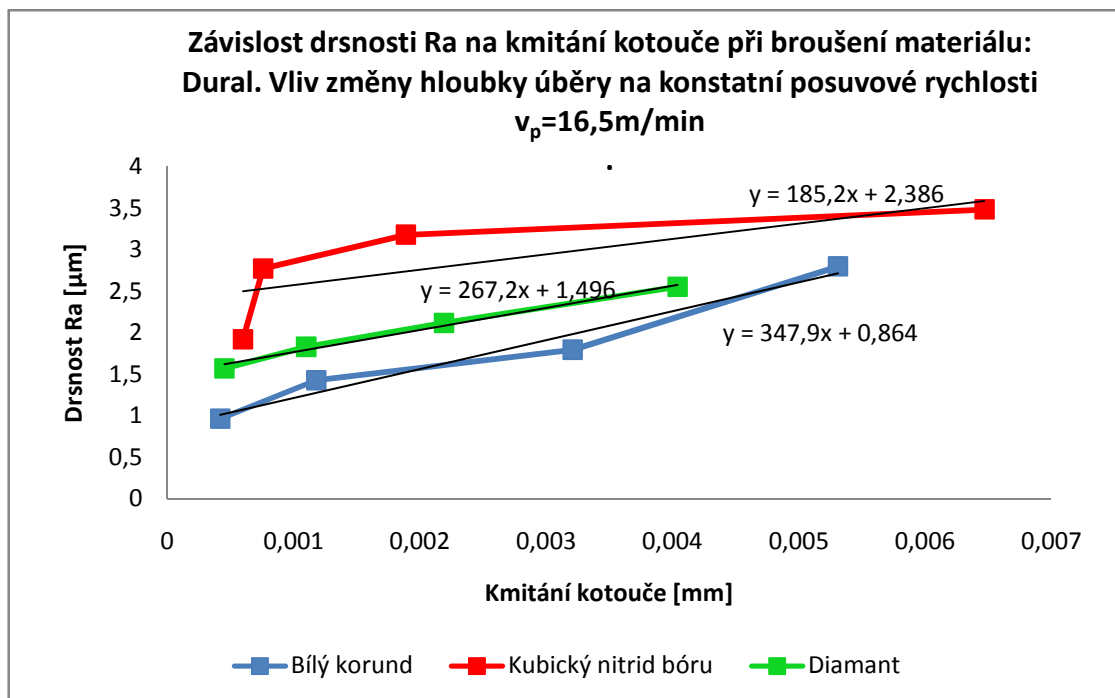


PŘÍLOHA PX: ZÁVISLOST DRSNOSTI RA NA KMITÁNÍ – MATERIÁL: DURAL

a) Vliv změny posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru

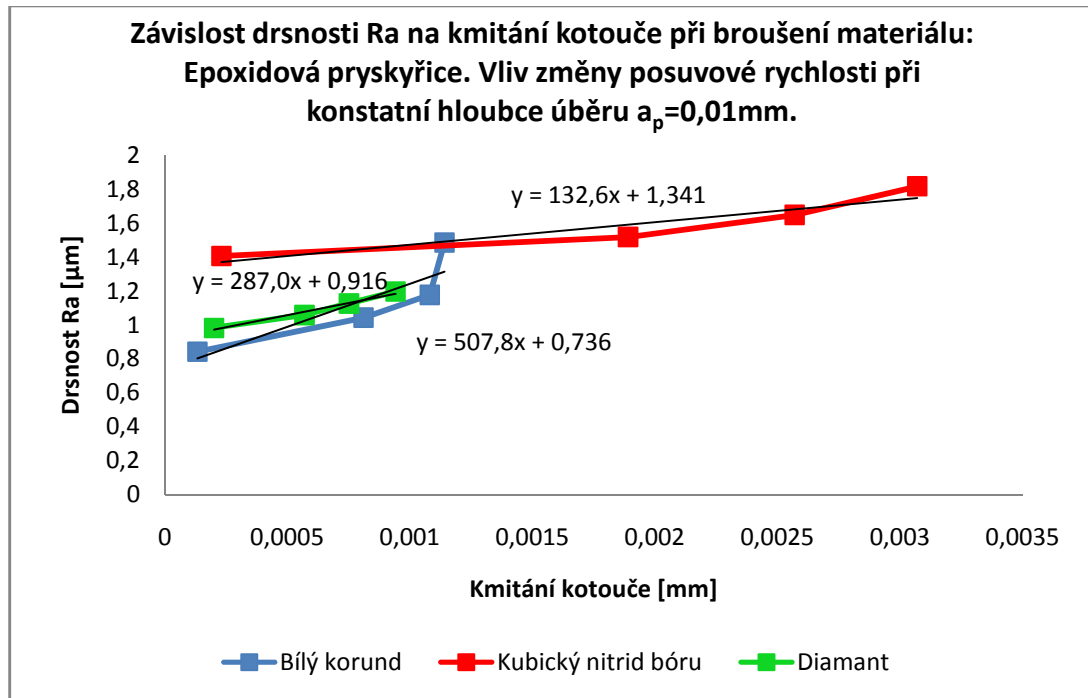


a) Vliv změny hloubky úběru při konstantní posuvové rychlosti



PŘÍLOHA PXI: ZÁVISLOST DRSNOSTI RA NA KMITÁNÍ – MATERIÁL: EPOXIDOVÁ PRYSKYŘICE

a) Vliv změny posuvové rychlosti při konstantní hloubce úběru



a) Vliv změny hloubky úběry při konstantní posuvové rychlosti

